



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO
REGIONAL SUSTENTÁVEL

ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS: UM DESAFIO NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Ana Rute Batista Pereira

JUAZEIRO DO NORTE – CEARÁ

2023

Ana Rute Batista Pereira

**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS: UM DESAFIO NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável da Universidade Federal do Cariri, como requisito para obtenção do Título de Mestre.

Orientadora Prof^ª Dr^ª Celme Torres Ferreira da Costa

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Renato Alves Firmino

JUAZEIRO DO NORTE – CEARÁ

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

P436e Pereira, Ana Rute Batista.

Estimativa da evaporação em reservatórios de águas superficiais: um desafio na gestão de recursos hídricos / Ana Rute Batista Pereira – 2023.

96 f. il. color.; 30 cm.

(Inclui bibliografia, p. 76-88).

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Cariri, Mestrado em Desenvolvimento Regional Sustentável (PRODER), Crato, 2023.

Linha de Pesquisa: Meio Ambiente.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Celme Torres Ferreira da Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Renato Alves Firmino.

1. Gestão de Recursos Hídricos. 2. Segurança Hídrica. 3. Hidrologia estocástica.
4. Evaporação. 5. Evapotranspiração. I. Título.

CDD 333.91

ANA RUTE BATISTA PEREIRA

**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS: UM DESAFIO NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Desenvolvimento Regional Sustentável da Universidade Federal do Cariri - UFCA, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Desenvolvimento Regional Sustentável.

Linha de Pesquisa: Meio Ambiente

Aprovada em 20 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **CELME TORRES FERREIRA DA COSTA**
Data: 06/11/2023 18:00:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Celme Torres Ferreira da Costa
(Orientadora/Universidade Federal do Cariri - UFCA)

Documento assinado digitalmente
 **PAULO RENATO ALVES FIRMINO**
Data: 07/11/2023 13:27:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Renato Alves Firmino
(Coorientador/Universidade Federal do Cariri - UFCA)

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS WAGNER OLIVEIRA**
Data: 07/11/2023 13:39:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Wagner Oliveira
(Membro interno/Universidade Federal do Cariri - UFCA)

Documento assinado digitalmente
 **TICIANA MARINHO DE CARVALHO STUDART**
Data: 07/11/2023 15:12:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Ticiano Marinho de Carvalho Studart
(Membro externo/Universidade Federal do Ceará - UFC)

A Deus.
Aos meus pais, Glíce e Osmar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua graça que me sustenta, e sua providência que me permitiu chegar aqui.

A minha família: meus pais, Glice e Osmar, que sempre lutaram e deram o seu melhor por mim e pela minha educação; minha irmã, Raquel, que sempre me apoiou incondicionalmente e me motivou a alcançar meus objetivos; e aos meus sobrinhos, Estêvão e Isabela, que são raios de sol na minha vida, até mesmo nos dias mais difíceis.

Ao meu noivo, Fernando, aquele que acredita mais em mim do que eu mesma, e me impulsiona a confiar no meu potencial e acreditar que posso ser do tamanho dos meus sonhos.

A minha querida e amada orientadora, Prof. Dra. Celme Torres. Sua trajetória acadêmica é uma referência para mim e para tantos que acreditam que só a educação transforma o mundo. Para além disso, sua história de vida, sua alegria, força e coragem, me ensinaram a encarar os problemas da vida com leveza e a não desanimar mesmo diante das maiores dificuldades. Obrigada por todo o conhecimento repassado, pela paciência e dedicação em cada orientação, pelas conversas que aliviaram a ansiedade e, por fim, pelo carinho que dispensastes a mim durante todos esses anos.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Paulo Renato Alves Firmino, pelas cobranças, ensinamentos e amizade ao longo deste trabalho e de toda a minha trajetória acadêmica.

Aos professores participantes das bancas de qualificação e de defesa, Dr. Carlos Wagner, Dra. Maria Gorethe e Dra. Ticiane Studart pelas indispensáveis colaborações construtivas para a conclusão deste trabalho.

A todos que compõem a Gerência Regional da Bacia do Salgado (COGERH, Crato-CE). Em especial, à pessoa do Otacílio Correia Lima Neto, por toda a disponibilidade, paciência e atenção que teve comigo e com a minha pesquisa.

Aos amigos de faculdade e parceiros de pesquisa no LAHIS, Rayanne Bezerra e Pedro Henrique. Também ao apoio dos amigos Andressa Dyalla, Diêgo Santos e Thiago Luiz, que embarcaram ao mesmo tempo nessa jornada da pós-graduação, nas suas respectivas áreas.

Às colegas e amigas que o PRODER me proporcionou: Angélica, Clara, Igliane, Lays, Mônica e Tamyres, vocês foram essenciais para tornar esse caminho mais leve.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela bolsa de estudo concedida para desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e desse sonho que aqui se concretiza.

RESUMO

O processo de evaporação dos reservatórios de águas superficiais é considerado como perda devido ao significativo volume de água que passa para a atmosfera, sendo importante mensurar tais perdas tanto na fase de elaboração do projeto quanto no decorrer do período de operação do reservatório. A dificuldade de obtenção dos valores de evaporação configura grande desafio para a gestão dos recursos hídricos, especialmente nas regiões áridas e semiáridas, como é o caso do Reservatório Lima Campos, localizado no município de Icó - CE, na Sub-bacia hidrográfica do Rio Salgado. As ferramentas estatístico-computacionais surgem como grandes aliadas no estudo, caracterização e solução de problemas práticos na área de recursos hídricos, principalmente para otimizar tempo e minimizar erros. Desta forma, foram aplicados dois métodos teóricos de estimativa da evaporação, por meio das equações de evapotranspiração de Penman-Montheith (PM FAO-56) e Hargreaves. A série padrão de evaporação utilizada para comparação foi a normal climatológica, a mesma adotada pelo SAGREH - Sistema de Apoio ao Gerenciamento dos Recursos hídricos. Concluiu-se que não houve diferença significativa entre a série de evaporação gerada pelo método PM FAO-56 e a normal climatológica de evaporação, entretanto foi possível ver uma maior sensibilidade do método PM FAO-56 às mudanças atípicas do clima. O método de Hargreaves superestimou os valores em relação à normal climatológica na maior parte da série.

Palavras-chave: Gestão de Recursos Hídricos; Segurança Hídrica; Hidrologia estocástica; Evaporação; Evapotranspiração.

ABSTRACT

The evapotranspiration process from surface water reservoirs is considered a loss due to the significant volume of water that passes into the atmosphere, and it is important to measure such losses both in the project design phase and during the reservoir operation period. The difficulty in obtaining evapotranspiration values represents a great challenge for the management of water resources, especially in arid and semi-arid regions, as is the case of the Lima Campos Reservoir, located in the municipality of Icó - CE, in the Salgado River Sub-basin. Statistical-computational tools emerge as great allies in the study, characterization and solution of practical problems in the area of water resources, especially to optimize time and minimize errors. In this regard, two theoretical methods for estimating evaporation were applied, using the Penman-Montheith (PM FAO-56) and Hargreaves evapotranspiration equations. The standard evaporation series used for comparison was the climatological normal, the same adopted by the SAGREH - Water Resources Management Support System. It was concluded that there was no significant difference between the evaporation series generated by the PM FAO-56 method and the climatological normal evaporation. However, the PM FAO-56 method showed greater sensitivity to atypical climate changes. The Hargreaves method overestimating the values them compared to the climatological normal in most of the series.

Keywords: Water Resources Management; Water Security; Stochastic Hydrology; Evaporation; Evapotranspiration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Evapotranspiração.....	31
Figura 2 – Métodos para determinação do rebaixamento natural do Açude.....	39
Figura 3 - Mapa de Localização da Área de Estudo, contendo a localização do Reservatório Lima Campos e da Estação Meteorológica Automática utilizada para coleta de dados.	45
Figura 4 - Distribuição das demandas de retirada do reservatório Lima Campos	46
Figura 5 - Série histórica da Precipitação Anual do município de Icó-CE e pluviosidade média anual.	47
Figura 6 - Série histórica da Precipitação Mensal do município de Icó-CE e pluviosidade média mensal.....	47
Figura 7 - Fluxograma dos Procedimentos metodológicos.....	48
Figura 8 - Erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada método de imputação da variável Temperatura (°C)	57
Figura 9 - Erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada método de imputação da variável Radiação (MJ/m ² .dia).....	58
Figura 10 - Teste de Significância para o coeficiente de correlação de Pearson ao nível de 5% para as variáveis em estudo	59
Figura 11 - Série histórica dos dados meteorológicos coletados na EMA de Iguatu-CE, com valores faltantes imputados.	62
Figura 12 - Evaporação em mm, açude Lima Campos, Iguatu-CE, Brasil, estimadas pelos métodos de Penman-Montheith (1948) e Hargreaves (1974) entre 2014-2022	63
Figura 13 - Diferenças entre o método padrão e os métodos propostos para estimativa da evaporação.....	64
Figura 14 - Comparativo dos Métodos de Cálculo da Evaporação para o ano de 2018	66
Figura 15 - Comparativo dos Métodos de Cálculo da Evaporação para o ano de 2022	67
Figura 16 - Aporte médio do açude Lima Campos, Iguatu-CE, calculado pelo código computacional e pelo SAGREH, no período de 2014-2022	68
Figura 17 - Aporte mínimo do açude Lima Campos, Iguatu-CE, calculado pelo código computacional e pelo SAGREH, no período de 2014-2022	69
Figura 18 - Comparação do volume residual do reservatório estimado pelos métodos com o volume observado para o cenário de aporte médio.	70

Figura 19 - Perfil de esvaziamento do reservatório Lima Campos com aporte mínimo calculado pelo método proposto (2014-2022)	72
Figura 20 - Perfil de esvaziamento do reservatório Lima Campos com aporte mínimo calculado pelo SAGREH (2014-2022)	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente C1 de correção pelo tamanho do espelho d'água.	40
Tabela 2 - Percentual de dados faltantes nos conjuntos de dados meteorológicos da estação automática de Iguatu-CE, após correção da série de radiação, por variável.	54
Tabela 3 - Erros (MAE e RMSE) encontrados para cada método de imputação das variáveis de Temperatura(°C), Temperatura máxima(°C) e Temperatura Mínima(°C), na estação automática de Iguatu-CE (junho de 2007 a dezembro de 2022). Os melhores valores estão destacados em negrito.	55
Tabela 4 - Erros (MAE e RMSE) para cada método de imputação das variáveis de Pressão atmosférica (kPa), Umidade Relativa (%), Velocidade do Vento (m/s) e Radiação (Mj/m ² .dia), na estação automática de Iguatu-CE (junho de 2007 a dezembro de 2022). Os melhores valores estão destacados em negrito.	56
Tabela 5 - Estatísticas descritivas para as variáveis meteorológicas extraídas da estação automática de Iguatu-CE, no período de 2014-2022.	60
Tabela 6 - Comparativo da lâmina evaporada anualmente calculada pelo método PM FAO-56 e Hargreaves.	65
Tabela 7 - Erro absoluto entre as estimativas e o volume observado no monitoramento ao final de cada ano.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CAV	Cota x Área x Volume
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
EMA	Estação Meteorológica Automática
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração de Cultura
ETo	Evapotranspiração de Referência
ETp	Evapotranspiração Potencial
EVA	Evaporação
EVINF	Efeito combinado da evaporação e infiltração
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia
GRH	Gestão de Recursos Hídricos
HIDRO	Portal Hidrológico do Ceará
IAF	Índice de Área Foliar
INF	Infiltração
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
MAE	Erro absoluto médio (<i>Mean absolute error</i>)
MAR	Mecanismo de ausência aleatória (<i>Missing at Random</i>)
NA	<i>Not Available</i>
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional
PLANERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PM FAO-56	Método Penman-Monteith FAO 56
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RMF	Região metropolitana de Fortaleza
RMSE	Raiz do erro quadrático médio (<i>Root Mean Squared Error</i>)

SAGREH	Sistema de Apoio ao Gerenciamento dos Recursos Hídricos
SIGERH	Sistema Integrado de Gestão dos Recursos Hídricos
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
TMG	Tempo Médio de Greenwich
VBA	<i>Visual Basic edição de Aplicativos</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Metro
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
km ²	Quilômetro quadrado
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
kPa	Kilopascal
MJ	Milijoule
rad	Radianos
sen	Seno
tan	tangente
arctan	Arctangente
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura (kPa°C ⁻¹)
Rn	Saldo de radiação diário (MJm ⁻² dia ⁻¹)
Rns	Saldo de radiação de ondas curtas (MJm ⁻² dia ⁻¹)
Rnl	Saldo de radiação de ondas longas (MJm ⁻² dia ⁻¹)
Rs	Radiação solar incidente (MJm ⁻² dia ⁻¹)
Rso	Radiação solar incidente na ausência de nuvens (MJm ⁻² dia ⁻¹)
Ra	Radiação solar no topo da atmosfera (MJm ⁻² dia ⁻¹)
G	Fluxo total diário de calor no solo (MJm ⁻² dia ⁻¹)
γ	Coefficiente psicrométrico (kPa°C ⁻¹)
u ₂	Velocidade do vento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
e _s	Pressão de saturação de vapor (kPa)
e _a	Pressão atual de vapor (kPa)
s	segundo
T	Temperatura média do ar (°C)
T _{max}	Temperatura máxima do dia (°C)
T _{min}	Temperatura mínima do dia (°C)
T _{comp}	Temperatura média compensada (°C)
T ₁₂	Temperatura observada às 12:00 TMG (°C)
T ₂₄	Temperatura observada às 24:00 TMG (°C)
F	Fator dependente da latitude

exp	Base do logaritmo natural ($e = 2,71828$)
P_{atm}	Pressão atmosférica
z	Altitude no local
UR	Umidade relativa média do ar (%)
α	Coefficiente de reflexão da vegetação (albedo)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)
φ	Latitude do local (rad)
π	$\pi=3,14159$
dr	Distância inversa relativa entre a Terra e o Sol (rad)
J	Número do dia do ano
δ	Declinação solar (rad)
ω_s	Ângulo horário ao nascer do sol (rad)
C_1	Coefficiente de correção pelo tamanho do açude
C_2	Coefficiente de correção da infiltração
σ_i	Desvio padrão
COV	covariância
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
V	Volume
E_{medio}	Erro médio
$E_{absoluto}$	Erro absoluto

SUMÁRIO

RESUMO	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS	12
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Objetivos.....	18
1.2. Justificativa	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1. Gestão de Recursos Hídricos	21
2.1.1. <i>Gestão de Recursos Hídricos no âmbito dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).....</i>	<i>23</i>
2.1.2. <i>Gestão das águas superficiais no Ceará.....</i>	<i>24</i>
2.2. Operação dos Reservatórios Superficiais	26
2.2.1. <i>Transferência de água entre bacias hidrográficas como medida para mitigar conflitos pela água.....</i>	<i>27</i>
2.3. Evaporação em superfície de água livre	29
2.4. O fenômeno da evapotranspiração	30
2.4.1. <i>Evapotranspiração Potencial (ETP).....</i>	<i>31</i>
2.4.2. <i>Evapotranspiração de referência (ETo)</i>	<i>32</i>
2.5. Modelos para estimativa da Evapotranspiração	32
2.5.1. <i>Evolução da modelagem da estimativa de Evapotranspiração</i>	<i>33</i>
2.5.2. <i>Método Penman-Monteith.....</i>	<i>35</i>
2.5.3. <i>Método Hargreaves.....</i>	<i>38</i>
2.6. Estimativa das perdas por evaporação para pequenos açudes	38
2.7. Preenchimento de falhas de dados meteorológicos.....	41

2.8. Correlação linear entre variáveis	42
3. METODOLOGIA	44
3.1. Natureza do trabalho.....	44
3.2. Área em Estudo.....	44
3.3. Procedimentos metodológicos.....	48
3.3.1. Coleta de Dados	49
3.3.2. Consistência de dados e Preenchimento de Falhas	49
3.3.3. Método Penman-Montheith FAO-56 para o cálculo da evapotranspiração	51
3.3.4. Método de Hargreaves para o cálculo da evapotranspiração	51
3.3.5. Estimativa das perdas de evaporação por meio da Evapotranspiração	52
3.3.6. Cálculo do aporte e simulação de esvaziamento	52
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
4.1. Consistência dos dados e preenchimento de falhas	54
4.2. Teste de correlação linear entre as variáveis	58
4.3. Séries históricas dos dados meteorológicos	60
4.4. Séries de Evaporação.....	63
4.5. Aporte do reservatório	67
4.6. Simulações de Esvaziamento	69
5. CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
APÊNDICE A	89
APÊNDICE B	91
APÊNDICE C	94

1. INTRODUÇÃO

Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos é um dos desafios que compõem as metas centrais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (ONU, 2023). O princípio da equidade, portanto, para além de uma recomendação técnica, traz consigo a promessa de um mundo com maior segurança hídrica. E estes desafios tomam nova dimensão em áreas do planeta que naturalmente já sofrem com uma baixa disponibilidade hídrica, como é o caso do Nordeste do Brasil e de muitos países como a África e alguns do Oriente Médio e Ásia (JACOBI; EMPINOTTI; SCHMIDT, 2016).

A Região Nordeste apresenta um cenário de escassez hídrica conhecido desde as origens do descobrimento do Brasil, com a expansão populacional da região. O Ceará, inserido no Nordeste brasileiro, é um dos principais estados a sofrerem com os efeitos da escassez de chuva, apresentando cenários recorrentes de secas que causam inúmeras mazelas à população (PEREIRA, CUELLAR, 2015; RABELO, 2017). Tal fato, sem dúvida, se comporta como limitante para o desenvolvimento da região.

No âmbito das políticas governamentais, historicamente há registro de várias iniciativas voltadas a garantir o fornecimento hídrico para a população impactada. A inconstância das chuvas na região promove variabilidade de vazão nos rios, resultando em um déficit hídrico natural, ou seja, quando a vazão no curso d'água é insuficiente para suprir as necessidades da população usuária. Como alternativa para este cenário, a construção de barragens, visando o abastecimento humano, foi e é considerada uma das soluções mais viáveis e utilizadas em todo mundo (COGERH, 2017).

De acordo com Barbosa Júnior (2022), a regularização de vazões por meio de reservatórios é efetuada pelo acúmulo, total ou parcial, do volume precipitado visando atender às demandas do período de estiagem. Além disso, tais reservatórios podem ser utilizados também na função de produzir o amortecimento das ondas de cheia, proporcionando proteção para as áreas situadas a jusante do barramento.

Todos os reservatórios, sejam de pequeno ou grande porte, sofrem com a perda de parcelas de água por evaporação. No contexto dos pequenos e médios açudes, estima-se uma taxa de evaporação de cerca de 40% no período de estiagem em anos de precipitação normal. Nesse ritmo, um açude, por exemplo, com 100 mil m³ de água armazenada durante o período chuvoso perde até 15 mil m³ de sua lâmina de água por evaporação logo no início do período de estiagem (SILANS, 2003).

Os impactos da evaporação dos reservatórios variam com a localização, com as diferenças climáticas, com as características do reservatório e com as práticas de uso e manejo (WURBS; AYALA, 2014), constituindo-se como um desafio para a gestão dos recursos hídricos, especialmente nas regiões áridas e semiáridas. Nesse contexto, os mecanismos de alocação de água podem contribuir para a aplicação mais eficiente dos instrumentos de gestão.

Como destacado por Silva e Monteiro (2004), o procedimento de alocação de água para fins de outorga mais adotado no Brasil, a partir da década de noventa, baseia-se na definição de vazões mínimas de referência e no estabelecimento de limites de utilização dessas vazões por usos da água, objeto de autorizações pelo poder público.

De acordo com Garjulli, Oliveira e Silva (2003), no Estado do Ceará, a promoção do processo de organização de usuários tornou-se o principal elemento da política estadual de recursos hídricos, utilizado para reversão de traços culturais que refletem em práticas econômicas, políticas e sociais ineficientes em relação ao uso da água. Assim, as quantidades de água alocadas podem ser definidas de forma eficiente por processos de negociação social de conflitos pelo uso da água.

O processo de Alocação de água tem sido conduzido pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH, criada pela Lei nº 12.217, de 18 de novembro de 1993. Em suma, a alocação ocorre anualmente após a quadra chuvosa, por meio de seminários, com as seguintes análises: situação atual dos reservatórios, simulação de esvaziamento dos açudes, avaliação da demanda, definição da vazão a ser liberada e formação de uma comissão de usuários para acompanhamento. Todas as decisões tomadas durante a reunião são registradas em atas assinadas por seus participantes (PINHEIRO; CAMPOS; STUDART, 2011).

Os métodos de modelagem e análise para avaliar a capacidade de abastecimento de água de sistemas reservatório/rio são fundamentais para a gestão eficaz dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica. Os métodos de análise devem lidar com a natureza estocástica das vazões e outras variáveis pertinentes (WURBS, 2005). De acordo com Almeida e Serra (2017), um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Tomando como exemplo, o nível futuro de um reservatório depende da vazão fluente futura, que é uma variável aleatória com uma dada distribuição de probabilidade. A necessidade de consideração das incertezas e dos processos estocásticos na gestão dos recursos hídricos, é geralmente solucionada com a utilização dos valores médios históricos, previsões, ou otimização de possíveis futuros cenários (CELESTE; SANTANA; SANTOS, 2016).

Diante do contexto exposto, surgem as questões norteadoras para essa pesquisa, pautadas na otimização do gerenciamento dos recursos hídricos superficiais:

- É possível otimizar a modelagem da evaporação dos reservatórios por meio de equações teóricas?
- O erro de estimativa de evaporação, com base na evapotranspiração resultante do método Penman-Montheith é menor quando comparado com o método de Hargreaves, utilizando a normal climatológica de evaporação como padrão de validação?
- Como a otimização da modelagem pode influenciar no gerenciamento dos recursos hídricos?

Para responder a essas questões, a pesquisa foi embasada no cálculo da evapotranspiração pelos métodos de Hargreaves e Penman-Montheith-FAO, a aplicação do método de conversão desses valores em evaporação (MOLLE; CADIER, 1992), o cálculo do aporte e a simulação de esvaziamento do reservatório a partir dos valores calculados.

1.1. Objetivos

Objetivo Geral

Aplicar um método teórico de estimativa da evaporação, por meio das equações de evapotranspiração em um reservatório localizado na sub-bacia hidrográfica do Salgado, Ceará.

Objetivos Específicos

1. Identificar as plataformas de coleta de dados e as variáveis climatológicas;
2. Realizar o pré-processamento dos dados das séries históricas, incluindo o preenchimento de falhas quando necessário;
3. Desenvolver um modelo computacional dedicado ao cálculo da evapotranspiração de referência aplicando os modelos PM-FAO e Hargreaves;
4. Implementar algoritmo para realizar estimativa da evaporação por meio da evapotranspiração, pelo método de Molle e Cadier (1992);
5. Calcular os aportes médios e mínimos do reservatório para o período em estudo;
6. Validar os resultados a partir da simulação do esvaziamento do reservatório e dos dados de monitoramento.

1.2. Justificativa

O Ceará tem apresentado nas últimas décadas uma crescente demanda por água, devido ao processo de desenvolvimento rural e econômico, assim como devido à quantificação, cada vez mais fundamentada, das necessidades ambientais (OLIVEIRA FILHO, 2013). Para uma avaliação dos recursos hídricos disponíveis e do próprio gerenciamento das águas, a realização de um balanço hídrico é imprescindível (SOUSA *et al.*, 2009).

No âmbito da gestão dos recursos hídricos, a evaporação dos lagos e reservatórios superficiais faz parte dos processos que integram o balanço hídrico, sendo necessário à aferição de sua disponibilidade em termos quantitativos para os mais diversos usos, conforme recomenda a Lei 9.433 (Lei das Águas), de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

A evaporação consiste no saldo negativo da disponibilidade hídrica, podendo ser a mais importante causa do decréscimo de volume nos reservatórios superficiais, especialmente nas regiões semiáridas, que têm seus efeitos potencializados devido aos aspectos climáticos inerentes (AHMADZADEH KOKYA *et al.*, 2011; MCJANNET *et al.*, 2017).

A gestão participativa dos recursos hídricos é um fundamento que integra a referida Lei das Águas (BRASIL, 1997), e as agências de água tem o papel de fazer cumpri-lo. A Alocação Negociada de Água é uma das formas de concretização desse fundamento, pois conta com a participação do poder público, usuários e comunidade, no entanto, muitas das decisões exigem um certo conhecimento técnico.

O planejamento do uso da água de reservatórios e a definição de suas regras de operação podem ser feitos por meio de diversas metodologias e utilizam modelos de operação de reservatórios. Pode-se classificar esses processos por simulação, otimização e simulação combinada com a otimização (RANI; MOREIRA, 2010).

Dentro deste contexto, a simulação de esvaziamento de reservatórios, utilizada na gestão de recursos hídricos do Ceará, tem os parâmetros de entrada e de saída facilmente entendível pelos usuários e os resultados servem como uma boa orientação para a tomada de decisão de como gerenciar os recursos hídricos superficiais de uma bacia hidrográfica (PAULINO, 1997).

As simulações de esvaziamento dos reservatórios estimam o volume de perda por evaporação e calculam os diversos cenários de liberação de água. Estas são utilizadas como apoio às decisões dos Comitês de Bacias Hidrográficas, que estabelecem as vazões máximas e a estimativa do volume mínimo que o reservatório deve ter ao final da operação, além de servir como apoio à decisão das regras da operação de cada reservatório.

Para a simulação de esvaziamento dos reservatórios a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH) utiliza o SAGREH – Sistema de Apoio ao Gerenciamento dos Recursos hídricos (PAULINO, 2006). Essa ferramenta foi desenvolvida por técnicos da própria Companhia e é composto por um conjunto de planilhas do Microsoft Excel, com uma série de funções que tem alguma relação com o tema de simulação de reservatórios. Por meio do SAGREH é possível definir diversos cenários com intuito de nortear negociações sobre a alocação de água (RODRIGUES *et al.*, 2016).

Ao final do período de operação são realizadas reuniões de avaliação conduzidas pela COGERH, apresentando aos usuários, dentre outros dados, a diferença entre o volume simulado e o volume real do reservatório ao final do ano. É recorrente que essa diferença apresente um volume significativo, e pode ser justificada por diversos fatores, dentre eles está a dificuldade de estimar a evaporação nos lagos dos reservatórios.

A hipótese é que os métodos empíricos (Hargreaves e Penman-Montheith-FAO), que se baseiam em equações empíricas e parâmetros meteorológicos, proporcionarão estimativas de evaporação mais eficientes e precisas por considerar as variações climáticas e características específicas do reservatório. Enquanto o SAGREH, que utiliza a normal climatológica como série de evaporação pré-definida, não consegue acompanhar estas variações. A comparação entre os resultados obtidos pelos dois métodos permitirá entender suas respectivas vantagens e limitações, contribuindo para a seleção do método mais apropriado de acordo com os objetivos da gestão de recursos hídricos, principalmente quando se aborda a questão da segurança hídrica nas bacias hidrográficas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção de referencial teórico é dividida em oito tópicos e traz aspectos referentes à gestão dos recursos hídricos, ao processo de operação dos reservatórios, conceitos de evaporação e de evapotranspiração. Além disso, conta com a apresentação dos modelos para estimativa da evapotranspiração, do método de conversão em evaporação de reservatórios, sendo finalizada com um tópico dedicado ao preenchimento de falhas de dados meteorológicos e outro tratando sobre a correlação entre variáveis.

2.1. Gestão de Recursos Hídricos

A água é um recurso essencial e indispensável para a manutenção da vida no planeta, sendo elemento insubstituível em diversas atividades humanas, além de manter o equilíbrio do meio ambiente. Mesmo diante desse fato, aproximadamente dois bilhões de pessoas carecem de acesso à água com qualidade adequada (WHO, 2022). No Brasil este número é de aproximadamente 35 milhões de pessoas, contrariando o fato de que o país detém 15% da água doce do globo e reforça que o acesso a este recurso tem natureza política (RIBEIRO, 2019).

No cenário brasileiro, mesmo com uma elevada oferta de água, a má distribuição geográfica deste recurso e a falta de uma gestão eficaz têm contribuído para graves crises de escassez hídricas em algumas regiões do país (ANA, 2013), tornando cada vez mais urgente o planejamento integrado e a efetividade da gestão dos recursos hídricos (FASAKHODI; NOURI; AMINI, 2010).

O termo Gestão de Recursos Hídricos (GRH) pode ser entendido como um conjunto de ações que possuem como objetivo a regulação dos usos da água, de forma a garantir o uso da população e a manutenção de um ambiente sustentável, com base no disposto na legislação pertinente. Os benefícios de um gerenciamento hídrico eficiente refletem nas camadas sociais, econômicas e ambientais da população atingida (LIANQING *et al.*, 2012).

Segundo Dingman (2015), a gestão de recursos hídricos engloba a análise aprofundada das leis que regem a formação, distribuição, movimentação e evolução dos recursos hídricos, bem como a aplicação hábil dessas leis para satisfazer as demandas humanas por água e mitigar os desafios ambientais inerentes a esses fluxos. Esse campo abrangente não apenas busca otimizar a alocação sustentável dos recursos hídricos, considerando as necessidades de abastecimento, agricultura, indústria e ecossistemas, mas também visa enfrentar os impactos das mudanças climáticas, poluição e degradação dos ecossistemas aquáticos. Ao compreender

e aplicar de forma equilibrada as regras que governam a dinâmica hídrica, a gestão de recursos hídricos busca garantir uma coexistência harmoniosa entre as atividades humanas e as limitações dos recursos hídricos, visando a segurança hídrica a longo prazo e a preservação da saúde dos ecossistemas hídricos.

A primeira iniciativa, no que tange à gestão do uso da água no Brasil, pode ser identificada pelo Código das Águas, por meio do Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934 (BRASIL, 1934). Apresentava fragmentação do gerenciamento, centralização do poder decisório, unificação no modelo de atendimento de demandas e priorização do setor elétrico e industrial (CHODI; SARCINELLE; UEZU, 2013). As decisões dos objetivos e transferências de recursos eram tomadas por meio de um processo majoritariamente político, quando deveria se basear em conhecimento teórico e técnico. Dessa forma a sociedade civil e o setor usuário não tinham nenhuma participação no gerenciamento dos recursos hídricos.

Segundo Souza Filho (2005), nos meados dos anos 1980, uma abordagem revolucionária para o planejamento dos recursos hídricos começou a ganhar destaque, impulsionada pelos conflitos emergentes relacionados ao precioso recurso da água. Nesse período, as crescentes demandas por água, juntamente com a degradação ambiental e as disputas entre setores usuários, deram origem a uma visão diferenciada e mais holística da gestão hídrica. A compreensão de que a água é um bem finito e fundamental para todas as formas de vida impulsionou a adoção de estratégias que promovessem a cooperação, a sustentabilidade e a equidade na distribuição desse recurso essencial. Essa nova perspectiva não apenas reconheceu a interdependência entre os diversos atores envolvidos, mas também estabeleceu as bases para a criação de políticas integradas de gestão hídrica, visando a preservação a longo prazo e o uso responsável desse vital elemento.

A Constituição Federal, como a Lei máxima de um Estado, inovou ao dedicar um capítulo específico ao meio ambiente, conformado pelo artigo 225. De acordo com o Art. 225 da Constituição Federal de 1988

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 2012, p. 59).

A visão da Constituição consolidou o entendimento de que todas as águas são de domínio público partilhado entre Estados e União, incluindo a população como detentora do

poder de usufruir, defender e preservar os corpos de água, inseridos no conceito do meio ambiente ecologicamente equilibrado.

O Ceará foi um dos estados pioneiros na mudança do panorama da gestão dos recursos hídricos, ao publicar a Lei nº. 11.996/1992, que criou a Política Estadual de Recursos Hídricos, contudo essa encontra-se revogada pela Lei nº 14.844/2010 (CEARÁ, 2010), que introduziu, na Lei anterior, avanços significativos, do ponto de vista legal e operacional, além do que instituiu o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PLANERH) e o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos (SIGERH).

No âmbito nacional, posteriormente, houve a publicação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que apresentou a gestão integrada, participativa e descentralizada dos recursos hídricos, sendo um marco da mudança no gerenciamento de recursos hídricos em escala nacional. A água passa a ser compreendida como um recurso natural e limitado, dotado de valor econômico (BRASIL, 1997). Por meio da Política Nacional de Recursos Hídricos, a Bacia Hidrográfica foi instituída como unidade de gestão do Recursos Hídricos, além disso, definiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) e os instrumentos de gestão.

Para Tucci (1997), a bacia hidrográfica pode ser definida como uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório (foz ou desembocadura). Dessa forma, o gerenciamento hídrico se torna mais eficiente, tendo em vista uma redução da dimensão dos territórios a serem geridos, e maior uniformidade hidrológica nas regiões delimitadas pelas bacias hidrográficas.

2.1.1. Gestão de Recursos Hídricos no âmbito dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A busca pela sustentabilidade do meio ambiente tem sido debatida ao longo dos anos. Vários planos de desenvolvimento sustentável foram idealizados, a exemplo da Agenda 2030, por meio de uma resolução aprovada em setembro de 2015 no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU), visando alcançar os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS. Segundo Sadof, Borgomeo e Uhlenbrook (2020), a Agenda 2030 propõe um desafio de mudança na forma de pensar e gerir a água.

A ONU (2023) retrata os ODS's como um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade.

De acordo com Rabelo (2022), a importância da gestão dos recursos hídricos e garantia da segurança hídrica é reconhecida globalmente nas metas e objetivos propostos pela Agenda, principalmente nas que envolvem a qualidade e a quantidade de água. De forma mais evidente, há um objetivo exclusivamente ligado à questão da água, o **ODS 6 “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos”**.

Antes da formulação desse Objetivo, as metas globais de água concentravam-se principalmente no abastecimento de água potável e no saneamento. Estas incluem os esforços da Década Internacional de Abastecimento de Água Potável e Saneamento (1981–1990), a Declaração de Nova Délhi (1991–2000) e os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODMs) (2001–2015) (SADOF; BORGOMEIO; UHLENBROOK, 2020).

Além disso, a gestão da água está relacionada também a outros ODS's, principalmente com a segurança na oferta de água para produção de alimentos (ODS 2 - fome zero e agricultura sustentável); com o sistema de saneamento eficientes (ODS 3 - saúde e bem-estar); para o funcionamento das indústrias e criação de empregos (ODS 7 - energia limpa e acessível, e ODS 9 - indústria, inovação e infraestrutura); com a preservação e sustentabilidade dos ecossistemas (ODS 11- cidades e comunidades sustentáveis; ODS 13 - ação contra a mudança global do clima; ODS 14 - vida na água e ODS 15 - vida terrestre) (ZHANG *et al.*, 2019).

Dessa forma, o ODS 6 se apresenta como um elo fundamental para o alcance da segurança hídrica, pois envolve os aspectos do desenvolvimento, desde a segurança alimentar, mudanças climáticas, meio ambiente e gestão de risco de desastres (RABELO, 2022).

2.1.2. Gestão das águas superficiais no Ceará

A legislação sobre recursos hídricos no Estado do Ceará começou ainda na década de 80, buscando melhoria em organização e aplicação de recursos para a construção de obras hidráulicas, criando inclusive um sistema único de gestão hídrica e publicando a Lei N° 11.996, de 24 de julho de 1992, que trata da política de recursos hídricos implementada no Estado, ou seja, o Estado do Ceará possui sua política de recursos hídricos promulgada anteriormente à atual Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997). Tal antecipação se deu principalmente pela necessidade de superação das dificuldades causadas pela seca, sendo imprescindível que o Estado se organizasse de forma a mitigar os efeitos da estiagem, bem como a ampliar a produção de alimentos (DE OLIVEIRA, 2017).

A política de Recursos Hídricos do Governo do Estado criou a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), oficializada pela Lei n° 12.217, de 18 de novembro de 1993,

com a finalidade de implantar um sistema de gerenciamento da oferta de água superficial e subterrânea do Estado, visando equacionar as questões referentes ao seu aproveitamento e controle, compreendendo os aspectos de monitoramento dos reservatórios e poços, manutenção, operação de obras hídricas e organização de usuários (CEARÁ, 1993).

A COGERH é responsável pela administração dos mais importantes açudes públicos estaduais e federais, além de reservatórios, canais e adutoras das 12 bacias hidrográficas do Ceará. Ela desempenha o gerenciamento da oferta de água superficial e subterrânea no Ceará, compreendendo os aspectos de monitoramento dos reservatórios e poços, manutenção, outorgas de direito de uso, operação de obras hídricas e organização de usuários (COGERH, 2022).

A gestão descentralizada, integrada e participativa ocorre por meio de reuniões ou seminários de alocação negociada de água, em ações conduzidas pela Companhia para mobilização e apoio a organização dos usuários de água (LOPES; FREITAS, 2007).

Segundo Silva *et al.* (2007), a primeira intervenção concreta para a gestão descentralizada e participativa, ocorreu no dia 29 de julho de 1994, com a realização do I Seminário dos Usuários das Águas dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú, motivado pela situação crítica de acumulação de água dos açudes Orós e Banabuiú, responsáveis pela perenização dos respectivos vales.

O processo de alocação negociada de água no estado do Ceará é promovido pela COGERH anualmente, sempre no início do segundo semestre do ano, quando a região está entrando em seu período de estiagem. Dessa forma é possível definir a disponibilidade hídrica de cada reservatório, considerando as recargas de água recebidas no período chuvoso.

Segundo Silva *et al.* (2007), são realizados seminários nos quais é apresentada a situação atual e alguns cenários de simulação de esvaziamento, avaliada a demanda, definida a vazão a ser liberada, e formada uma comissão de usuários de água para o acompanhamento da operação. As deliberações das reuniões são registradas em atas assinadas por seus participantes, constituindo um documento de referência oficial para a operação dos açudes.

Segundo Fontes (2005), a determinação do volume disponível no reservatório, para os usos múltiplos, depende de um criterioso conhecimento das perdas por evaporação, informação de suma importância para políticas de manejo dos recursos hídricos, gestão, operação dos reservatórios e garantia ao atendimento das demandas de água.

No Ceará esse processo é realizado tanto para os açudes isolados (geralmente de médio porte que perenizam isoladamente um vale determinado, tendo alcance localizado), quanto para os sistemas estratégicos, que são os grandes vales perenizados por um agrupamento de açudes (PEREIRA, 2014).

O Sistema de Apoio ao Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SAGREH) é um programa desenvolvido por técnicos da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) com o objetivo de tentar prever o comportamento de esvaziamento dos reservatórios. O programa é desenvolvido dentro do ambiente do software Microsoft Excel, com linguagem de programação nativa para automação do programa, o VBA (*Visual Basic edição de Aplicativos*), fazendo o uso de diversas planilhas onde se definem cenários com intuito de nortear negociações sobre a alocação de água (RODRIGUES *et al.*, 2016).

Ainda segundo Rodrigues *et al.* (2016), o incremento ou dedução do volume de água do hidrossistema é fundamentado no balanço hídrico do reservatório, no qual se têm como entradas a precipitação e os escoamentos superficiais, e como saídas a evaporação, extravasamento e as retiradas, tanto pela tomada d'água, quanto diretamente na bacia hidráulica.

2.2. Operação dos Reservatórios Superficiais

As regiões semiáridas são caracterizadas, de modo geral, pela irregularidade climática, pela escassez hídrica, pela imprevisibilidade das precipitações pluviométricas, por longos períodos de estiagens e por consequências diretas sobre a economia e a população (DANTAS, 2017). Nesse contexto, os reservatórios de águas superficiais apresentam-se como uma solução ao problema do balanço hídrico deficitário enfrentado por essas regiões, garantindo o armazenamento de água em períodos com maior volume de chuva para uso em períodos de estiagem.

O abastecimento dos reservatórios se dá pela captação das vazões afluentes pelo curso de água e pela precipitação direta no lago do reservatório, e envolve outros três fluxos hidrológicos: evaporação na superfície do lago, vazão de sangria ou vertida, em decorrência do excesso do acúmulo de água, e as vazões liberadas para atendimento das demandas (CAMPOS, 2010).

Os reservatórios operados para atender múltiplas demandas de água (para abastecimento, irrigação e geração de energia) são, normalmente, mantidos em níveis tão altos como possível e necessitam de uma gestão eficiente para garantir a segurança hídrica nos períodos mais secos. À medida que as demandas de água crescem, acirram-se os conflitos e disputas por esse recurso, enquanto os sistemas de recursos hídricos tendem a se tornar maiores e complexos (BACALHAU, 2015).

Para qualquer operação de reservatório, a regra ou política de operação envolve decidir sobre a magnitude das liberações do reservatório para atender às demandas especificadas para diferentes fins com base em dois critérios principais, quais sejam: o armazenamento atual no reservatório e os prováveis influxos esperados para o reservatório (BHATIA *et al.*, 2018).

Para minimizar os efeitos dos conflitos gerados pelas múltiplas necessidades dos usuários utiliza-se a metodologia da Alocação Negociada de Água que, de acordo com a Resolução ANA nº 1938/2017, em seu artigo 2º, é o conjunto de regras para o uso de recursos hídricos durante o ano hidrológico, estabelecido pela ANA, podendo ser realizadas reuniões públicas, à critério da ANA, em articulação com os Comitês de Bacia Hidrográficas (ANA, 2017).

Segundo Roa-García (2014), a alocação de água configura-se como uma tomada de decisão no gerenciamento de recursos hídricos e se refere às regras e aos procedimentos por meio dos quais é decidida se a distribuição da água é para uso individual ou coletivo, em relação à sua disponibilidade.

2.2.1. Transferência de água entre bacias hidrográficas como medida para mitigar conflitos pela água

Os projetos de transferência de água entre bacias hidrográficas são geralmente considerados como uma das alternativas de abastecimento de água nos casos onde o aumento das demandas excede a capacidade de regularização dos reservatórios. Isto é, proporciona a melhoria do aproveitamento de água a partir da realocação artificial para mitigar a distribuição desigual dos recursos hídricos. Porém, também podem ser complicados em termos legais, uma vez que os direitos sobre a água são afetados e diferentes partes interessadas com interesses conflitantes estão envolvidos. Esses fatos destacam a importância do desenvolvimento e avaliação de abordagens de alocação de água entre bacias (SADEGH; MAHJOURI; KERACHIAN, 2010).

Quanto à transferência de água entre bacias hidrográficas, são variados os estudos existentes na área de operação de reservatórios, abordando diversas situações. Podem ser analisados a operação com múltiplos reservatórios (GU *et al.*, 2017), apenas o reservatório doador isoladamente (TU; HSU; YEH, 2003), podem ser observados tanto o doador quanto o receptor (PENG *et al.*, 2015; ZENG *et al.*, 2014), e também analisar a quantidade de água desviada de um reservatório ao outro (ZHU *et al.*, 2014).

Vários projetos de transferência entre bacias foram implementados em todo o mundo, com mais de 160 concluídos (WU *et al.*, 2019). No Nordeste brasileiro, destaca-se o Eixão das Águas e o Canal do Trabalhador no Ceará, implementados para transpor água da bacia do rio Jaguaribe para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF); além do canal da Redenção na Paraíba, que transfere água do açude Mãe D'água, em Coremas para as Várzeas de Sousa (SILVA; SOUZA; AQUINO, 2015). Outro projeto que merece destaque é o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), que se configura como a maior obra em recursos hídricos do Brasil (BRASIL, 2004). Ele propõe beneficiar cerca de 12 milhões de habitantes, estabelecendo a interligação da bacia hidrográfica do Rio São Francisco com quatro bacias (Jaguaribe, Apodi, Piranhas-Açu e Paraíba) do Nordeste Setentrional (estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco).

A operação de um reservatório deve ser pensada e executada de modo a alcançar a conciliação entre a oferta e a demanda por água, prevenindo ou atenuando possíveis conflitos (NUNES; GALVÃO; RÊGO, 2016). Em geral, a escassez de água é responsável pelo aumento dos conflitos de água em diversos países do mundo, o que dificulta o abastecimento populacional e resulta em disputas políticas. Mas a abundância dos recursos hídricos também gera conflitos, muitas vezes ainda mais agudos que os que ocorrem em situações de falta de água (RIBEIRO; SANTOS; SILVA, 2019).

No Ceará, durante o século XX, ocorreram diversos conflitos de água entre os quais se podem citar os relatados por Pinheiro (2002): 1. na década de 1920, o dos rios Pacoti e Acarape, com a construção de uma adutora para Fortaleza, retirando parte das águas que eram usadas por plantadores de cana-de-açúcar; 2. o do sistema Orós-Lima Campos, na década de 1990, em disputa pelas águas armazenadas no açude Orós e da derivação para os usuários do açude Lima Campos; e 3. o da transferência de águas da bacia do rio Jaguaribe para Fortaleza, na seca de 1993.

Em se tratando do sistema Orós-Lima Campos, sabe-se que o açude Orós foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) entre 1960 e 1962 com o objetivo de perenizar o rio Jaguaribe e prover disponibilidades de águas para a irrigação do médio e baixo Jaguaribe, da Planície de Icó e ainda propiciar o desenvolvimento da piscicultura e outras atividades baseadas em recursos hídricos. A construção do açude Orós e do túnel Orós-Lima Campos geraram um potencial hidráulico capaz de permitir o aproveitamento hidroagrícola desses solos (FURTADO; CAMPOS, 1997).

2.3. Evaporação em superfície de água livre

O ciclo hidrológico da Terra liga as interações entre a atmosfera, a litosfera, a biosfera e a antroposfera, que ocorre por meio da conversão do balanço de radiação em calor sensível, latente e calor armazenado (TRENBERTH; FASULLO; KIEHL, 2009) e também é profundamente afetado pelas atividades humanas e pelo desenvolvimento socioeconômico (YANG; YANG; XIA, 2021). Portanto, obter uma melhor compreensão do ciclo hidrológico e dos recursos hídricos tornou-se uma preocupação fundamental para a pesquisa de recursos ambientais e naturais (BRAGA *et al.*, 2014; XIA *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2010).

A evaporação é um fenômeno físico que consiste no processo natural de passagem das moléculas de água, de uma superfície livre (líquida) ou de uma superfície úmida, em forma de vapor para a atmosfera. De acordo com Mesquita e Lima Neto (2020), quando a quantidade de moléculas que deixam a superfície é superior as que retornam, ocorre o processo de evaporação.

Mendiondo e Tucci (1997) afirmam que o ciclo hidrológico é fechado em escala global, existindo sub-ciclos para a escala regional. Na região Nordeste, devido ao alto índice de radiação solar, temperatura elevada e baixa umidade relativa, possui níveis de evaporação de superfícies livres mais elevados quando comparados com outras regiões (MEDEIROS, 2019). Segundo Agência Nacional de Águas - ANA (2019), no cenário estadual, o Ceará se enquadra entre os estados com maior consumo de água por efeito de evaporação líquida (superior a 2.000 mm/ano), ocorrendo principalmente em reservatórios artificiais de grande porte para geração hidrelétrica ou para usos múltiplos, em especial para abastecimento público.

Para o gerenciamento de recursos hídricos, o processo de evaporação é considerado como “perda” pelo significativo volume de água que passa para a atmosfera, sendo importante sua obtenção tanto na fase de elaboração do projeto quanto no decorrer do período de operação do reservatório (DIAS; KELMAN, 1987).

As análises das perdas hídricas por evaporação são de total importância no estudo das vazões máximas para a alocação nos reservatórios. Sendo assim, o monitoramento das taxas evaporativas em obras de acumulação hídrica torna-se fundamental para a conservação da qualidade e quantidade de água nas suas diversas aplicações: abastecimento humano, geração de energia, pecuária, agricultura e indústria (PEREIRA, S. B, *et al.*, 2009; VIEIRA, 2015)

No decorrer do processo de evaporação, à medida em que o ar circunvizinho vai se tornando saturado, caso não ocorra sua substituição por ar mais seco, o processo pode ser interrompido. A remoção desse ar úmido para a atmosfera depende também da velocidade do vento. Portanto, a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento são

parâmetros climatológicos a serem considerados no processo de evaporação (ALLEN *et al.*, 1998).

Goldbach e Kuttler (2015) afirmam que é difícil fazer uma avaliação quantitativa do desempenho da evaporação de corpos d'água parados (lagos, reservatórios e pântanos), pois vários fatores determinam processos de troca entre a superfície da água e a atmosfera próxima à superfície, estes incluem disponibilidade de dados, condições meteorológicas, turbidez da água e dimensões do corpo hídrico - tamanho, geometria e profundidade (JENSEN; ALLEN, 2016).

2.4. O fenômeno da evapotranspiração

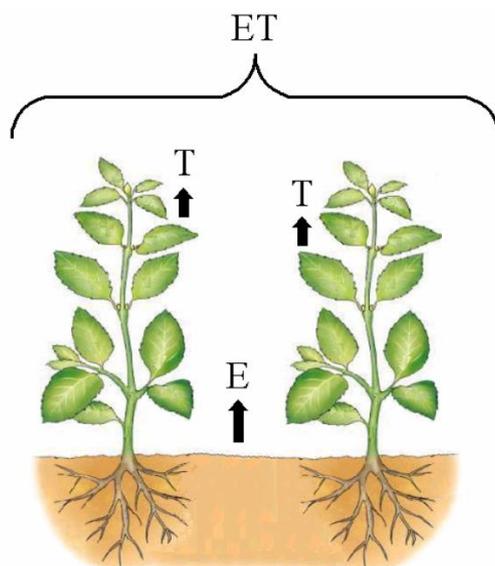
Além do fenômeno da evaporação, há também as perdas por transpiração, decorridas da ação fisiológica dos vegetais, onde a planta expelle a quantidade de água excedente por meio de suas folhas, principal superfície de contato entre ele e o ambiente externo. Considerando-se que, em geral, é difícil separar os processos de evaporação e transpiração, estes são reunidos e tratados como se fossem um único processo, chamado evapotranspiração (evaporação + transpiração), dependente de dois processos distintos, mas que ocorrem simultaneamente na superfície terrestre (SILVA *et al.*, 2005).

A evaporação e evapotranspiração ocorrem quando a água líquida é convertida para vapor de água e transferida para a atmosfera. O processo somente poderá ocorrer naturalmente se houver ingresso de energia no sistema, proveniente do sol, da atmosfera, e será controlado pela taxa de energia, na forma de vapor de água que se propaga da superfície da Terra (TUCCI, 1997).

A evapotranspiração tem influência de inúmeras variáveis, como o tipo de solo, tipo de vegetação, altitude, temperatura, radiação, ventos, umidade, entre outras, por isso a determinação de seu valor é tão complexa. Seu conhecimento é de extrema relevância na engenharia, devido às perdas de água que ocorrem em reservatórios e canais de abastecimento e a interferência direta na análise da disponibilidade hídrica dos sistemas.

O diagrama elaborado por Allen *et al.* (1998), apresentado na Figura 1, retrata o fenômeno da evapotranspiração. Considera-se então a evapotranspiração como a perda de água por evaporação do solo e transpiração da planta (TUCCI, 1997).

Figura 1 - Diagrama de Evapotranspiração.



Fonte: Allen *et al.* (1998)

2.4.1. Evapotranspiração Potencial (ETP)

As primeiras pesquisas com contribuições relevantes para a evapotranspiração, agricultura, climatologia e hidrologia foram realizadas por: Penman (1947), que publicou o artigo “*Natural Evaporation from Open Water, Bare Soils and Grass*”; e Thornthwaite (1948), com o trabalho “*An Approach Towards a Rational Classification of Climate*”.

O termo evapotranspiração potencial foi definido por Thornthwaite (1946), sendo conceituada como a transferência de água do sistema solo-plantas para a atmosfera, sob condições padronizadas, ou seja, área coberta por vegetação em crescimento ativo com altura uniforme e índice de área foliar (IAF) elevado, teor de água no solo mantido próximo ou na capacidade de campo. De acordo com Coelho Filho *et al.* (2011), em 1956, Penman estabeleceu que a grama deveria ser a vegetação adotada como padrão, pois além de suas características, a grama é utilizada também como cobertura do solo em estações meteorológicas.

Assim como a precipitação pluvial, a evapotranspiração potencial é um elemento meteorológico, representando a chuva necessária para não faltar ou sobrar água no solo. Por meio do balanço entre esses dois elementos pode-se caracterizar a umidade do clima e estimar a umidade disponível no solo pelo balanço hídrico climático (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). A ETP se difere da evaporação do ar obtida pelo evaporímetro de Pichè, cujos dados não são expressos em milímetros pluviométricos, não representando as condições naturais de superfície exposta como a ETP, portanto, não podem ser utilizados no balanço hídrico

climatológico. A evapotranspiração potencial ocorre quando há maior disponibilidade de energia solar, enquanto que a evaporação de Pichè tem seu pico na estação seca (CAMARGO; CAMARGO, 2000).

2.4.2. Evapotranspiração de referência (ET_o)

A definição da evapotranspiração de referência como sendo a que ocorre em uma área gramada, com altura de 0,08 m a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrições hídricas foi introduzida por Doorenbos e Pruitt (1977). Este conceito de evapotranspiração de referência (ET_o) passou a substituir a evapotranspiração potencial (ETP) em 1990, após a *Food and Agriculture Organization* (FAO) realizar uma conferência na Itália com o objetivo de definir uma nova cultura de referência e um novo método de estimativa da evapotranspiração (PEREIRA, D.R, *et al.*, 2009).

Allen *et al.* (1998) propuseram um novo conceito para a cultura de referência: a evapotranspiração é promovida por uma cultura hipotética que cobre todo o solo, em crescimento ativo, com altura média de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência ao transporte de vapor de 70 s/m.

Além da FAO promover a substituição do termo ETP por ET_o, segundo Sousa *et al.* (2010), visando uma padronização do cálculo da ET_o, a FAO propôs o método de Penman-Monteith, com base em estudos de uma comissão de especialista em 1991, como modelo padrão para quantificar a demanda atmosférica de evapotranspiração.

Oliveira (1997) utilizou várias equações com dados medidos de lisímetro de pesagem no município de Paraipaba, localizado no Ceará, e identificou que Penman-Monteith é o modelo que melhor estima dados medidos em campo.

2.5. Modelos para estimativa da Evapotranspiração

A Evapotranspiração (ET) pode ser medida diretamente por técnicas experimentais ou indiretamente por meio de modelos matemáticos. Praticamente, os principais métodos clássicos para medição de ET_o só podem ser obtidos em escala de campo (razão de Bowen, sistema de correlação de vórtices, balanço hídrico do solo) (TAO *et al.*, 2018). No entanto, certas limitações restringem a aplicação desses métodos, tais como complexidade, custo de implementação ou até mesmo a indisponibilidade em muitas regiões.

Zhao *et al.* (2013) afirmam que métodos de sensoriamento remoto, que vem sendo desenvolvidos recentemente, também podem ser usados para estimar a evapotranspiração em escala de bacia, porém devido às limitações tecnológicas, essa estimativa é difícil de atender aos requisitos de escala de tempo, geralmente sendo instantânea, além de ser suscetível a condições externas, portanto sua precisão não é alta.

Portanto, o desenvolvimento de modelos matemáticos para estimativa de ET é altamente necessário e geralmente tem como base a evapotranspiração de referência (ET_o). Vale ressaltar que os modelos matemáticos também apresentam dificuldades de medição, pois dependem da interação de vários fatores climáticos, incluindo temperatura, velocidade do vento, umidade e radiação (TAO *et al.*, 2018).

Para estimar a ET_o, muitas pesquisas foram realizadas em todo o mundo, e um número significativo de fórmulas foi destacado, mas a comparação de seus resultados revela uma grande divergência que pode chegar a até 50% de avaliação durante a mesma década (SMADHI, 2000; LU *et al.* 2005).

2.5.1. Evolução da modelagem da estimativa de Evapotranspiração

Existem evidências claras de que os grandes filósofos dos séculos XVI e XVII ponderaram vários aspectos do problema da evaporação. Entretanto, um trabalho de Dalton (1802), intitulado “*Experimental Enquiry into the Proportion of Several Gases or Elastic Fluids Constituting the Atmosphere*”, tornou-se o ponto de partida para essa área de estudos. Sua teoria afirma que a evaporação é produto dos efeitos combinados do vento, umidade da atmosfera e das características físicas da superfície. As pesquisas sobre evaporação baseada em medições e experimentações só vieram a contribuir com os estudos na área de evapotranspiração em meados do século XIX.

A fórmula apresentada por Thornthwaite e Wilm (1944), para o cálculo da evapotranspiração potencial envolvia a temperatura média, comprimento do dia e umidade relativa do ar. Após aprimorar a equação, foi retirado a covariável umidade relativa, permanecendo apenas temperatura média do ar e comprimento do dia. Para facilitar a resolução de sua equação, Thornthwaite (1948) desenvolveu um nomograma especial, e posteriormente algumas tabelas foram desenvolvidas para uma maior praticidade nos cálculos (THORNTHWAITE; MATHER, 1957).

Penman (1948) publicou seus primeiros trabalhos com evaporação natural na década de 40. Posteriormente, adotou a expressão evaporação potencial, a qual considerava mais

apropriada que evapotranspiração potencial (PENMAN, 1950, 1952). Para estimar a evaporação potencial em superfície natural de água, utilizou o déficit de saturação do ar ($e_a - e_d$), no termo aerodinâmico da equação geral. Já para a estimativa em superfície gramada, propôs um fator de redução, variando de 0,6 a 0,8 ao longo do ano e de região para região. Penman (1952) propõe também uma adaptação da equação para obter diretamente a transpiração potencial em gramado.

Sanderson (1948) realizou valiosa contribuição para avaliar a equação de Thornthwaite, aplicada em regiões frias e até glaciais, com a preparação de numerosos balanços hídricos que cobriram basicamente todo o território canadense. A autora realizou a comparação dos excedentes hídricos obtidos em numerosos balanços com os dados correspondentes de escoamentos verificados em bacias hidrográficas. Os resultados mostraram alta correlação entre os excedentes dos balanços e a drenagem das bacias. O bom desempenho da equação de Thornthwaite nas condições de clima frio e úmido do Canadá, foi evidenciado pelo elevado índice de confiança (0,95) (SANDERSON, 1948). Além dessas contribuições, Sanderson (1948) ainda preparou cartas de isolinhas anuais da evapotranspiração potencial, das deficiências e dos excedentes hídricos, bem como da classificação climática de Thornthwaite para o Canadá.

Mais tarde, na década de 1960, Monteith, com base no método de Penman, propôs um novo método que estimava diretamente a Evapotranspiração de cultura (ET_c), denominando-o de Penman-Monteith, e Doorenbos & Pruitt (1977) introduziram o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o), em substituição ao termo ET_p (CARVALHO *et al.*, 2011).

Camargo (1971), baseado em resultados obtidos pelo método de Thornthwaite, propôs um novo método, mais simples e com eficiência semelhante. O modelo apresentado por Camargo é uma simplificação do método de Thornthwaite, utiliza apenas dados de temperatura média e radiação solar e foi desenvolvido por meio de uma equação analítica para o cálculo da evapotranspiração, sendo aplicável a qualquer condição climática com eficiência (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Uma aproximação empírica da equação de Penman combinada é feita por Priestley e Taylor (1972) para eliminar a necessidade de outros dados de entrada climatológicos.

Hargreaves (1974), em sua primeira equação para estimar a evapotranspiração potencial, utilizou dados de temperatura, umidade relativa e latitude. Em um outro estudo, o mesmo autor apresentou nova equação simplificada, na qual foi suprimida a umidade relativa e introduzida a radiação global.

Atualmente, o modelo Penman-Monteith FAO-56 é recomendado como único método padrão para estimar ETo e validar outros modelos (Allen *et al.*, 1998), o seu cálculo requer uma série de variáveis meteorológicas, incluindo temperatura máxima e mínima da radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. A FAO (*Food and Agriculture Organization*) recomenda esse método porque resulta em valores bem realistas, apesar de que esta abordagem exige um grande número de parâmetros meteorológicos que normalmente não estão disponíveis na maioria das estações de monitoramento.

O método de Penman-Monteith é alimentado por muitas variáveis climáticas observadas em estações meteorológicas de superfície, como a temperatura do ar, saldo de radiação e umidade do ar e velocidade do vento. Entretanto, em muitas localidades, essas variáveis não estão disponíveis nos postos meteorológicos, fazendo-se necessário o emprego de métodos mais simples, com menor requerimento de dados (BACK, 2008).

2.5.2. Método Penman-Monteith

O procedimento de cálculo da evapotranspiração pelo método Penman-Monteith FAO-56, é recomendado pela *Food and Agriculture Organization* devido a sua precisão. Foi proposto por Allen *et al.* (1998) e está descrito na Equação 1 a seguir:

$$ET_{oPMF} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 293} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \quad (1)$$

em que:

- “ Δ ” é a declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura (kPa°C⁻¹);
- “ R_n ” é o saldo de radiação diário (MJm⁻² dia⁻¹);
- “ G ” é o fluxo total diário de calor no solo (MJm⁻² dia⁻¹);
- “ γ ” é o coeficiente psicrométrico (kPa°C⁻¹);
- “ u_2 ” é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹);
- “ e_s ” é a pressão de saturação de vapor (kPa);
- “ e_a ” é a pressão atual de vapor (kPa);
- “ T ” é a temperatura média do ar (°C).

Quando os valores de “ R_n ”, “ G ”, “ u_2 ” e “ T ” são medidos na estação meteorológica necessita-se calcular os valores de “ Δ ”, “ γ ”, “ e_s ” e “ e_a ”.

O valor de “ Δ ” é calculado pela Equação 2:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T}{T+273,3}\right) \right]}{(T+237,3)^2}, \quad (2)$$

em que "exp" refere-se à base do logaritmo natural "e" (2,71828) elevada ao valor que está entre parênteses.

O coeficiente " γ " é calculado empregando-se a Equação 3:

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^3 \cdot Patm, \quad (3)$$

em que "Patm" é a pressão atmosférica local (kPa) que, por sua vez, pode ser calculada pela Equação 4, com base na altitude do local (z):

$$Patm = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26} \quad (4)$$

A diferença entre " e_s " e " e_a " é denominado déficit de saturação. Esses valores podem ser calculados utilizando-se as Equações 5 e 6:

$$e_s = 0,6108 \exp\left[\frac{17,27 T}{T+273,3}\right] \quad (5)$$

$$e_a = \frac{e_s \cdot UR}{100}, \quad (6)$$

onde UR é a umidade relativa média do ar (%), que também é medida pela estação meteorológica.

Poucas estações meteorológicas dispõem de sensores para a determinação de "Rn". Por isso, é comum a estimativa de "Rn" com base em outras variáveis. O saldo de radiação (Rn) pode, assim, ser estimado pela Equação 7:

$$Rn = Rns - Rnl \quad (7)$$

em que "Rns" é o saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e "Rnl" é o saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O Cálculo do saldo de radiação de ondas curtas (Rns) é feito pela Equação 8:

$$Rns = (1-\alpha)Rs \quad (8)$$

onde "Rs" é a radiação solar incidente ($\text{MJm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), medida na estação meteorológica, e " α " é o coeficiente de reflexão (albedo), sendo considerado igual a 0,23 para a cultura de referência (grama), conforme proposta por Allen *et al.* (1998).

O cálculo do saldo de radiação de ondas longas (Rnl) é realizado pela Equação 9:

$$Rnl = \sigma \left[\frac{(T_{max}+273,16)^4 + (T_{min}+273,16)^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{Rs}{R_{SO}} - 0,35 \right) \quad (9)$$

em que:

- " σ " é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
- "Tmax" e "Tmin" são, respectivamente, a temperatura máxima e mínima do dia ($^{\circ}\text{C}$);

- "Rs" é a radiação solar incidente ($\text{MJm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
- "Rso" é a radiação solar incidente na ausência de nuvens ($\text{MJm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
- "ea" é a pressão atual de vapor (kPa), calculada pela Equação 6.

O valor de "Rso" pode ser calculado pela Equação 10:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a \quad (10)$$

em que "z" é a altitude (m) e "Ra" é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), calculada pela Equação 11:

$$R_a = \frac{118,08}{\pi} dr [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \text{cos}(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (11)$$

O valor de " φ " representa a latitude do local em radianos. Para converter graus para radianos multiplica-se por " π " (3,14159) e divide-se por 180.

A Equação 12 é utilizada para calcular a distância inversa relativa entre a Terra e o Sol "dr" (rad):

$$dr = 1 + 0,033 \text{cos} \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (12)$$

sendo "J" o dia do ano (de 1 a 365 ou 366, para bissexto).

A declinação solar " δ " (rad) é dada pela Equação 13:

$$\delta = 0,409 \text{sen} \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (13)$$

O ângulo horário ao nascer do sol " ω_s " (rad) pode ser obtido com o uso da Equação 14, a seguir:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan \left[\frac{-\tan(\varphi)\tan(\delta)}{X^{0,5}} \right], \quad (14)$$

em que $X = (1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2)$. Quando X for ≤ 0 , utiliza-se um valor igual a 0,00001.

Poucas estações meteorológicas possuem registros do fluxo de calor no solo (G). Entretanto, Allen *et al.* (1998) afirmam que se pode considerá-lo como sendo igual a zero, quando não houver medições disponíveis, devido aos baixos valores de "G" normalmente registrados em escala diária. Nos casos em que não há valores medidos nas estações meteorológicas para a radiação solar incidente (Rs), pressão atual de vapor (e_a) e velocidade do vento (u_2), o roteiro de cálculo proposto por Allen *et al.* (1998) traz equações para a estimativa dessas variáveis.

2.5.3. Método Hargreaves

Dentre os métodos que utilizam dados de temperatura, o de Hargreaves (1974) se destaca pela larga utilização em projetos de irrigação no Nordeste Brasileiro. Tal aceitação se deve ao fato do autor, em estudo financiado pelo então Ministério da Agricultura, ter estimado a evapotranspiração potencial em 152 localidades, em 10 estados nordestinos, e os resultados encontrarem-se facilmente disponíveis em tabelas (STUDART; CAMPOS, 1999).

O Método de Hargreaves para o cálculo da Evapotranspiração Potencial é de fácil utilização, pois fornece a ETP em função da temperatura média compensada, da umidade relativa do ar e de um coeficiente de correção que depende da latitude do local considerado (STUDART; CAMPOS, 1999). A Tabela do Fator de correção dependente da latitude (F) (HARGREAVES, 1974), para o método de Hargreaves, encontra-se no Anexo 1.

O cálculo é feito conforme Equação 15:

$$ETP = F(100 - UR)^{\frac{1}{2}}0,158(32 + 1,8T_{comp}) \quad (15)$$

onde,

- F = Fator dependente da latitude (adimensional);
- T_{comp} = Temperatura média compensada em °C;
- UR = Umidade relativa do ar (%).

A temperatura média compensada é obtida por ponderação entre as temperaturas observadas nas estações meteorológicas T_{12} e T_{24} TMG (Tempo Médio de Greenwich), T_{max} e T_{min} do dia, pela Equação 16, estabelecida pela OMM (Organização Meteorológica Mundial):

$$T_{comp} = \frac{T_{12} + 2T_{24} + T_{max} + T_{min}}{5} \quad (16)$$

onde,

- T_{12} - Temperatura observada às 12:00 TMG;
- T_{24} - Temperatura observada às 24:00 TMG;
- T_{max} - Temperatura máxima do dia;
- T_{min} - Temperatura mínima do dia.

2.6. Estimativa das perdas por evaporação para pequenos açudes

Para o gerenciamento de recursos hídricos e eficaz operação dos reservatórios superficiais é necessário que se conheça o rebaixamento do nível da água decorrente das

diversas perdas. Molle e Cadier (1992) propuseram três métodos para determinação das perdas por evaporação e infiltração (EVINF) durante o período de utilização de pequenos açudes.

O primeiro método permite avaliar a partir da observação do rebaixamento do nível do açude durante alguns dias em que não há precipitação. O segundo método propõe uma estimativa da evaporação (EVA) baseada em dados de tanque classe A ou valores da ETP. As infiltrações são avaliadas a partir da observação do local e das informações fornecidas pelo proprietário. O terceiro método permite apenas escolher valores médios de maneira a poder fazer cálculos rápidos e aproximativos. A Figura 2, a seguir, apresenta um resumo de como é feito cada um dos métodos:

Figura 2 – Métodos para determinação do rebaixamento natural do Açude



Fonte: Adaptado de Molle e Cadier (1992).

Levando em consideração as dificuldades encontradas no gerenciamento e na frequência de monitoramento dos recursos hídricos, o segundo método torna-se mais viável em relação aos demais, pois é determinado a partir de valores tabelados e/ou medidos por estações meteorológicas.

Considerando então a impossibilidade de realizar uma observação do rebaixamento “natural” do nível da água, pode-se estimar a evaporação a partir dos valores de referência da evaporação do Tanque classe A ou da Evapotranspiração potencial (ETP). Para esse fim, deve-se escolher uma estação próxima ao local estudado, ou caso todas as estações apresentadas se encontram distantes, escolhe-se entre elas alguma em que as condições climáticas sejam

semelhantes e calcula-se a soma dos valores de evaporação correspondentes ao período para o qual se deseja avaliar o rebaixamento do açude (MOLLE; CADIER, 1992).

O método proposto por Molle e Cadier (1992) para a estimativa do rebaixamento natural (EVINF), que considera as perdas por evaporação e infiltração, é calculado pela Equação 17:

$$EVINF = C_1 * C_2 * 1,65 * ETP \quad (17)$$

onde,

- C_1 - correção pelo tamanho do açude;
- C_2 - correção para levar em conta as infiltrações;
- ETP - evapotranspiração potencial.

O fator multiplicativo de correção (1,65) deve utilizado pois a ETP é bem inferior à evaporação do tanque classe A. O valor de C_1 é selecionado pela Tabela 1, em função do tamanho do espelho d'água e da situação do açude.

Tabela 1 - Coeficiente C_1 de correção pelo tamanho do espelho d'água.

Situação	Coeficiente C_1				
	Superfície do espelho d'água (hectares)				
	0-5	5-10	10-20	20-50	>50
Normal	0,9	0,85	0,80	0,75	0,70
Bem Protegida	0,81	0,77	0,72	0,68	0,63

Fonte: Molle e Cadier (1992)

O rebaixamento resultante das infiltrações (INF) é levado em conta multiplicando-se o rebaixamento devido à evaporação pelo coeficiente C_2 . Esse coeficiente pode variar de acordo com a classe que o reservatório se enquadra:

- Classe 1 - açudes de pouca infiltração ($C_2 = 1,10$);
- Classe 2 - açudes de infiltração média ($C_2 = 1,25$);
- Classe 3 - açudes de infiltração alta ($C_2 = 1,63$);

As infiltrações dos açudes de maior porte, mesmo sendo importantes em termos de volume, terão consequências menos visíveis sobre o esvaziamento do reservatório (MOLLE; CADIER, 1992).

A presença de vegetação aquática, a quantidade de material em suspensão e a salubridade da água são outros fatores que também podem influenciar no perfil de evaporação

do reservatório. Entretanto, Molle e Cadier (1992) não propõem a correção desses, pois o efeito é irrelevante. Salvo em casos específicos nos quais se julgue que o efeito é particularmente relevante.

2.7. Preenchimento de falhas de dados meteorológicos

Um dos grandes problemas que surgem ao se trabalhar com dados medidos em estações meteorológicas é a quantidade de falhas (períodos sem medição) encontradas nos bancos de dados. As falhas pluviométricas e hidrológicas podem ocorrer devido a problemas técnicos/operacionais, como ausência do observador, falhas instrumentais, quebra na linha de comunicação ou localização geográfica, por exemplo, que podem levar a interpretações incorretas se não forem corrigidas (CORREA *et al.*, 2021).

Bier e Ferraz (2017) relatam que a rede de estações meteorológicas no Brasil é muito recente, possuindo poucas estações no país com mais de 100 anos de dados. Para mais, muitas das séries oriundas destas estações apresentam falhas, seja por falta de medição ou por falha nos equipamentos, no caso das estações automáticas.

Segundo Correa *et al.* (2021), a presença de muitas falhas na série climatológica interfere nos resultados encontrados, gerando problemas de interpretação nos dados. Assim, é importante a utilização de metodologias que sejam capazes de estimar valores que correspondam aos demais valores presentes nas séries meteorológicas de interesse. Dessa forma, para trabalhar com séries contínuas, torna-se necessário que essas falhas sejam preenchidas (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Os dados meteorológicos possuem diversas características diferentes entre si e, como consequência, métodos de preenchimento de falhas podem ter desempenhos variados dependendo do cenário encontrado (ZENERE *et al.*, 2020).

Os recentes avanços computacionais impulsionaram o desenvolvimento de técnicas de análise e otimização com grande aplicabilidade, inclusive no estudo de fenômenos hidrológicos (MACHIWAL; JHA, 2012). Em Correia *et al.* (2016) é descrito o uso de redes neurais artificiais no preenchimento de falhas em séries de precipitação mensal. No trabalho de Mello, Kohls e Oliveira (2017) são utilizados métodos estatísticos para preencher falhas em estações pluviométricas. Cunha Júnior e Firmino (2022) compararam diferentes métodos de preenchimento de falhas em séries mensais de precipitação da região do Cariri-CE. Sabino e Souza (2023) introduziram o programa GapMET, desenvolvido pelos autores, para avaliar a

precisão de seus seis métodos de preenchimento de dados nas principais variáveis meteorológicas.

Como visto nos trabalhos citados, diferentes métodos podem ser aplicados na imputação de dados faltantes em séries de dados. Desse modo há uma dificuldade para avaliar qual método comporta-se melhor em determinadas variáveis meteorológicas.

O pacote *imputeTestbench*, da linguagem R (TEAM, 2023), é uma ferramenta que fornece uma bancada de teste para comparar a precisão da previsão de diferentes métodos relacionados à quantidade e ao tipo de dados ausentes para um conjunto de dados fornecido pelo usuário (BECK *et al.*, 2018). Além dos métodos padrões de imputação existentes no pacote, ele permite que os usuários incluam metodologias adicionais para comparação.

Uma outra ferramenta importante é o pacote *imputeTS*, do R, que inclui várias funções de imputação e é dedicado para séries temporais univariadas (MORITZ; BARTZ-BEIELSTEIN, 2017). Dentre estas funções, destacam-se as mais adequadas para o preenchimento de séries de dados estocásticos:

- *na_interpolation()* – que usa interpolação linear, spline ou stineman para substituir valores ausentes;
- *na_ma()* – faz a substituição de valores faltantes por média móvel ponderada, usando um tamanho de janela semi-adaptável para garantir que todos os NAs sejam substituídos;
- *na_mean()* – utiliza valores médios, mediana ou moda para substituir valores faltantes;
- *na_seadec()* – remove o componente sazonal da série temporal, realiza a imputação na série dessazonalizada e posteriormente adiciona novamente o componente sazonal;
- *na_seasplit()* – divide as séries temporais em estações e depois realiza a imputação separadamente para cada um dos conjuntos de dados de séries temporais resultantes.

2.8. Correlação linear entre variáveis

Entender as relações existentes entre as variáveis é importante para definir a melhor forma de se trabalhar com os dados. Navidi (2019) define o coeficiente de correlação como uma medida numérica da força da relação linear entre duas variáveis.

O sentido e a intensidade da relação/associação linear existente entre as variáveis quantitativas podem ser avaliados através do coeficiente de correlação linear de Pearson, também designado por “coeficiente de correlação produto-momento” ou simplesmente por “ ρ de Pearson”, o qual é adequado à avaliação de relações lineares (SOUSA, 2019). No entanto, existem situações em que o relacionamento entre duas variáveis não é linear, ou uma delas não é contínua ou as observações não são selecionadas aleatoriamente. Nestes casos, outras alternativas de coeficientes deverão ser aplicadas (GUIMARÃES, 2017).

O coeficiente de correlação de Person sempre assume valores entre -1 e +1 e não depende das unidades de medida das variáveis, o que facilita a sua interpretação. O coeficiente de correlação assume valor absoluto igual a 1 somente quando os pontos do gráfico de dispersão estão exatamente sobre uma linha reta de inclinação, ou seja, quando há uma relação linear perfeita (NAVIDI, 2019). O valor zero indica a inexistência de uma relação linear entre as duas variáveis. O sinal indica o sentido da relação entre as duas variáveis. Quando positivo, indica que as duas variáveis variam no mesmo sentido, enquanto um sinal negativo indica que as variáveis variam em sentido contrário (SOUSA, 2019). Esse coeficiente pode ser obtido pela Equação 18.

$$\rho = \frac{COV(X_1X_2)}{\sigma_1\sigma_2} \quad (18)$$

Em que:

- x_i - variáveis em análise;
- cov - covariância;
- σ_i - desvio padrão.

Souza (2019), ressalta que o fato de existir uma correlação entre duas variáveis na amostra não significa necessariamente que haja correlação na população, por este motivo é pertinente a realização do teste de significância associado a um coeficiente de correlação. Teste-se a hipótese nula (H_0) de não haver correlação entre as duas variáveis na população, e sempre que esta hipótese nula ou inicial é rejeitada, a hipótese alternativa (H_1) é indicativa de que há uma correlação, estatisticamente significativa, entre as duas variáveis na população.

3. METODOLOGIA

Nesta seção são apresentadas as etapas necessárias para o desenvolvimento de uma metodologia de estimativa da evaporação de reservatórios superficiais. Esse dado é utilizado para realizar a simulação de esvaziamento de reservatórios como base para alocação negociada de água. A presente seção é dividida em três tópicos principais: apresentação da natureza do trabalho, a delimitação da área de estudo e, por último, o passo a passo metodológico.

3.1. Natureza do trabalho

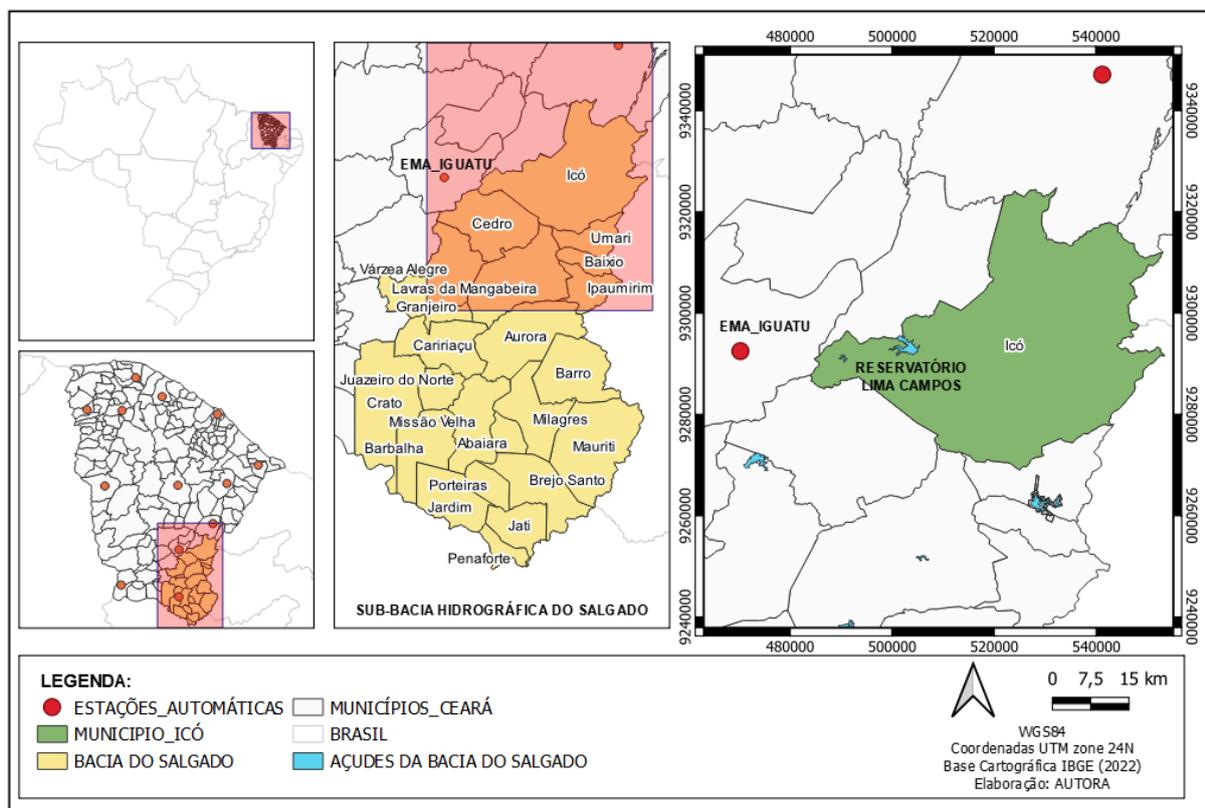
O presente trabalho classifica-se como de natureza operacional e estudo de caso, já que objetiva analisar uma hipótese específica a partir da utilização de modelo estatístico computacional, aplicando ao local de estudo, no Reservatório Lima Campos, que integra a Bacia do Salgado (FAVERO; BELFIORE, 2013), Ceará-Brasil. Segundo Malhotra (2001), a abordagem utilizada possui caráter quantitativo, já que está centrado na objetividade e os fatos são apresentados por meio de linguagem matemática. Por fim, quanto aos objetivos, classifica-se como descritivo-explicativo. Essas pesquisas, normalmente de caráter quantitativo, buscam a identificação e descrição de características de fenômenos e estabelecer formas de testar proposições e relações causais entre variáveis dependentes e independentes (GIL, 2017).

3.2. Área em Estudo

O Açude Lima Campos é um reservatório localizado na região Centro-Sul do estado do Ceará ($6^{\circ} 24' 6,90''$ S e $38^{\circ} 57' 24,02''$ W), distrito de Lima Campos, na cidade de Icó-CE. Ele integra a bacia dos Salgado, que é uma das principais bacias hidrográficas do estado, e faz parte do conjunto dos 15 reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) nessa bacia.

Na Figura 3, é possível identificar onde localiza-se o açude escolhido, juntamente com a Estação Meteorológica Automática (EMA) de coleta dos dados mais próxima do local de estudo.

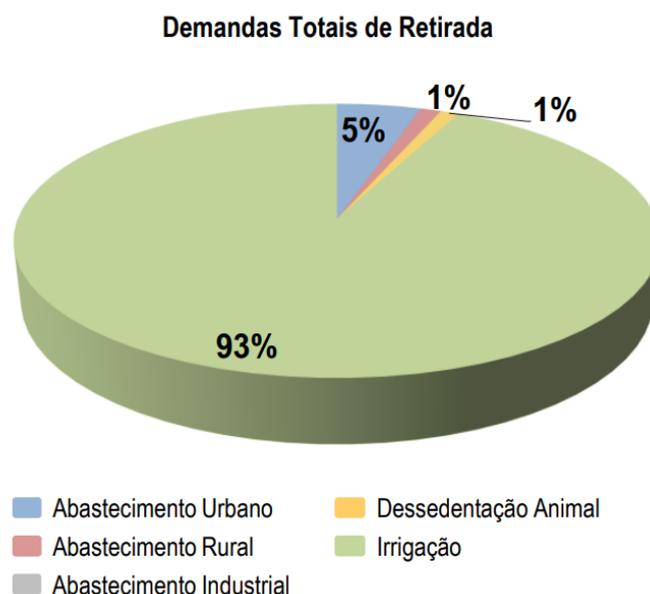
Figura 3 - Mapa de Localização da Área de Estudo, contendo a localização do Reservatório Lima Campos e da Estação Meteorológica Automática utilizada para coleta de dados.



Fonte: Elaborado pela autora.

O reservatório Lima Campos foi construído pelo DNOCS em 1932, possui capacidade de acumular 51,17 milhões de metros cúbicos. O açude capta as águas do rio São João e possui uma bacia de drenagem com área igual a 361,47 km² (HIDRO, 2023). A bacia hidráulica do reservatório em sua cota de sangria tem uma área de 1500 hectares, propiciando um excelente potencial para aproveitamento de áreas de vazante dentro da política praticada pelo DNOCS. Atualmente, o reservatório é utilizado pela população para diversas finalidades, tais como piscicultura, agricultura, abastecimento humano e dessedentação animal, como mostra a Figura 4, a seguir.

Figura 4 - Distribuição das demandas de retirada do reservatório Lima Campos

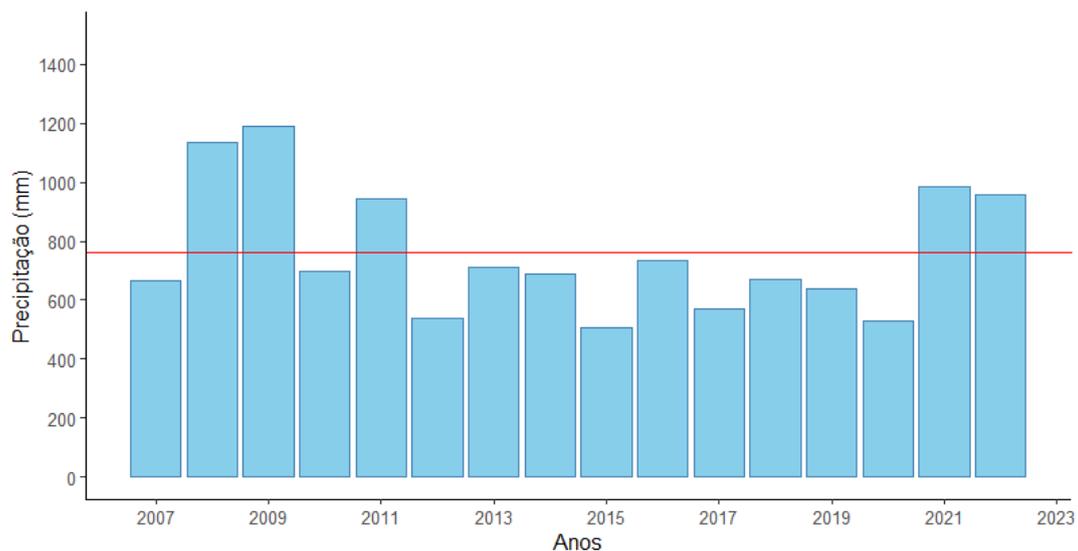


Fonte: ANA, 2016.

Segundo dados do IPECE (2017), o município de Icó possui clima Tropical Quente semiárido, pluviosidade média de 733,9 mm/ano, temperatura média de 26°C a 28°C, tendo seu período chuvoso médio compreendido entre os meses de fevereiro a abril.

A Figura 5, abaixo, traz o histórico de precipitação registrado no Posto Pluviométrico 58, localizado nas coordenadas geográficas -38.8621W e -6.4079S, na cidade de Icó, apresentando resultados dos valores acumulados anuais. Os dados foram extraídos do site da FUNCEME e correspondem ao período de 2007 a 2022. A linha vermelha representa a pluviosidade média anual.

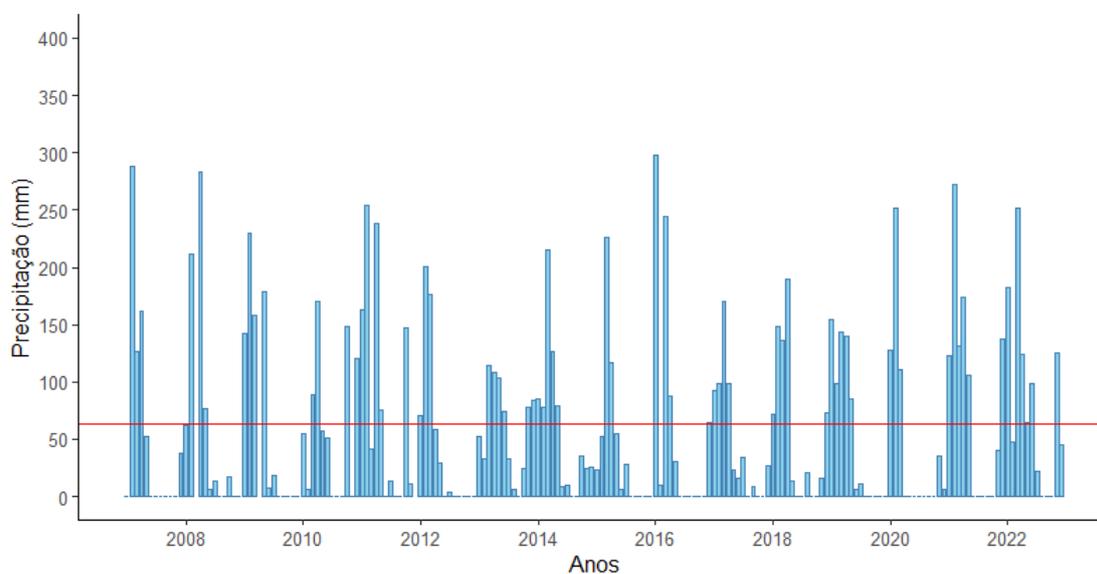
Figura 5 - Série histórica da Precipitação Anual do município de Icó-CE e pluviosidade média anual.



Fonte: Elaborada pela autora.

Devido ao clima semiárido, a região apresenta chuvas concentradas em poucos meses do ano e um padrão de forte variabilidade interanual. Além disso, sabe-se que as chuvas do semiárido apresentam enorme variabilidade espacial e temporal, onde os anos de seca e chuvas abundantes se alternam de forma irregular. A Figura 6, a seguir, mostra as precipitações acumuladas mensais e a linha vermelha a pluviosidade média mensal de 63,70mm.

Figura 6 - Série histórica da Precipitação Mensal do município de Icó-CE e pluviosidade média mensal



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3. Procedimentos metodológicos

Nos tópicos a seguir serão apresentadas as etapas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. O procedimento metodológico foi dividido em seis etapas principais, conforme apresentado no fluxograma da Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma dos Procedimentos metodológicos.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

3.3.1. Coleta de Dados

Os dados climatológicos a serem utilizados para a realização desta pesquisa foram coletados em plataformas tais como o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), a FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos) e o Portal Hidrológico do Ceará, que é um banco de dados de monitoramento quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos do estado, monitorado pela COGERH e FUNCEME.

As estações meteorológicas automáticas (EMA), do INMET coletam, a cada hora, as informações meteorológicas (temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade de vento e radiação) para a área onde estão localizadas. Esse banco de dados foi utilizado para o cálculo da estimativa de ETo pelos métodos de Penman-Monteith e de Hargreaves. No estado do Ceará são 13 EMA's, sendo que a mais próxima do local de estudo fica na cidade de Iguatu-CE, localizada nas coordenadas geográficas -39.27W e -6.40S. A EMA de Iguatu-CE possui dados horários a partir de 30 de maio de 2007.

Os dados referentes ao funcionamento do reservatório, tais como: vazão liberada e planilha Cota x Área x Volume (CAV), assim como também as atas de Alocação Negociada do Lima Campos, foram conseguidos por meio de contato direto com a gerência regional da COGERH, em Crato-CE.

3.3.2. Consistência de dados e Preenchimento de Falhas

Com o intuito de solucionar as falhas constantes na série de dados, a primeira etapa de processamento consiste na imputação dos valores ausentes. Incluindo essa etapa, todos os cálculos, e os demais passos da metodologia, foram registrados em um script, na linguagem de programação estatística R (R CORE TEAM, 2023), no Rstudio (RSTUDIO TEAM, 2023).

Em particular, a série de Radiação Solar (Rs) apresentava uma quantidade muito grande de lacunas quando comparadas às demais, pois como não há radiação no período noturno, esses dados eram tidos como faltantes. Substituiu-se, então, os valores noturnos por “zero”, devido à ausência de radiação solar (LOPES, 1995), e o preenchimento das demais falhas foi realizado posteriormente.

Para definir o melhor método de imputação optou-se pelo uso do pacote *imputeTestbench*, do Rstudio (RSTUDIO TEAM, 2023). No teste, o objeto de entrada da função deve ser um conjunto de dados completo, no entanto todas as séries apresentavam lacunas.

Como solução, optou-se pelo uso do pacote *imputeTS* (MORITZ; BART Z-BEIELSTEIN, 2017).

Sendo assim, foi realizado um preenchimento prévio dos dados com a função *na_seadec* (*algorithm = "interpolation"*) para que fosse possível realizar a escolha do melhor método de imputação em cada uma das variáveis.

As falhas foram simuladas utilizando o mecanismo MAR, apropriado para simular situações onde as falhas em uma série temporal são causadas devido a falhas em equipamentos durante longos períodos de tempo (BECK *et al.*, 2018). Porcentagens de falhas de 10% e 20% foram usadas, pois esse intervalo abrangeria o percentual de dados faltantes de todas as variáveis em estudo. Para cada porcentagem, os métodos foram testados 50 vezes.

Para realização do presente estudo, foram utilizadas nos testes as funções:

- interpolação - *na_interpolation()*;
- média móvel ponderada - *na_ma()*;
- média - *na_mean()*;
- valor ausente decomposto sazonalmente - *na_seadec()*; e
- valor ausente dividida sazonalmente - *na_seasplit()*.

Para cada uma das funções supracitadas, foram feitos os testes considerando as variações de metodologia de cálculo, desse modo, a nomenclatura dos métodos aplicados nessa pesquisa é apresentada no Quadro 1, a seguir:

Quadro 1 – Nomenclatura dos métodos aplicados para imputação dos dados faltantes.

Método	Função
interp_linear	Interpolação linear usando aproximação
interp_stine	Interpolação <i>Stineman</i>
interp_spline	Interpolação spline
ma_simple	Média Móvel Simples
ma_linear	Média móvel ponderada linear
ma_exponential	Média móvel ponderada exponencial (escolha padrão)
mean_median	Mediana
mean_mode	Moda
mean_harmonic	Média harmônica
mean_geometric	Média geométrica
seadec_ma	Valor ausente decomposto sazonalmente por média móvel ponderada
seadec_locf	Valor ausente decomposto sazonalmente pela última observação realizada
seadec_interp	Valor ausente decomposto sazonalmente por interpolação
seadec_mean	Valor ausente decomposto sazonalmente por valor médio
seasplit_interp	Valor ausente dividida sazonalmente por interpolação
seasplit_locf	Valor ausente dividida sazonalmente pela última observação realizada
seasplit_mean	Valor ausente dividida sazonalmente por valor médio
seasplit_ma	Valor ausente dividida sazonalmente por média móvel ponderada

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Além das falhas existentes no banco de dados meteorológicos, com a leitura das atas de Alocação Negociada de Água, a observação do histórico de liberações e do monitoramento transferências recebidas do sistema Orós-Lima Campos, percebeu-se que não seria possível utilizar todo o intervalo de dados (2007-2022), por falta de informações consistentes referentes ao monitoramento e gestão dos recursos hídricos.

Optou-se por considerar, a partir das próximas etapas, o período de 2014 a 2022, já que esses possuíam um monitoramento mais ativo por parte do ente responsável e assim poderia permitir resultados mais consistentes.

3.3.3. Método Penman-Montheith FAO-56 para o cálculo da evapotranspiração

Os dados são coletados em estações automáticas que registram de forma horária os valores. Para a correta utilização dos parâmetros na equação de Penman-Montheith (Etapa 3.3.4), os dados foram convertidos em valores diários. A latitude e a altitude consideradas referem-se à localização do reservatório, -6.3964 e 221,56m, respectivamente.

O próximo passo é aplicar os valores medidos das variáveis observadas na equação de Penman-Montheith-FAO. O procedimento de cálculo proposto por Allen *et al.* (1998) foi descrito no tópico 2.5.2.

A equação foi implementada no RStudio para facilitar os cálculos e a partir dessa etapa foi obtida uma série histórica das estimativas de evapotranspiração pelo método supracitado.

3.3.4. Método de Hargreaves para o cálculo da evapotranspiração

De forma análoga ao procedimento citado no tópico anterior, esse método foi aplicado como descrito em 2.5.3. Os parâmetros de entrada são a temperatura média compensada e a umidade relativa. Para que se determine a evapotranspiração potencial pelo método de Hargreaves, os dados de entrada devem ser mensais.

A fim de facilitar o cálculo matemático por trás do método, a equação foi implementada em um código no RStudio. Com os resultados, foi construída uma tabela que contém as duas séries de evapotranspiração calculadas (Penman-Montheith FAO 56 e Hargreaves).

3.3.5. *Estimativa das perdas de evaporação por meio da Evapotranspiração*

Molle e Cadier (1992) dão como alternativa ao uso dos valores de Tanque Classe A para estimar a evaporação de reservatórios, a utilização dos valores de evapotranspiração (ETP) tabelados do método de Hargreaves, multiplicando o resultado obtido por um fator de conversão de 1,65, pois a ETP é bem inferior à evaporação do tanque classe A.

No presente estudo, as séries de ETP utilizadas foram calculadas pelos métodos de Hargreaves e Penman-Montheith, e aplicado o fator de conversão. Para conseguir a evaporação total do açude (EVA), além do fator de conversão, multiplicou-se o valor pelo coeficiente C_1 , que é um fator de correção do tanque.

Para o Lima Campos foi considerada a situação normal, pois este não se situa em um vale fechado e estreito, condição necessária para se enquadrar na situação “Bem Protegida”. Como o espelho d’água tem superfície superior a 50ha, adotou-se $C_1 = 0,7$.

Devido à maior extensão do espelho d’água, o efeito das infiltrações tem efeito menos visível em relação ao volume total do reservatório. Dessa forma, o procedimento adotado no presente trabalho levou em consideração apenas os efeitos da evaporação.

Em resumo, calculou-se a lâmina d’água perdida devido aos efeitos da evaporação, para o período em estudo, por meio da Equação 19, a seguir:

$$EVA = C_1 * 1,65 * ETP \quad (19)$$

onde:

- C_1 – Correção pelo tamanho do açude;
- ETP – Evapotranspiração;

A partir desse ponto foi possível gerar duas séries históricas de evaporação do reservatório Lima Campos, uma construída com a evapotranspiração calculada pelo método Penman-Montheith FAO-56 e a outra com os resultados da evapotranspiração calculada pelo método de Hargreaves.

3.3.6. *Cálculo do aporte e simulação de esvaziamento*

A equação fundamental empregada na simulação do esvaziamento dos reservatórios tem como base o balanço hídrico, como descrito na Equação 20 a seguir:

$$V_{final} = V_{inicial} - V_{evaporado} - V_{liberado} - V_{sangria} + V_{aporte} + V_{transferência} \quad (20)$$

No caso do Lima Campos, o aporte calculado é referente ao acúmulo de água da chuva e também do volume recebido pela transferência vinda do sistema Orós-Lima Campos, desse modo, as duas últimas variáveis ($V_{aporte} + V_{transferência}$) foram unificadas como “ V_{aporte} ”. O volume de sangria foi considerado como zero devido ao período de estudo não ter tido nenhum evento de sangria. Dessa forma, o cálculo do aporte foi feito a partir da Equação 21:

$$V_{aporte} = V_{final} - V_{inicial} + V_{evaporado} + V_{liberado} \quad (21)$$

Normalmente a vazão liberada pela tomada d’água ocorre ao mesmo tempo que o espelho d’água sofre a evaporação. Para não haver necessidade de realizar os cálculos dia a dia, o Manual do SAGREH (PAULINO, 1997) sugere que os mesmos sejam simplificados de forma que o esvaziamento se realize, mês a mês. O método já passou por diversas alterações, algumas metodologias foram modificadas ao longo dos anos e essas alterações foram replicadas para o script desenvolvido em linguagem R. Então, a simulação do esvaziamento do reservatório foi realizada como é dito a seguir:

1. subtraiu-se da cota inicial a lâmina evaporada nos dias do mês abrangidos pelo período, resultando na cota intermediária 1;
2. o volume evaporado foi obtido pela diferença entre o volume inicial e o correspondente à cota intermediária 1;
3. ao volume correspondente à cota intermediária 1, foi retirado o volume liberado e somou-se o aporte e as transferências, esta última nos casos particulares onde há esse tipo de operação, resultando no volume intermediário 2;
4. a cota correspondente ao volume intermediário 2 é a cota final para o período correspondente.

Foram considerados dois cenários de esvaziamento, o de aporte médio, que considera a média de aporte de todos os anos, e o aporte mínimo, que se refere ao ano com menor aporte no intervalo estudado (2014-2022). Além dos cenários diferentes para o aporte, foi feito o cálculo variando a evaporação, considerando as duas séries de evaporação geradas neste estudo.

O SAGREH considera a normal climatológica da evaporação do tanque classe A, no período de 1961 a 1990. As normais climatológicas são valores médios de variáveis meteorológicas calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas, e representa as características médias do clima em um determinado local (INMET, 1992). No estado do Ceará, ela está disponível para 11 estações climatológicas e procurou-se, para cada açude gerenciado, definir a estação climatológica representativa. Para o caso do açude Lima Campos, a estação correspondente é a de Iguatu-CE.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados da pesquisa, de acordo com as etapas apresentadas anteriormente na metodologia.

4.1. Consistência dos dados e preenchimento de falhas

Além das falhas próprias da série, devido a algum tipo de problema na estação automática, percebeu-se que na série de Radiação Solar (Rs) haviam falhas diárias que são lidas como *Not Available* (NA) pelo sistema. Esses valores de radiação representam os dados horários de períodos noturnos, ou seja, dados que não teriam valor significativo para o algoritmo, vide que o objetivo é o preenchimento de falhas de radiação válidas, dessa forma adotou-se o valor igual a zero.

Após essa correção, foi calculado o percentual de dados faltantes em cada série. Como pode-se ver na Tabela 2, os percentuais variam entre 7,05% e 14,92%.

Tabela 2 - Percentual de dados faltantes nos conjuntos de dados meteorológicos da estação automática de Iguatu-CE, após correção da série de radiação, por variável.

Rs	Patm	UR	U2	Temp	Temp. max	Temp. min
7,05%	14,7%	14,92%	14,76%	14,73%	14,92%	14,92%

Nota: Rs- radiação solar; Patm- pressão atmosférica; UR- umidade relativa; U2- velocidade do vento; Temp- temperatura; Temp. max- temperatura máxima; Temp. min- temperatura mínima.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O desempenho dos métodos de imputação foi avaliado para as porcentagens 10% e 20%. As falhas foram simuladas seguindo o esquema de amostragem de ausência aleatória – MAR, onde seleciona observações em blocos contínuos de modo que a probabilidade de seleção para uma única observação depende se uma observação mais próxima no tempo também foi selecionada. Os pontos de dados da série foram amostrados aleatoriamente 50 vezes para cada porcentagem, cujos tamanhos amostrais foram 13.663 e 54.653, para 10% e 20%, respectivamente.

A Tabela 3 mostra a média aritmética dos valores de erro absoluto médio (MAE, do inglês *mean absolute error*) e raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *root mean squared error*), obtidos para cada um dos dez melhores métodos, sob as diferentes porcentagens de falhas, nas variáveis Temperatura(°C), Temperatura máxima(°C) e Temperatura

Mínima(°C). Os melhores valores estão destacados em negrito na tabela. O significado da nomenclatura dos métodos encontra-se no Quadro 1 (Seção 3.3.2).

Tabela 3 - Erros (MAE e RMSE) encontrados para cada método de imputação das variáveis de Temperatura(°C), Temperatura máxima(°C) e Temperatura Mínima(°C), na estação automática de Iguatu-CE (junho de 2007 a dezembro de 2022). Os melhores valores estão destacados em negrito.

% Falhas	Método	TEMPERATURA		TEMPERATURA MÁXIMA		TEMPERATURA MÍNIMA	
		MAE (°C)	RMSE (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)
10%	interp_linear	0,0390	0,1861	0,0337	0,1616	0,0342	0,1669
	interp_stine	0,0377	0,1816	0,0317	0,1540	0,0323	0,1598
	interp_spline	0,0407	0,1945	0,0329	0,1572	0,0327	0,1616
	ma_linear	0,0758	0,3218	0,0745	0,3112	0,0729	0,3134
	ma_exponential	0,0608	0,2654	0,0585	0,2517	0,0578	0,2552
	seadec_ma	0,0397	0,1896	0,0345	0,1669	0,0360	0,1761
	seadec_locf	0,0471	0,2322	0,0409	0,2032	0,0421	0,2142
	seadec_interp	0,0369	0,1800	0,0309	0,1516	0,0315	0,1580
	seasplit_interp	0,0856	0,3892	0,0817	0,3778	0,0841	0,3851
	seasplit_ma	0,0826	0,3706	0,0793	0,3622	0,0813	0,3665
20%	interp_linear	0,0850	0,2866	0,0744	0,2520	0,0751	0,2613
	interp_stine	0,0814	0,2775	0,0691	0,2375	0,0704	0,2483
	interp_spline	0,0869	0,2950	0,0710	0,2402	0,0710	0,2498
	ma_exponential	0,1292	0,4018	0,1242	0,3818	0,1226	0,3860
	seadec_ma	0,0821	0,2761	0,0715	0,2428	0,0744	0,2578
	seadec_locf	0,0988	0,3422	0,0862	0,3016	0,0891	0,3202
	seadec_interp	0,0771	0,2637	0,0650	0,2235	0,0663	0,2353
	seadec_mean	0,3347	0,9197	0,3379	0,9218	0,3196	0,8741
	seasplit_interp	0,0856	0,5596	0,1663	0,5430	0,1708	0,5521
	seasplit_locf	0,1031	0,6734	0,2011	0,6554	0,2057	0,6637
	seasplit_ma	0,0826	0,5341	0,1613	0,5204	0,1650	0,5263

Nota: MAE – Erro absoluto médio; RMSE - raiz do erro quadrático médio.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Nas variáveis de Temperatura (temperatura, temperatura máxima e temperatura mínima), para ambas as porcentagens de falha (10% e 20%), o método “seadec_interp”, obtido com a função *na_seadec* (*algorithm = “interpolation”*), apresentou desempenho superior em comparação com os demais. Considerando os cinco melhores métodos, houve pequenas variações a partir do segundo melhor, mas para todas as condições testadas nessas variáveis destacaram-se o “interp_stine”, “interp_linear”, “interp_spline” e “seadec_ma”. Percebe-se que o comportamento dessas variáveis responde muito bem aos métodos de interpolação.

A Tabela 4 mostra a média aritmética dos valores de MAE e RMSE, obtidos para cada um dos dez melhores métodos, sob as diferentes porcentagens de falhas, nas variáveis pressão atmosférica (kPa), umidade relativa (%), velocidade do vento (m/s) e radiação (Mj/m².dia). Os melhores valores estão destacados em negrito na tabela. A tabela completa, contendo os erros de todos os métodos testados, para todas as variáveis, encontra-se no Apêndice A.

Tabela 4 - Erros (MAE e RMSE) para cada método de imputação das variáveis de Pressão atmosférica (kPa), Umidade Relativa (%), Velocidade do Vento (m/s) e Radiação (Mj/m².dia), na estação automática de Iguatu-CE (junho de 2007 a dezembro de 2022). Os melhores valores estão destacados em negrito.

% Falhas	Método	PRESSÃO		UMIDADE RELATIVA		VELOCIDADE DO VENTO		RADIAÇÃO	
		MAE (kPa)	RMSE (kPa)	MAE (%)	RMSE (%)	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	MAE (Mj/m ² .dia)	RMSE (Mj/m ² .dia)
10%	interp_linear	0,0016	0,0072	0,1752	0,8805	0,0505	0,2321	0,1557	0,7634
	interp_stine	0,0014	0,0062	0,1687	0,8581	0,0504	0,2332	0,1566	0,7691
	interp_spline	0,0012	0,0054	0,1829	0,9115	0,0592	0,2718	0,1888	0,9266
	ma_simple	0,0061	0,0244	0,4206	1,7714	0,0696	0,2997	0,1652	0,7656
	ma_linear	0,0049	0,0195	0,3449	1,4822	0,0625	0,2719	0,1588	0,7433
	ma_exponential	0,0036	0,0148	0,2763	1,2331	0,0568	0,2508	0,1552	0,7351
	seadec_ma	0,0021	0,0093	0,1979	0,9879	0,0570	0,2518	0,1608	0,7613
	seadec_locf	0,0032	0,0144	0,2341	1,2147	0,0714	0,3132	0,1934	0,9345
	seadec_interp	0,0014	0,0066	0,1782	0,9144	0,0544	0,2460	0,1641	0,7966
	seasplit_ma	0,0132	0,0516	0,4749	2,1582	0,1198	0,5715	0,2201	0,9571
20%	interp_linear	0,0038	0,0121	0,3803	1,3529	0,1045	0,3396	0,3187	1,0863
	interp_stine	0,0032	0,0104	0,3622	1,3098	0,1043	0,3417	0,3212	1,0973
	interp_spline	0,0026	0,0083	0,3908	1,3904	0,1233	0,4015	0,3941	1,3383
	ma_simple	0,0125	0,0354	0,8649	2,6011	0,1417	0,4303	0,3327	1,0916
	ma_linear	0,0100	0,0286	0,7136	2,1937	0,1276	0,3922	0,3208	1,0606
	ma_exponential	0,0077	0,0223	0,5812	1,8600	0,1168	0,3646	0,3147	1,0507
	seadec_ma	0,0045	0,0143	0,4068	1,4319	0,1168	0,3643	0,3277	1,0961
	seadec_locf	0,0071	0,0232	0,4904	1,7879	0,1474	0,4590	0,3923	1,3502
	seadec_interp	0,0030	0,0101	0,3704	1,3375	0,1110	0,3558	0,3345	1,1418
	seasplit_ma	0,0264	0,0733	0,9652	3,1130	0,2467	0,8427	0,4493	1,3751

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

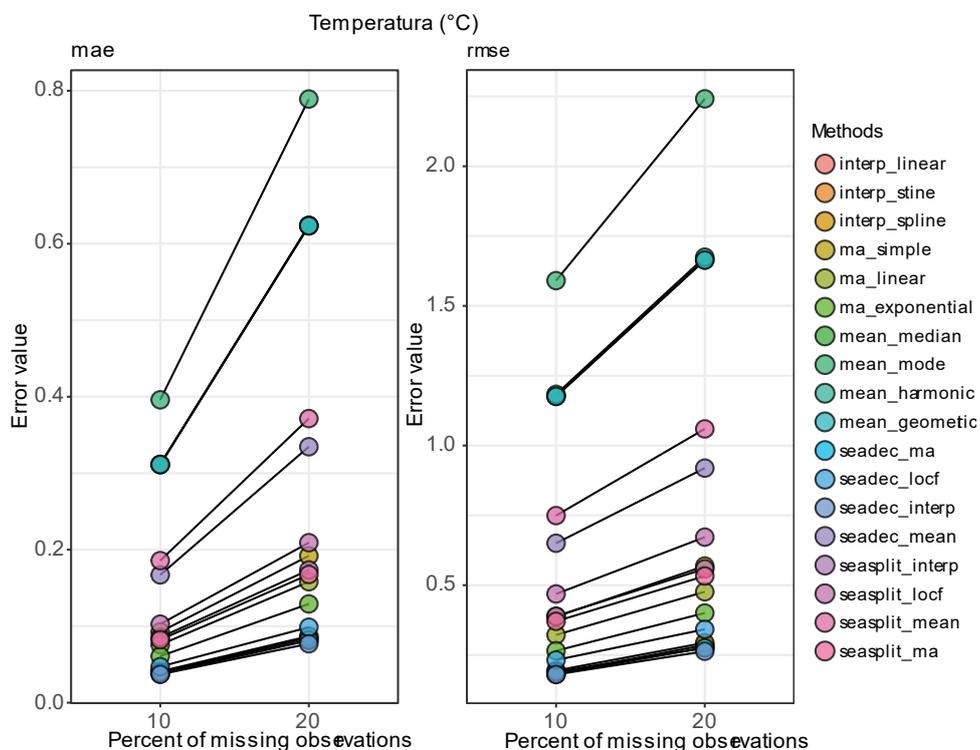
A variável velocidade do vento possuía alguns *outliers* devido ao processamento prévio para aplicação do pacote *imputeTestbench()*, e não permitiu que fosse testada a imputação pelos métodos de média harmônica e média geométrica. Devido às suas fórmulas de cálculo, as médias geométricas e harmônicas não funcionam bem para valores negativos ou valores iguais a zero (MORITZ; BARTZ-BEIELSTEIN, 2017), que surgiram na série após o pré-processamento das falhas.

Diferentemente das variáveis de temperatura, os demais conjuntos de dados não apresentaram um padrão em relação ao melhor método de imputação de dados. Os dados de pressão, umidade relativa e velocidade do vento responderam bem aos métodos de interpolação, tiveram melhor êxito com os métodos “interp_spline”, “interp_stine” e “interp_linear”, respectivamente. Já os dados de radiação apresentaram um melhor comportamento com o método de imputação por média móvel exponencial, “ma_exponencial”.

Embora não apresentem um padrão, a pequena variação entre os valores de erro dos métodos justifica a utilização do método “seadec_interp” para a imputação de todos os conjuntos de dados das variáveis faltantes, visando simplificar o algoritmo computacional para todos os conjuntos de dados testados.

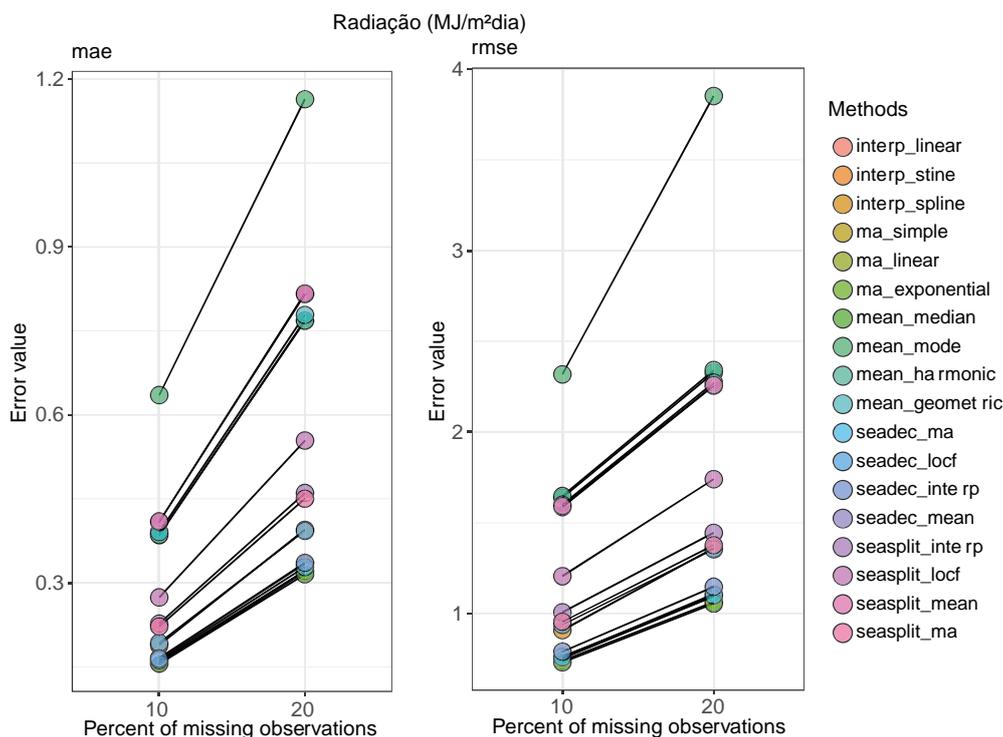
Nas Figuras 8 e 9, a seguir, são apresentadas de forma gráfica da variação dos valores médios de erro (MAE e RMSE) para cada método de imputação e intervalo de observações ausentes nas variáveis de Temperatura(°C) e Radiação (MJ/m².dia), respectivamente. Os resultados das demais variáveis encontram-se no Apêndice B.

Figura 8 - Erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada método de imputação da variável Temperatura (°C)



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 9 - Erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada método de imputação da variável Radiação (MJ/m².dia).



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

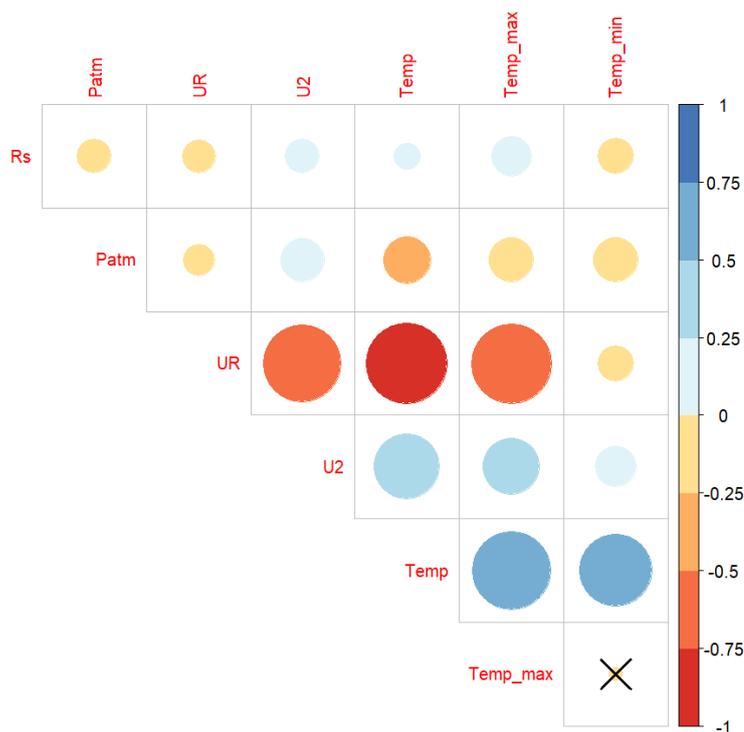
Ao se observar os valores médios calculados para MAE e RMSE, percebeu-se que o aumento na porcentagem de falhas, de 10% para 20%, diminuiu a qualidade e precisão das estimativas de todos os métodos estudados.

Os métodos que apresentam piores desempenhos são os que fazem a substituição dos valores com base em valores médios da série de dados (“mean_median”, “mean_mode”, “mean_harmonic” e “mean_geometric”). Esse comportamento já era esperado e foi comentado por Moritz e Bartz-Beielstein (2017) ao explicar que usar a média para imputação não é uma escolha ideal e deve ser tratada com muito cuidado.

4.2. Teste de correlação linear entre as variáveis

A Figura 10 apresenta uma leitura dos resultados do teste de hipóteses para a Correlação de Pearson entre as variáveis do banco de dados, com nível de significância de 5%. Quanto maior os círculos e mais forte a cor, maior é a correlação. A cor azul representa correlação positiva e a cor laranja uma correlação negativa. O X significa que a correlação entre as variáveis não é significativa.

Figura 10 - Teste de Significância para o coeficiente de correlação de Pearson ao nível de 5% para as variáveis em estudo



Nota: Rs- radiação solar; Patm- pressão atmosférica; UR- umidade relativa; U2- velocidade do vento; Temp- temperatura máxima; Temp_max- temperatura máxima; Temp_min- temperatura mínima.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A Figura 10 indica que existe correlação entre todas as variáveis do banco de dados. Os círculos maiores e com cores mais fortes, vistos na imagem, correspondem à variável umidade relativa (UR). A correlação negativa com a velocidade do vento, a temperatura média do ar e temperatura máxima, significa que quando a umidade relativa do ar está mais alta, a tendência é que estas variáveis apresentem valores mais baixos, assim como o contrário também é válido.

Na Figura 10 também está presente o teste de significância para a correlação, que indica se as relações entre as variáveis são ou não significantes. Assumindo o coeficiente de 5%, mencionado acima, a relação entre a temperatura máxima e temperatura mínima foi a única que obteve *p-value* superior à 0,05 no teste de hipóteses para a Correlação de Pearson, ou seja, entende-se que as duas variáveis não possuem relação significativa entre si.

Esse resultado ressalta a complexidade de estimativa da evaporação, por se tratar de uma grandeza que sofre influência do efeito conjugado de diversas variáveis meteorológicas. Ou seja, o comportamento da série calculada pode variar, dependendo do comportamento das variáveis meteorológicas medidas envolvidas.

4.3. Séries históricas dos dados meteorológicos

A Tabela 5 apresenta um resumo estatístico-descritivo das variáveis meteorológicas que compõe o banco de dados, após o preenchimento das falhas. Foram estudadas a radiação solar acumulada diária, a distribuição média diária da pressão atmosférica, a média diária dos percentuais de umidade relativa, média diária da velocidade do vento e temperaturas médias, máximas e mínimas, diárias.

A radiação média acumulada diariamente é de 13,396 MJ/m²dia, chegando ao valor máximo de 17,513 MJ/m²dia, nos dias com maior incidência solar. Em relação à pressão atmosférica, por mais que a estação meteorológica seja fixa em um local, os valores apresentam pequenas oscilações, pois estão sujeitas a variações horárias (máximos e mínimos) e também à diferença entre as estações do ano. Essa pequena variação é refletida no valor do coeficiente de variação, que é o mais baixo dentre as variáveis estudadas.

Quanto à umidade relativa, a média do período é de 59,97% e o menor valor registrado foi de 27,48%. Vale ressaltar que os valores de umidade relativa do ar apresentados são referentes à média diária, compreendendo as 24 horas do dia. A velocidade média do vento é a variável que apresenta maior coeficiente de variação, ou seja, é a que mais varia em relação à média da amostra.

A temperatura média para o período 2014-2022 é de 27,68 °C, sendo o dia mais frio registrado com uma média diária de 22,08°C, e o mais quente com a média diária igual a 34,37°C. Entretanto, quando se trata de picos máximos e mínimos de temperatura, a mínima registrada no período de estudo foi de 15,7°C, enquanto a máxima foi de 40,4 °C.

Tabela 5 - Estatísticas descritivas para as variáveis meteorológicas extraídas da estação automática de Iguatu-CE, no período de 2014-2022.

	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Coeficiente de Variação
Radiação (MJ/m ² dia)	2,5140	13,3960	13,725	17,513	0,1636
Pressão atmosférica (kPa)	98,1500	98,7000	98,6800	99,2900	0,0018
Umidade Relativa (%)	27,4800	57,8100	55,0800	96,0000	0,2421
Velocidade do vento (m/s)	0,4697	2,5599	2,5458	5,4499	0,3269
Temperatura (°C)	22,0800	27,9500	27,8400	34,3700	0,0646
Temperatura Mínima (°C)	17,1000	23,3700	23,0000	32,3500	0,0977
Temperatura Máxima (°C)	25,93	33,4500	33,3000	40,4000	0,0760

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

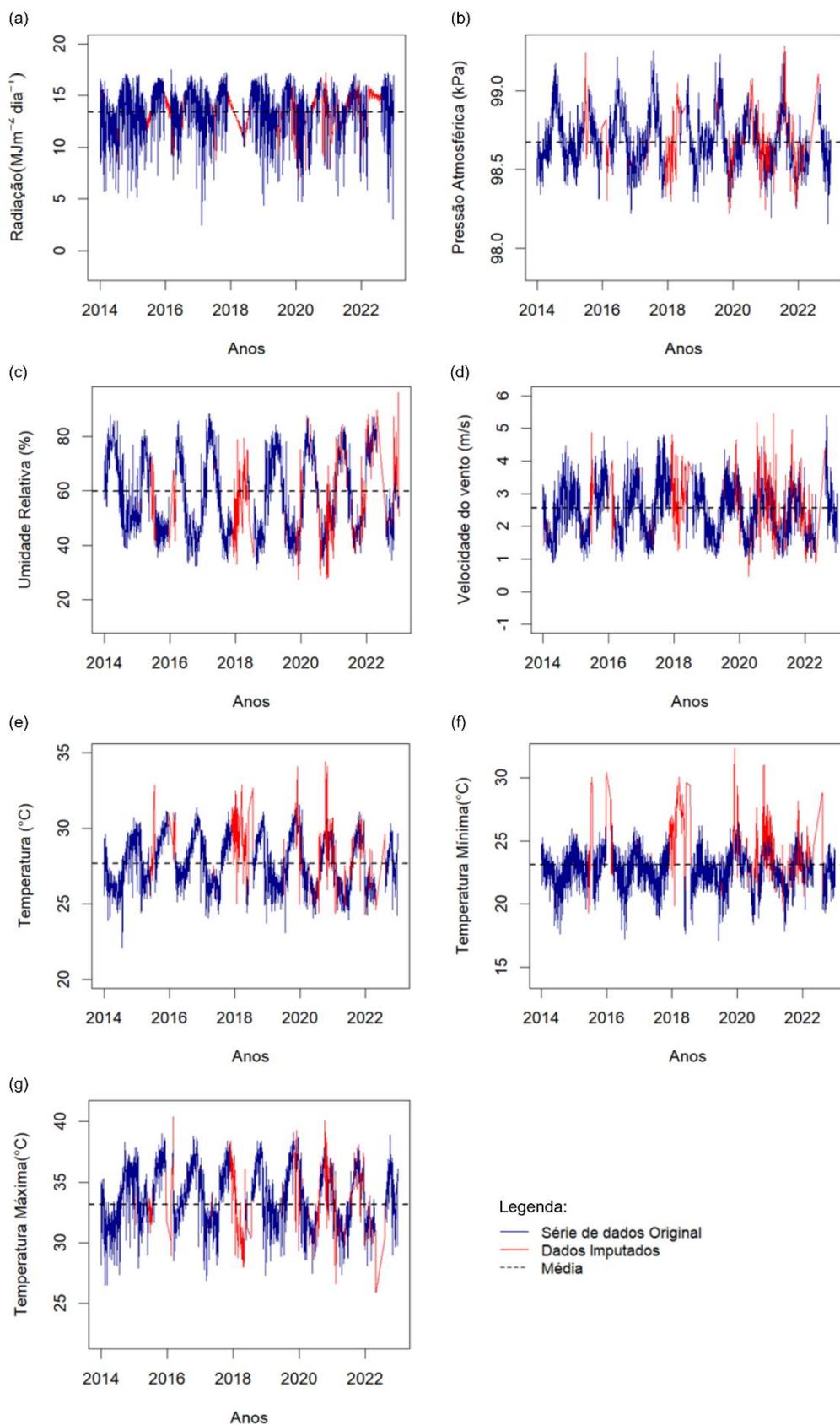
A Figura 11 ilustra a distribuição diária das variáveis considerando o período de tempo de 2014 a 2022, para ilustrar o padrão observado em cada parâmetro meteorológico, medido na região em estudo. A série de dados original está representada pela cor azul e os trechos que apresentavam falhas e tiveram seus valores imputados estão destacados na cor vermelha. A linha tracejada preta, identifica o valor da média de cada série.

As séries históricas possuem um comportamento sazonal. Podendo ser visualizada de forma mais clara na umidade relativa, Figura 11 (c), e nas temperaturas média e máxima, Figura 11 (e) e Figura 11 (g). Essa característica, atrelada ao clima semiárido no qual se encontra o local de estudo, se justifica pela alternância entre os períodos chuvosos e secos. Nos períodos chuvosos, mais concentrados no início de cada ano, as temperaturas tendem a cair, já quando começa o período de estiagem é normal que elas voltem a aumentar.

Para as variáveis umidade relativa do ar e velocidade do vento o preenchimento, visualmente, aparenta ter sido muito bom. Entretanto, para as variáveis de temperatura, o algoritmo parece ter estimado valores bem superiores aos já observados na série.

Os gráficos apresentados na Figura 11 ressaltam o bom funcionamento do preenchimento de dados ausentes, na maior parte das séries. Nos últimos dias do mês de abril, nos meses de maio, junho, julho e alguns dias do mês de agosto de 2022, a estação meteorológica não registrou nenhuma medição para as variáveis, isso afetou o funcionamento do preenchimento de falhas. É possível perceber que, nesse período, o algoritmo não consegue acompanhar o comportamento da série original, preenchendo os dados de forma linear.

Figura 11 - Série histórica dos dados meteorológicos coletados na EMA de Iguatu-CE, com valores faltantes imputados.

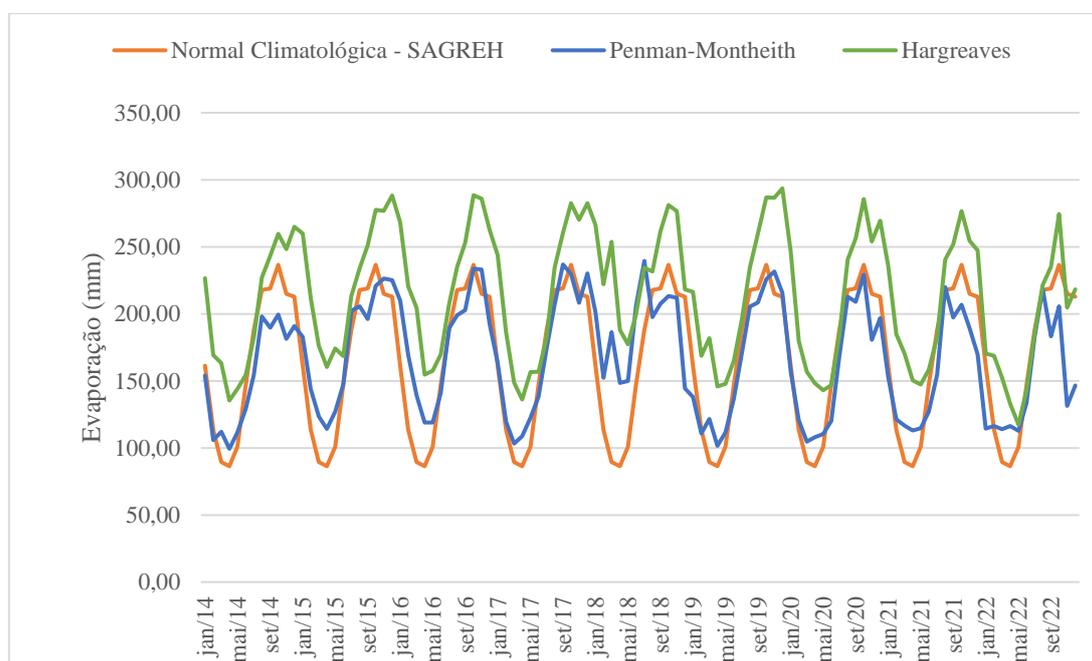


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

4.4. Séries de Evaporação

A Figura 12 apresenta as estimativas da evaporação no reservatório Lima pelos diferentes métodos utilizados. A série na cor laranja representa a evaporação padrão do sistema SAGREH, que utiliza a normal climatológica (INMET, 1992) da evaporação do tanque classe A, no período de 1961 a 1990. Enquanto as séries em azul (Penman-Monteith FAO 56) e verde (Hargreaves) são os valores resultantes do presente estudo.

Figura 12 - Evaporação em mm, açude Lima Campos, Iguatu-CE, Brasil, estimadas pelos métodos de Penman-Montheith (1948) e Hargreaves (1974) entre 2014-2022



Fonte: Elaborada pela Autora (2023).

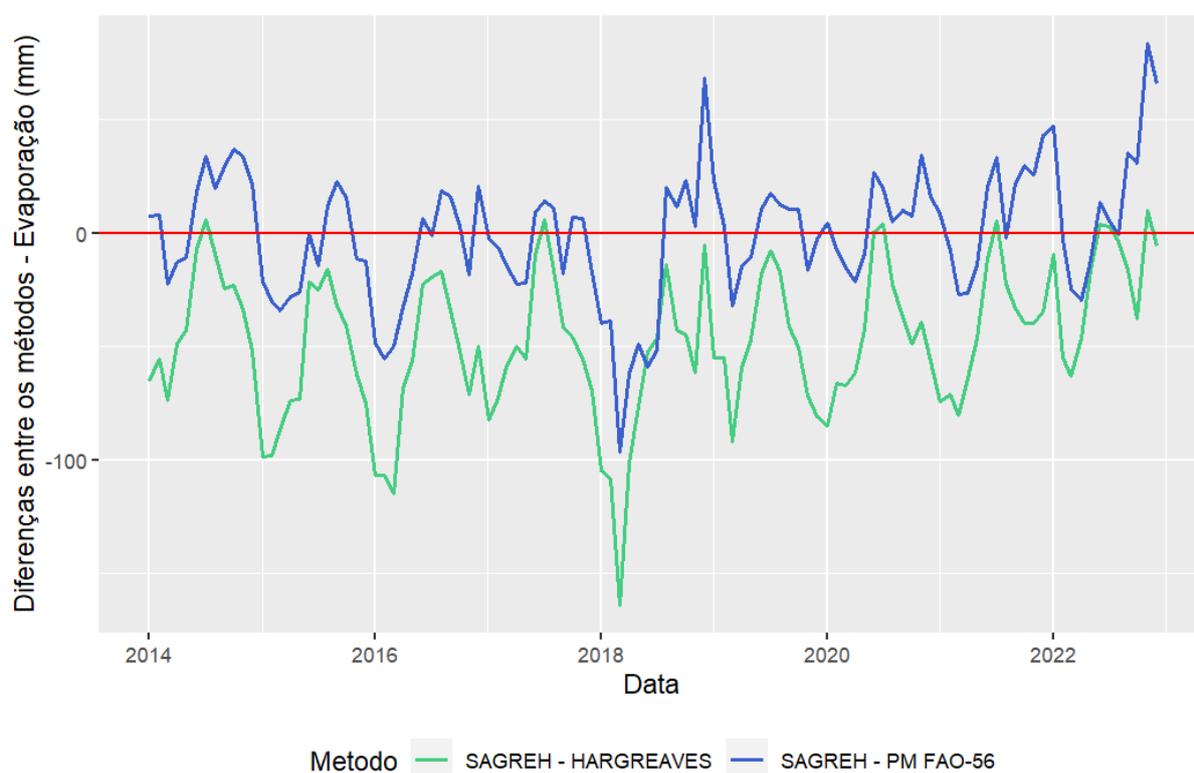
Com base na Figura 12, percebe-se que todos os modelos apresentaram valores de evaporação entre 50mm e 300mm. Os maiores valores de temperatura e velocidade do vento, associados com a baixa precipitação, altos índices de radiação e baixa umidade que ocorrem durante o segundo semestre dos anos justificam o perfil de crescimento das evaporações nesse intervalo de tempo.

A análise de variância foi aplicada para verificar se existe diferença significativa entre os resultados dos métodos. Quando foram comparadas as séries PM FAO-56 e SAGREH, o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis retornou um *p-value* igual a 0.9064, concluindo-se que não há diferenças significativas entre as duas séries. Entretanto, quando se comparou as séries HARGREAVES e SAGREH, o *p-value* para o teste de Kruskal-Wallis resultou um valor

1.036e-08, bem inferior ao nível de significância estabelecido de 5%, podendo afirmar que há diferenças significativas entre os dois últimos métodos.

A Figura 13 mostra as diferenças entre os métodos propostos para estimativa da evaporação e o método padrão. A linha verde mostra a diferença entre a série de evaporação utilizada pelo SAGREH e o método de Hargreaves. Percebe-se que o método de Hargreaves apresenta valores acima do método padrão em quase todo o período estudado, pois as diferenças são, quase que em sua totalidade, negativas. A linha azul, por outro lado, possui uma amplitude menor em relação a linha vermelha, que marca o zero. Desse modo, pode-se afirmar que as estimativas pelo método PM-FAO-56 são mais próximas do padrão, que é a normal climatológica.

Figura 13 - Diferenças entre o método padrão e os métodos propostos para estimativa da evaporação



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Por meio do teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, é possível inferir se essas diferenças são estatisticamente iguais a zero ou não. O teste resultou em um *p-value* igual a 2.2e-16. A um nível de significância de 5%, pode-se afirmar que há diferenças significativas entre os métodos propostos.

A Tabela 6 mostra o resumo, em termos anuais, da lâmina de evaporação calculada pelos métodos PM FAO-56 e Hargreaves. A última linha da tabela traz o somatório anual da evaporação utilizada no SAGREH, estimada pelo Tanque Classe A. Como pode ser observado, os valores encontrados pelo Método PM FAO-56 são bem próximos ao utilizado pelo SAGREH. Quando comparada a média anual, a diferença é de apenas 6,06mm. Enquanto o método de Hargreaves, superestimou o somatório da evaporação em todos os anos.

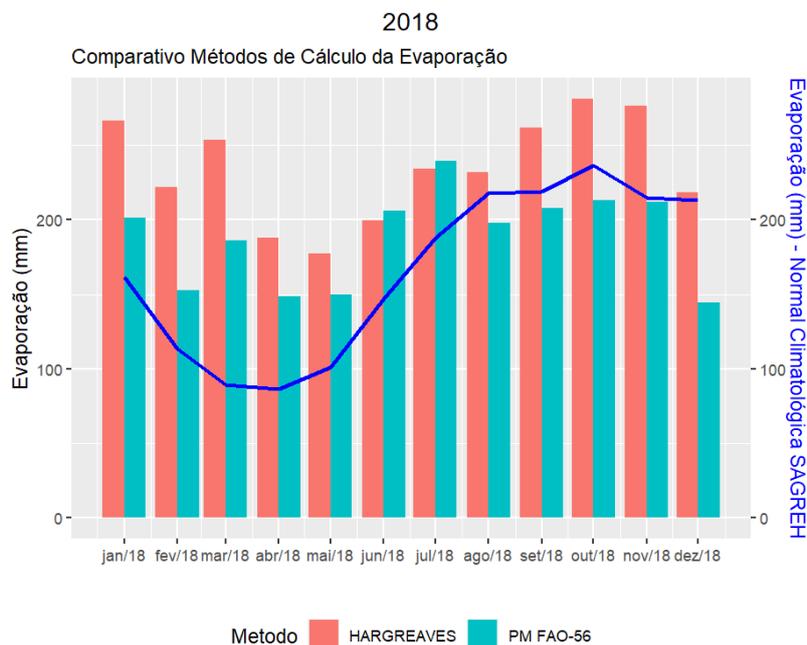
Tabela 6 - Comparativo da lâmina evaporada anualmente calculada pelo método PM FAO-56 e Hargreaves

Evaporação Anual (mm)		
Ano	PM FAO-56	HARGREAVES
2014	1826,08	2418,53
2015	2115,41	2692,18
2016	2147,55	2707,79
2017	2042,23	2541,00
2018	2259,01	2811,32
2019	1978,10	2583,54
2020	1918,14	2511,53
2021	1883,62	2500,24
2022	1776,41	2224,86
Média	1994,06	2554,55
SAGREH	1988,00	

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Nos anos de 2018 e 2022, para alguns meses, foi percebido um comportamento diferente da evaporação calculada com o método Penman-Montheith FAO-56 em relação aos valores da normal climatológica. Os gráficos comparativos estão apresentados nas Figura 14 e Figura 15, a seguir. As barras representam os dois métodos de cálculo da evaporação aplicados nesta pesquisa, PM FAO-56 e Hargreaves, e a linha azul mostra o comportamento da normal climatológica ao longo dos meses. Os gráficos comparativos para os demais anos, de forma individual, encontram-se no Apêndice C.

Figura 14 - Comparativo dos Métodos de Cálculo da Evaporação para o ano de 2018



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

É possível identificar, a partir da Figura 14, que nos primeiros meses do ano de 2018 - período que, geralmente, compreende a quadra chuvosa - a evaporação calculada superestimou a Normal Climatológica de evaporação, para os dois métodos (PM FAO-56 e Hargreaves).

A Figura 15, apresenta o comparativo entre os métodos para o ano de 2022. Nos meses de novembro e dezembro de 2022, evaporação calculada pelo método PM FAO-56 foi subestimada em relação à Normal Climatológica. Essas diferenças podem ser justificadas por alterações fora dos padrões do clima local, que interferem no comportamento das variáveis em estudo e não são consideradas no cálculo da normal climatológica, entretanto, como o método PM FAO-56 leva em consideração mais fatores meteorológicos, este se torna mais sensível a alterações.

Figura 15 - Comparativo dos Métodos de Cálculo da Evaporação para o ano de 2022



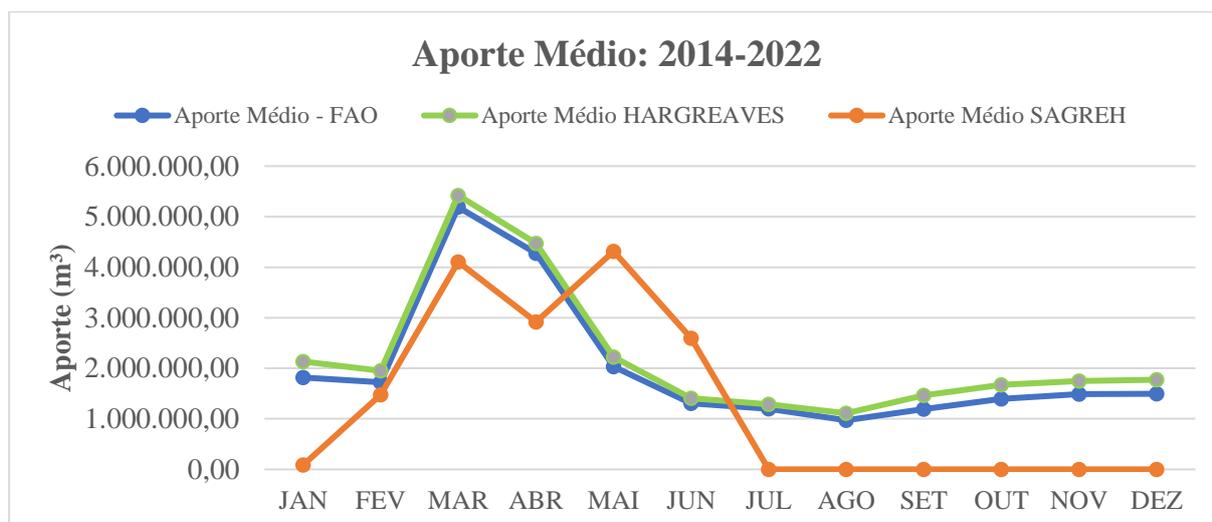
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

4.5. Aporte do reservatório

A ferramenta SAGREH permite o cálculo de alguns cenários de esvaziamento, considerando diferentes cenários de aporte, porém os mais utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos superficiais do estado do Ceará são o aporte médio, que considera a média de aporte de todos os anos, e o aporte mínimo, que se refere ao ano com menor aporte no intervalo estudado. Dessa forma, foram replicados esses cenários para o código computacional desenvolvido nesta pesquisa.

A Figura 16, abaixo, apresenta o gráfico das séries históricas de aportes, onde as linhas em azul e verde representam os valores calculados pelo balanço hídrico, com base na evaporação obtida com o método da FAO e de Hargreaves, respectivamente. Enquanto a linha na cor laranja é referente aos valores de aporte utilizados pelo SAGREH. Como visto anteriormente, a evaporação calculada com o método de Hargreaves é ligeiramente superior ao método Penman-Montheith FAO-56, esse comportamento se reflete no cálculo do volume de aporte.

Figura 16 - Aporte médio do açude Lima Campos, Iguatu-CE, calculado pelo código computacional e pelo SAGREH, no período de 2014-2022



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

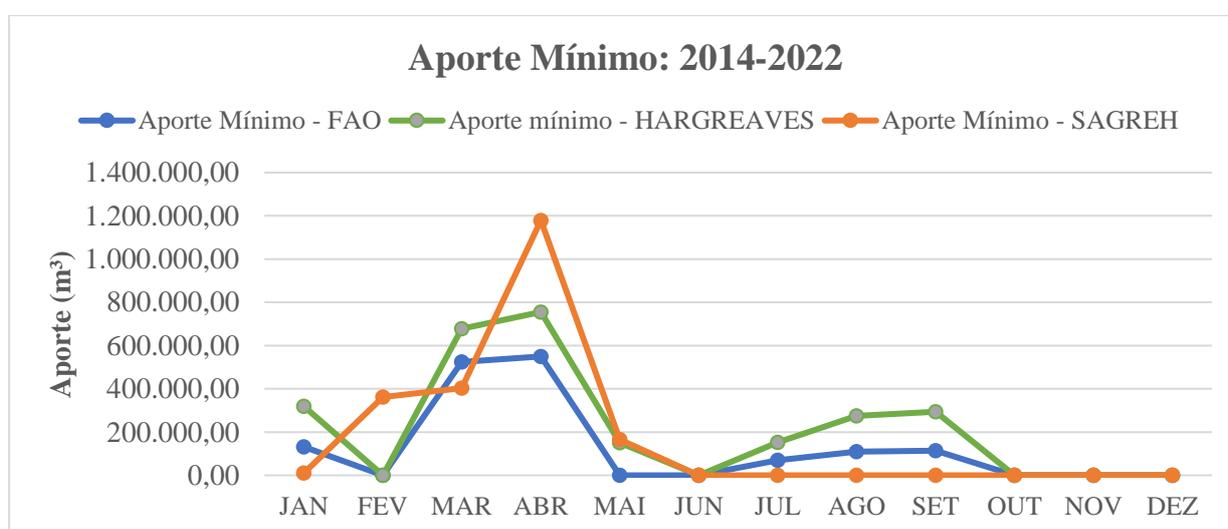
O cálculo do aporte realizado nesta pesquisa foi totalmente baseado no balanço hídrico, isso significa que estão incluídas todas as entradas e saídas que acontecem no reservatório. No caso do reservatório Lima Campos, as entradas ocorrem tanto pela precipitação e escoamento superficial, como pela transferência advinda do sistema Orós-Lima Campos. Como não havia dados concisos do monitoramento de vazão do canal de transferência, o aporte considerado no código computacional desenvolvido reflete todo o saldo de aumento no volume, sem diferenciar sua fonte de entrada.

Com exceção de dois meses, maio e junho, a série laranja está abaixo das demais. Esses dois meses, representam o fim da quara chuvosa, onde os reservatórios estão com volume alto, e a série de evaporação volta a crescer. Essa exceção pode ser explicada pelo fato de que o aporte no SAGREH é calculado de forma diária, então pode haver precipitações que entram no reservatório e são contabilizadas no cálculo diário, mas que são perdidas ao longo do mês, não sendo assim computadas no saldo de aporte mensal.

No segundo semestre tem-se uma elevada probabilidade de que tanto a precipitação como o escoamento superficial sejam nulos, sendo igualmente desprezível a ocorrência de sangria no período (OLIVEIRA, 2008). Por este motivo, o SAGREH não considera nenhum aporte para esse período. Como mostra a Figura 16, a linha laranja toca o eixo x a partir do mês de julho. No entanto, pelo fato de não diferenciar as entradas no reservatório, os aportes médios calculados com base no balanço hídrico possuem valores positivos também para o segundo semestre, pois consideram o volume recebido da transferência do sistema Orós-Lima Campos.

O outro cenário de aporte considerado para a simulação de esvaziamento é apresentado na Figura 17, a seguir. Nessa estimativa, com perfil mais conservador, é utilizado o aporte mínimo ocorrido a cada mês do ano, ao longo de todo o período de estudo determinado (2014-2022). A linha em azul representa os valores obtidos com o código computacional, desenvolvido em linguagem R, com base na evaporação obtida com o método da FAO, e a linha verde derivada da série de evaporação gerada com Hargreaves. A linha na cor laranja é referente aos valores de aporte retirados do SAGREH.

Figura 17 - Aporte mínimo do açude Lima Campos, Iguatu-CE, calculado pelo código computacional e pelo SAGREH, no período de 2014-2022



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Enquanto os valores de aporte médio variam de 1.110.275m³ a 5.421.058m³, o aporte mínimo considera um cenário mais crítico, onde os aportes calculados não superam 755.185m³. Observando a série de aportes mínimos, percebe-se que mesmo nos anos mais secos, houve liberação do Orós para o Lima Campos, pelo menos nos primeiros meses do período de estiagem. Essa informação foi confirmada com a leitura das Atas de Alocação Negociada de água, disponibilizadas pela COGERH, que afirmam o acordo de liberação no vale perenizado.

4.6. Simulações de Esvaziamento

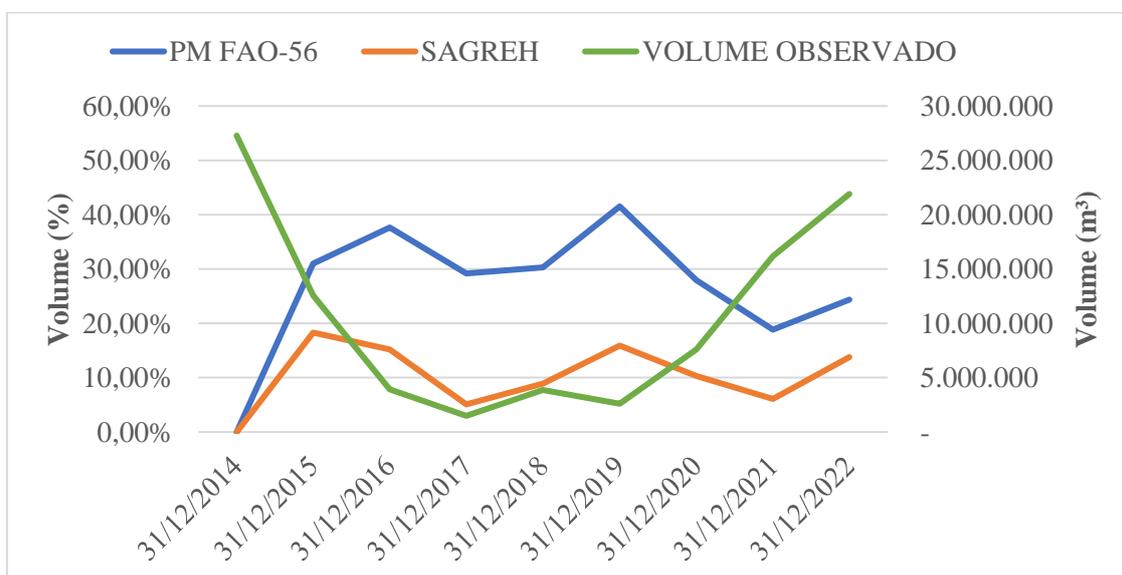
Como o cálculo do aporte foi realizado pela equação do balanço hídrico, tanto para o método PM FAO-56, como para o método de Hargreaves, o volume residual do reservatório ao final da simulação de esvaziamento ficou igual para os dois métodos. Decidiu-se seguir apenas

com a evaporação derivada do método PM FAO-56 por ser calculado com base no método que é considerado como padrão para definição e cálculo de evapotranspiração de referência.

De acordo com a Figura 18 é possível comparar a resposta do reservatório aos métodos de simulação de esvaziamento com o valor observado pelo monitoramento, ao final de cada ano. A linha em azul representa os volumes residuais resultantes da simulação realizada com o código computacional, a linha laranja representa os volumes estimados pelo SAGREH e a linha verde traz os valores observados pelo monitoramento quantitativo do reservatório, ao final de cada ano. Nessa figura é possível notar que os modelos de simulação, do SAGREH e do método PM FAO-56, se comportam de modo muito semelhante para o cenário de aporte médio. No entanto, o método PM FAO-56 sempre estima valores maiores, pois considera no seu cálculo o aporte recebido do reservatório Orós nos períodos de estiagem.

Outro ponto a ser observado, é que o reservatório Lima Campos sofreu vários anos de seca consecutivos, isso resultou num déficit de armazenamento, pois o aporte recebido do Orós não era suficiente para manter o equilíbrio do volume e atender as demandas (COGERH, 2016).

Figura 18 - Comparação do volume residual do reservatório estimado pelos métodos com o volume observado para o cenário de aporte médio.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Analisando a Tabela 7 é possível identificar que o método do SAGREH teve melhor desempenho, por gerar menor erro absoluto médio em comparação ao valor monitorado ($E_{\text{médio}} = 3.761.029 \text{ m}^3$). A diferença entre o modelo proposto e o volume observado ($E_{\text{médio}} = 11.564.416 \text{ m}^3$), pode ser explicada pelo método de cálculo do aporte, variável que representa

grande parte do balanço hídrico e que, nesta pesquisa, considerou todos as entradas do reservatório. Os anos nos quais o Orós liberou mais água resultaram num aumento do aporte médio para o segundo semestre, o que reflete diretamente no resultado da simulação de esvaziamento, ou seja, no volume que o açude consegue chegar ao final do ano.

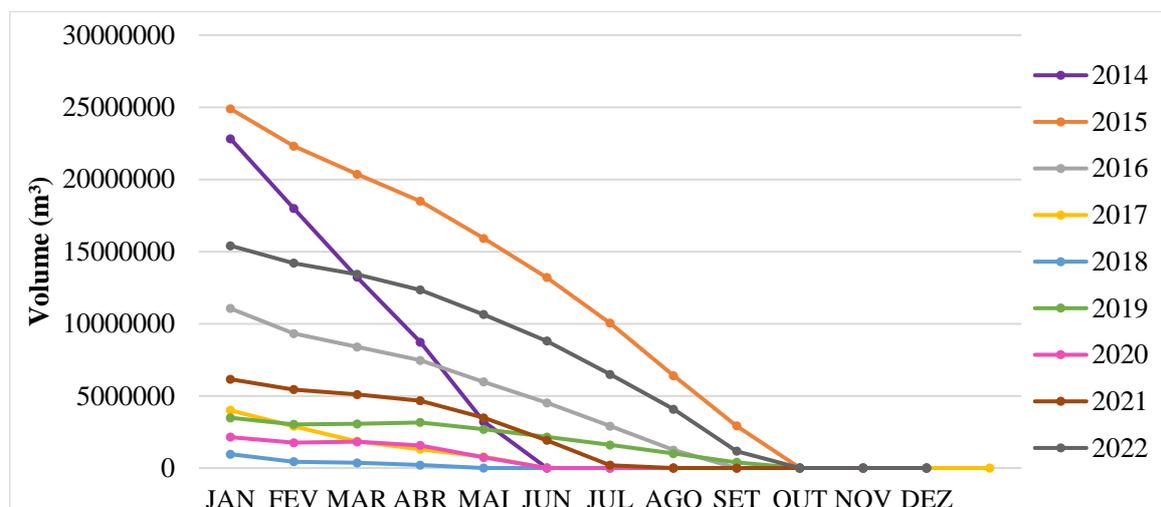
Tabela 7 - Erro absoluto entre as estimativas e o volume observado no monitoramento ao final de cada ano

Ano	Monitorado	PM FAO-56		SAGREH	
	Volume (m ³)	Vol. (m ³)	E _{absoluto} (m ³)	Vol. (m ³)	E _{absoluto} (m ³)
2014	27.918.248	0	27.918.248	0	27.918.248
2015	12.857.941	15.872.917	3.014.976	9.397.525	3.460.416
2016	4.022.847	19.252.425	15.229.578	7.783.876	3.761.029
2017	1.527.492	14.941.919	13.414.427	2.613.390	1.085.898
2018	3.946.487	15.510.903	11.564.416	4.522.655	576.168
2019	2.648.381	21.252.466	18.604.085	8.116.792	5.468.411
2020	7.788.259	14.315.036	6.526.777	5.304.073	2.484.186
2021	16.548.383	9.641.759	6.906.624	3.104.162	13.444.221
2022	22.414.596	12.473.950	9.940.646	7.053.926	15.360.670
		E_{médio} (m³)	11.564.416	E_{médio} (m³)	3.761.029

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

No caso da simulação de esvaziamento com o cenário do aporte mínimo, não foi possível realizar o mesmo gráfico comparativo dos volumes residuais ao final de cada ano, pois o volume era insuficiente para atender as demandas até o final do período de estiagem. Então optou-se por fazer o perfil de esvaziamento para avaliar até quando duraria a autonomia do reservatório. Observando a Figura 19, identifica-se que quando ocorrem os períodos de estiagem e o aporte não é suficiente, o reservatório não consegue manter volume residual até o final do período seco, sendo assim, fica impossibilitado de atender as demandas e depende das transferências para garantir segurança hídrica aos usuários.

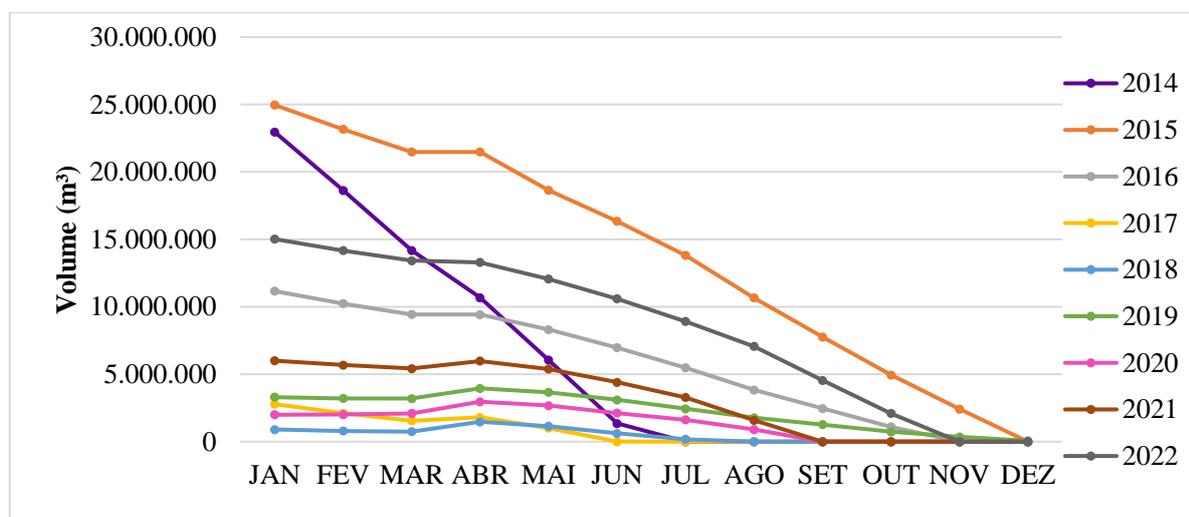
Figura 19 - Perfil de esvaziamento do reservatório Lima Campos com aporte mínimo calculado pelo método proposto (2014-2022)



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O aporte mínimo calculado pelo método proposto nesta pesquisa totalizou 1.499.070,79m³, enquanto o obtido pelo SAGREH foi de 2.120.826 m³, que é cerca de 30% a mais. Essa diferença reflete no comportamento do reservatório, antecipando em alguns meses a escassez de água. O perfil de esvaziamento do Lima Campos com aporte mínimo calculado pelo SAGREH, no período de 2014 a 2022, é apresentado na Figura 20. É possível observar que, mesmo com o aporte mínimo, no cenário simulado pelo SAGREH ainda há um ano que o reservatório consegue chegar ao final do ano com algum volume armazenado.

Figura 20 - Perfil de esvaziamento do reservatório Lima Campos com aporte mínimo calculado pelo SAGREH (2014-2022)



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os resultados apresentados mostram que a tomada de decisão em relação a operação de um reservatório emerge como um tema crucial no contexto da segurança hídrica. A escolha de uma metodologia deve ser cuidadosamente avaliada, levando em consideração não apenas as demandas imediatas por água, e os impactos de longo prazo sobre a disponibilidade hídrica na região, a escolha deve ser embasada em dados científicos consistentes, considerando as condições climáticas, as previsões de chuvas e a capacidade de recarga do reservatório, a fim de mitigar riscos relacionados à escassez de água e manter a harmonia entre as necessidades humanas e a preservação do ecossistema hídrico.

5. CONCLUSÃO

Sabe-se que o monitoramento e a adoção de ferramentas que auxiliem na tomada de decisões são de fundamental importância para a boa gestão dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica. A partir da pesquisa desenvolvida, foi possível aplicar dois métodos teóricos de estimativa da evaporação, por meio das equações de evapotranspiração de Penman-Montheith e Hargreaves.

A hipótese de que os métodos teóricos proporcionam estimativas de evaporação mais eficientes para a individualidade do reservatório foi validada, tendo em vista a percepção da maior sensibilidade dos métodos, em especial do método PM FAO-56, às variações climáticas locais.

As equações teóricas se mostraram como boas aliadas ao cálculo da evaporação. Por exigirem um número maior de variáveis em seu cálculo, enquanto a série de evaporação utilizada no SAGREH é baseada na observação do tanque classe A, os métodos teóricos conseguem acompanhar as mudanças do comportamento climático ao longo dos meses e anos.

Concluiu-se que, de modo geral, as séries de evaporação geradas apresentam diferenças significativas entre si. Entretanto essa diferença, deve-se ao fato de que o método de Hargreaves foi responsável pelos maiores valores evaporados, superestimando-os em relação à normal na maior parte da série. Enquanto a série gerada com o método PM FAO-56, não apresentou diferenças significativas com a normal climatológica, utilizada como padrão de evaporação no SAGREH. O somatório da evaporação anual obtido com o método PM FAO-56 foi, em média, 1994mm (2014-2022), enquanto o total anual utilizado nas simulações do SAGREH é de 1988mm.

As simulações de esvaziamento realizadas para validação com os dados do Portal Hidrológico, confirmaram que o método de esvaziamento do SAGREH teve o melhor desempenho, por gerar menor erro absoluto médio em comparação ao valor monitorado.

Diante dos resultados apresentados, entende-se que a modelagem da evaporação por meio das equações teóricas, é mais eficiente quando se trata de períodos específicos. No entanto, ao se trabalhar com médias anuais, ou períodos de tempo maiores, o SAGREH entrega resultados muito semelhantes e possui maior facilidade de aplicação.

A falta de informações detalhadas acerca do monitoramento quantitativo do reservatório mostrou-se como um grande limitador para a pesquisa, dificultando reproduzir cenários passados e provocando as principais mudanças no percurso da pesquisa. Além disso, a pouca

disponibilidade de documentação sobre o SAGREH impossibilitou que as simulações de esvaziamento pudessem ser replicadas com um cenário mais próximo do real.

Diante das limitações supracitadas, sugere-se que seja feito um estudo específico para o cálculo do aporte, melhorando a estimativa dessa variável, com o objetivo de proporcionar uma melhor validação do método, por meio da simulação de esvaziamento. Além disso, a previsão de cenários futuros para as variáveis envolvidas no cálculo da evapotranspiração pode ser uma importante ferramenta para prever o comportamento da evaporação ao longo dos meses, servindo como base para tomadas de decisões futuras. Sugere-se também que este estudo seja feito para outros reservatórios, de modo a avaliar como a distribuição espacial das EMA's e reservatórios influencia na estimativa da evaporação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília, DF, 432 p., 2013. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil_2013_Final.pdf. Acesso em: 02 abr. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação**. Relatório Final. Agência Nacional de Águas - Brasília: ANA, Engecorps Engenharia S.A., 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Resolução nº 1.938, de 30 de outubro de 2017**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/1938-2017.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Agência Nacional de Águas, Brasília, 2019.
- AHMADZADEH KOKYA, T.; PEJMAN, A. H.; MAHIN ABDOLLAHZADEH, E.; AHMADZADEH KOKYA, B.; NAZARIHA, M. Evaluation of salt effects on some thermodynamic properties of Urmia Lake water. **Int. J. Environ. Res.**, v. 5, n. 2, p. 343-348, 2011.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome, 1998.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista Da FAE**, v.20, n.1, p.129–137, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>.
- BACALHAU, J. R. **Simulação da disponibilidade hídrica e operação de reservatórios de abastecimento em relação à variabilidade Climática: bacia do rio Pirapama em Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências. Recife, 2015.
- BACK, A. J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da Evapotranspiração de Referência em Urussanga, SC. **Irriga**, v. 13, n. 4, p. 449-466, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n4p449-466>,
- BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Elementos de Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Blucher, 2022.

BECK, M.; BOKDE, N.; ASECIO-CORTÉS, G.; KULAT, K.D. R Package imputeTestbench to Compare Imputation Methods for Univariate Time Series. **The R Journal**, v.10, p.1-16, 2018.

BHATIA, N.; SRIVASTAV, R.; SRINIVASAN, K. Season-Dependent Hedging Policies for Reservoir Operation—A Comparison Study. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 10, p. 1311-1327, 22 set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10101311>.

BIER, A.A.; FERRAZ, S. E. T. Comparação de Metodologias de Preenchimento de Falhas em Dados Meteorológicos para Estações no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 215-226, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863220008>.

BRAGA, B.; CHARTRES, C.; COSGROVE, W.J.; CUNHA, L.V; GLEICK, P.H.; KABAT, P.; KADI, M.A.; LOUCKS, D.P.; LUNDQVIST, J.; NARAIN, S.; XIA, J. **Water and the future of humanity: Revisiting water security**. Springer International: Calouste Gulbenkian Foundation., 2014.

BRASIL. **Decreto nº 24.643**, de 10 de julho de 1934. Institui o Código das Águas. Rio de Janeiro, 1934.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. 36 ed. Brasília: Edições Câmara, 2012. 103p.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei Nº 9.433 / 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990. Diário Oficial da União, p. 20, 1997.

BRASIL. **Ministério da Integração Nacional. Projeto de Integração do Rio São Francisco: Relatório de Impacto Ambiental - RIMA**, 2004

CAMPOS, J. N. B. Modeling the Yield-Evaporation-Spill in the Reservoir Storage Process: The Regulation Triangle Diagram. **Water Resour Manage**, v. 24, n. 3487, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9616-x>.

CAMARGO, A. P. de. **Balço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1971. 28 p. (IAC. Boletim técnico, 116).

CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Uma Revisão Analítica da Evapotranspiração Potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125- 137, 2000.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p. 89–97, 1997.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 456-465, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/pat.v41i3.12760>.

CEARÁ. **Lei n.º 12.217, de 18 de novembro de 1993**. Cria a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), e dá outras providências. Diário Oficial do Estado do Ceará, nº 16.183(Parte I), p. 01, Ceará, 1993.

CEARÁ. **Lei n.º 14.844, de 28 de dezembro de 2010**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos - SIGERH, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado do Ceará, série 3, Ano I, nº 245, p. 01, Ceará, 2010.

CELESTE, A.; SANTANA, R. F., & SANTOS, W. M. Otimização Estocástica Dinâmica e Implícita para Operação de Reservatório: Estudo de Caso em Sergipe. **Ciência e Natura**, v.38 n.1, p.273-280, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X17169>.

CHODI, R. E.; SARCINELLE, O.; UEZU, A. Gestão dos recursos hídricos do sistema produtor de água Cantareira: um olhar para o contexto rural. **Ambiente & Água**, v. 8, n. 3, p. 151-165, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1162> .

COELHO FILHO, M. A.; PEREIRA, F. A. C.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; OLIVEIRA, G. X. S. **O processo de evapotranspiração**. 1. Ed. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnologia, 2011. 771 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/55930/1/IRRIGACAO-e-FERTIRRIGACAO-cap2.pdf>.

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará. **Ata da reunião de alocação negociada de água do reservatório Lima Campos**. Icó: COGERH, 2016.

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará. **Inventários Ambientais de Açudes da Bacia do Acaraú: Açude São Vicente**. COGERH, 2017. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2018/01/IVA-Sao-Vicente_PSH.pdf>.

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará. **Institucional**, 2022. Disponível em: < <https://portal.cogerh.com.br/institucional-cogerh/>>. Acesso em: 23 de mai. de 2022.

CORREA, M. J., LIMA, K. C., SILVA, J. M., MEDEIROS, G. C. Filling of faults in climatological air temperature series in brazilian state capitals from 1980 to 2017. **Revista Brasileira De Climatologia**, v. 29, p. 251–272, 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/15176>.

CORREIA, T. P.; DOHLER, R. E.; DAMBROZ, C. S.; BINOTI, D. H. B. Aplicação de Redes Neurais Artificiais no Preenchimento de Falhas de Precipitação Mensal na Região Serrana do Espírito Santo. **Geociências**, v. 35, n. 4, p.560-567, 2016.

CUNHA JÚNIOR, R. O.; FIRMINO, P. R. A. Simulação de valores ausentes em séries temporais de precipitação para avaliação de métodos de imputação. **Revista Brasileira De Climatologia**, v.30, n.18, p.691–714. Disponível em: <https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.15243>.

DALTON. Experimental essays on the constitution of mixed gases: On the force of steam or vapor from water or other liquids in different temperatures, both in a Torricelli vacuum and in air; on evaporation; and on expansion of gases by heat. **Manchester Literary Philosophical Society Mem. Proceedings**, (5): 536–602, 1802.

DANTAS, S. P. **Açudagem no nordeste brasileiro e no Ceará: estimativa de evaporação do açude Castanhão em um ano seco**. 2017. 196 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

DE OLIVEIRA, M. L. V. M. Gestão de águas, territórios e desenvolvimento econômico. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v.11, n.27, pp.42-61, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v11i27.3825>.

DIAS, N.L.C.; KELMAN, J. Comparações entre modelos climatológicos e o uso de tanque classe A para estimar a evaporação no reservatório de Sobradinho. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 7., 1987, Salvador, BA. **Anais[...]** São Paulo: ABRH, v. 2, p. 162-169,1987.

DINGMAN, S. L. **Physical hydrology**, 3ª Ed. Long Grove: Waveland press, 2015.

DOORENBOS J.; PRUITT W.O. Guidelines for prediction of crop water requirements. **FAO Irrig. and Drain**. v.24, 1977.

FASAKHODI, A.; NOURI, S.; AND AMINI, M. Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems: A multi-objective fractional goal programming approach. **Water Resources Management**, v. 24, p. 4639–4657, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9683-z>.

FAVERO, L. P; BELFIORE, P. Pesquisa Operacional para cursos de engenharia. Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2013.

FONTES, A. S. **Estudo da evaporação em reservatórios situados em região semi-árida: uso de bacia experimental**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005.

- FURTADO, L. L. S; CAMPOS, J. N. B. Manejo e cobrança de água no sistema de vazanteiros e irrigantes no sistema Orós-Lima Campos. *In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 12., 1997, Vitória . **Anais [...]**, Vitória-ES: ABRH, 1997.
- GARJULLI, R.; OLIVEIRA, J.L.F.; SILVA, U.P.A. **Proposta metodológica para organização de usuários de água** – a experiência do Ceará. Fortaleza: Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará, 2003.
- GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- GOLDBACH, A.; KUTTLER, W. Turbulent heat fluxes above a suburban reservoir: a case study from Germany. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 1, p. 244- 260, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0159.1>.
- GU, W.; SHAO, D.; TAN, X.; SHU, C.; WU, Z. Simulation and Optimization of Multi-Reservoir Operation in Inter-Basin Water Transfer System. **Water Resources Management**, v. 31, n. 11, p. 3401–3412, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1675-9>.
- Guimarães, P. R. B. **Análise de Correlação e medidas de associação**. Universidade Federal do Paraná, 2017.
- HARGREAVES, G.H. **Precipitation dependability and potentials for an agricultural production for Northeast Brazil**. Cusushash: EMBRAPA and Utah State University, 123p, 1974.
- INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. **Perfil Municipal 2017**: Icó. Fortaleza: IPECE, 2017
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Normais Climatológicas (1961 –1990)**. Brasília - DF, 1992.
- JACOBI, P. R.; EMPINOTTI, V. L.; SCHMIDT, L. Escassez hídrica e direitos humanos. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 19, p. 00-00, 2016.
- JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. **Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements**. 2 ed. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2016.
- LIANQING, X.; YONGKUN, L.; ZHENGHANG, F.; JIEYOU, L. Optimal utilization simulation and decision making on water resources system. **Procedia Environmental Sciences**, v. 12, p. 1097-1103, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.393> .
- LOPES, A. Drenagem e acumulação de ar frio em noites de arrefecimento radiativo. Um exemplo no vale de Barcarena (Oeiras). **Finisterra**, v. 30, n. 59/60, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.18055/Finis1820>.

- LOPES, A. V.; FREITAS, M. A. S. A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos: experiências brasileiras. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 4, n. 1, p. 6-28, 2007.
- LU, J.; SUN, G.; MCNULTY, G.; AMATYA, MD. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States 1. **JAWRA - Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 3, p. 621-633, 2005.
- MACHIWAL, D.; JHA, M. K. **Hydrologic time series analysis: theory and practice**. Springer Science & Business Media, 2012.
- MALHOTRA, N. **Pesquisa de marketing**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- MCJANNET, D. L.; HAWDON, A.; NIEL, T. V., BOADLE, D., BAKER, B., TREFRY, M., REA, I. Measurements of evaporation from a mine void lake and testing of modelling approaches. **Journal of Hydrology**, v. 555, p. 631-647, 2017. DOI: Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.064> . Acesso em: 18 ago. 2023.
- MEDEIROS, A. D. L. de M. **Avaliação de métodos de estimativa de evaporação no reservatório armando Ribeiro Gonçalves em Itajá/RN**. 2019. 45f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, Centro de Engenharias e Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/3520>. Acesso em: 27 mar. 2023.
- MELLO, Y. R., KOHLS, W.; OLIVEIRA, T. M. N. Uso de diferentes métodos para o preenchimento de falhas em estações pluviométricas. **Boletim de Geografia**, v. 35, n.1, p.112-121, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v35i1.30893>.
- MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas: I conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 21-44, 1997.
- MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. Evaporação em Lagos e Reservatórios. In: TOLRINO, A.R.V., *et al.* **Coletânea a Conferência da Terra: línguas, ritos e protagonismos nos territórios indígenas**: planejamento ambiental, recursos hídricos e patrimônio cultural (Tomo III). 1ed. Boa Vista: Editora da Universidade Federal de Roraima, 2020, v. 3, p. 88-97.
- MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do pequeno açude**: construir, conservar e aproveitar pequenos açudes no Nordeste brasileiro. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, Recife (Brasil). Diretoria de Planejamento Global, 1992.
- MORITZ, S.; BARTZ-BEIELSTEIN, T. imputeTS: Time Series Missing Value Imputation in **R. R Journal**, v. 9, n. 1, p. 207, 2017.
- NUNES, T. H. C.; GALVÃO, C. O.; RÊGO, J. C. Rule curve for seasonal increasing of water concessions in reservoirs with low regularized discharges. **Revista Brasileira de Recursos**

Hídricos, v. 21(3), p. 493–501, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011615146>.

OLIVEIRA, M. C. **Modelos de alocação e realocação de água: um estudo de caso do programa "águas do vale" nos rios Jaguaribe e Banabuiú**. 2008. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão dos Recursos Hídricos e Infraestrutura Hidráulica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

OLIVEIRA FILHO, R. L. **Metodologia de elaboração de base de informações para alocação negociada de água: aplicação no Açude Arneiroz II**. 2013. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

OLIVEIRA, C. W. **Uso de lisímetro de pesagem de precisão para determinação da evapotranspiração no Estado do Ceará**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1997.

OLIVEIRA, L.F.C.; FIOREZE, A.P.; MEDEIROS, A.M.M.; SILVA, M.A.S. S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001100008>.

ONU - Organização das Nações Unidas Brasil. (2023). **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 14 de junho de 2023.

PAULINO, W. D. **Simulação de esvaziamento de reservatórios empregando o Microsoft Excel**. 1. Ed. Fortaleza: COGERH, 1997.

PAULINO, W. D. **SAGREH 2007 - Sistema de Apoio ao Gerenciamento dos Recursos Hídricos**. Fortaleza: COGERH, 2006.

PENG, Y.; CHU, J.; PENG, A.; ZHOU, H. Optimization operation model coupled with improving water-transfer rules and hedging rules for inter-basin water transfer-supply systems. *Water Resources Management*, v. 29, n. 10, p. 3787–3806, 2015. Disponível em: [10.1007/s11269-015-1029-4](https://doi.org/10.1007/s11269-015-1029-4). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1029-4>.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

PENMAN, H. L. Evaporation over the British Isles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 76, n. 330, p. 372-383, 1950.

PENMAN, H. L. Experiments on irrigation of sugar beet. **The Journal of Agricultural Science**, v. 42, n. 3, p. 286-292, 1952.

PEREIRA, F. A. C. **Uma análise computacional e geo espacial do sistema hídrico do Complexo Portuário do Pecém**. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11443/1/2014_dis_facpereira.pdf>.

PEREIRA, D. R.; YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. S.; SILVA, L. A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2488 – 2493, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cr/v39n9/a376cr1581.pdf>.

PEREIRA, G. R.; CUELLAR, M. D. Z. Conflitos pela água em tempos de seca no Baixo Jaguaribe, Estado do Ceará. **Estudos Avançados**. v. 29, n. 84, p.115- 137, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142015000200008>.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da; RAMOS, M. M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 346-352, jun. 2009.

PINHEIRO, M.I.T. **Tipologia de conflitos de usos das águas: estudos de casos no estado do Ceará**. 2002. 155 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) — Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/18520/1/2002_dis_mitpinheiro.pdf.

PINHEIRO, M. I. T.; CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. Conflitos por águas e alocação negociada: o caso do vale dos Carás no Ceará. **Rev. Adm. Pública**, v. 45, n. 6, 2011.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Rev.**, v.100, p. 81-92, 1972.

PORTAL HIDROLÓGICO DO CEARÁ - HIDRO. **Ficha Técnica Lima Campos**. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Governo do Estado do Ceará: Fortaleza, 2023. Disponível em: <http://www.funceme.br/hidro-ce-zend>. Acesso em: 18 jan 2023.

RABELO, N. N. **Análise da Segurança Hídrica no Estado do Ceará: Subsídios para o Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos**. 2022. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/63655/1/2022_tese_nnrabelo.pdf.

- RABELO, U. P. **Segurança Hídrica no Ceará: Análise de Cenários e de Alternativas de Intervenção**. 2017. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/25080>. Acesso em: 13 jun. 2022.
- RANI, D.; MOREIRA, M. M. Simulation-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. **Water Resources Management**, v. 24, n. 6, p. 1107–1138, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9488-0> . Acesso em: 18 ago. 2023.
- RIBEIRO, W. Dossiê: água, política e natureza. *Ambientes*. **Revista de Geografia e Ecologia Política**, v.1(2), p. 9 – 10, 2019.
- RIBEIRO, W. C.; SANTOS, C. L. S. dos; SILVA, L. P. B. da. Conflito pela água, entre a escassez e a abundância: Marcos teóricos. **AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política**, v. 1, n. 2, p. 11, 2019. Disponível em: <https://saber.unioeste.br/index.php/ambientes/article/view/23619>. Acesso em: 27 ago. 2023.
- ROA-GARCÍA, M.C. Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: Trade-offs in a full world. **Water Alternatives**, v. 7, n. 2, p. 298-319, 2014.
- RODRIGUES, R. M.; SILVEIRA, C. S.; RODRIGUES, L. M.; SILVA, R. F.; FERREIRA, U. C. Q.; BRAGA, B. B. Análise da operação de reservatórios na Bacia do Acaraú: Estudo de caso nos açudes Ayres de Sousa e Taquara. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE*, 1., 2016, João Pessoa. **Anais[...]** João Pessoa: Ecogestão Brasil, v. 6, p. 1235 – 1244, 2016.
- R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023. URL: <<https://www.R-project.org/>>.
- RSTUDIO TEAM. **RStudio**: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA, 2023. URL: <http://www.rstudio.com>.
- SABINO, M.; SOUZA, A. P. Gap-filling meteorological data series using the GapMET software in the state of Mato Grosso, Brazil. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**, v.27, n.2, p.149–156, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p149-156>.
- SADEGH, M.; MAHJOURI, N.; KERACHIAN, R. Optimal inter-basin water allocation using crisp and fuzzy Shapley games. **Water Resources Management**, v. 24, p. 2291-2310, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9552-9>.

SADOF, C. W.; BORGOMEIO, E.; UHLENBROOK, S. Rethinking water for SDG 6. **Nature Sustainability**, v.3, p. 346–347, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0530-9>.

SANDERSON, Marie. The climates of Canada according to the new Thornthwaite classification. **Scientific Agriculture**, v. 28, n. 11, p. 501-517, 1948.

SILANS, A. M. B. P. Redução de evaporação de açudes – o estado da arte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 101-109, João Pessoa, 2003.

SILVA, K. O.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; FOLEGATTI, M. V. Análise de métodos de estimativa de evapotranspiração na otimização de sistemas de drenagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 161-165, jun. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000200002>.

SILVA, L. M. C.; MONTEIRO, R.A. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens. In: MACHADO, C.J.S. (Org.). **Gestão de águas doces: usos múltiplos, políticas públicas e exercício da cidadania no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência. cap. 5, p. 135-178, 2004.

SILVA, S. M. O.; SOUZA, F. A.; AQUINO, S. H. S. Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: o caso do Sistema Jaguaribe–Metropolitano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 493–503, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017161303>.

SILVA, U. P. A.; COSTA, A. M.; LIMA, G. P. B.; LIMA, B. P. A experiência da alocação negociada de água nos vales do Jaguaribe e Banabuiú. In: VIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2007, Gravatá. **Anais [...]** Gravatá: ABRH, 2007.

SMADHI, D. Evapotranspiration potentielle et besoins en eau de la culture du blé dur dans la région de Sétif (cas du bassin versant de Boussellam). **Rev. Recherche Agronom**, v. 3, p. 29-40, 2000.

SOUSA, A. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman: o que medem e em que situações devem ser utilizados? **Correio dos Açores: Matemática**, p. 19, 2019.

SOUSA, I. F.; SILVA, V. P. R.; SABINO, F. G.; NETTO, A. O. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. V. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 6, p. 633-644, 2010.

SOUSA, R. A.; COSTA, C. T. F.; TAVARES, P. R. L.; SILVA, T. A.; OLIVEIRA, I. A. P. O.; ALMEIDA JÚNIOR, F. J. Cálculo da Evapotranspiração Potencial utilizando Métodos

Empíricos baseados em dados meteorológicos na Região do Cariri estado Ceará. *In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 2009, Campo Grande. **Anais [...]** Campo Grande: ABRH, 2009.

SOUZA FILHO, F. A. **Alocação de água sazonal e anual: Modelos matemáticos, experimentação comportamental e justiça alocativa**. 2005. 439p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B. Análise comparativa dos métodos de Hargreaves e Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração potencial: um estudo de caso. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 13., 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABRH, 1999.

TAO, H., DIOP, L., BODIAN, A., DJAMAN, K., NDIAYE, P. M., & YASEEN, Z. M. Reference evapotranspiration prediction using hybridized fuzzy model with firefly algorithm: Regional case study in Burkina Faso. **Agricultural Water Management**, v. 208, p. 140–151, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.018>.

THORNTHWAITE, C. W. The Moisture Factor in Climate. **Am Geophys Union Trans.**, v. 27, p. 41 –48, 1946.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, 38(1), p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. Centerton, 1957.

THORNTHWAITE, C.W.; WILM, H.G. Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration, 1943- 1944. Washington, **D.C.: Transactions of the American Geophysical Union**, 1944. p.686-693.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. Earth's global energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, n. 3, p. 311, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>.

TU, M. Y.; HSU, N. S.; YEH, W. W. G. Optimization of reservoir management and operation with hedging rules. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 2, p. 86–97, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:2\(86\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:2(86)).

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

VIEIRA, N. P. A. **Estimativa da evaporação nos reservatórios de Três Marias – MG e Sobradinho – BA**. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade

- Federal de Viçosa, Viçosa. 2015. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7335>. Acesso em: 13 mar. 2023.
- WANG, H.; YAN, D. H.; JIA, Y. W.; HU, D. L. Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues. **Wang, L.-H. Advances in Water Science**. v. 21, Issue 4, p.479-489, 2010.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **2.1 billion people lack safe drinking water at home, more than twice as many lack safe sanitation**. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/12-07-2017-2-1-billion-people-lack-safe-drinking-water-at-home-more-than-twice-as-many-lack-safe-sanitation> . Acesso em: 24 ago. 2023.
- WU, L.; BAI, T.; HUANG, Q.; WEI, J.; LIU, X. Multi-objective optimal operations based on improved NSGA-II for Hanjiang to Wei River Water Diversion Project, China. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 6, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11061159>.
- WURBS, R. A. Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability. **Journal of Hydrology**, v.300(1-4), p. 100-113, 2005.
- WURBS, R. A.; AYALA, R. A. Reservoir evaporation in Texas, USA. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 1-9, 2014.
- XIA, J., ZHANG, Y., XIONG, L., HE, S., WANG, L., YU, Z. Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China. **Sci. China Earth Sci**. v.60, p.652–658, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11430-016-0111-8>.
- YANG, D., YANG, Y., XIA, J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. **Geography and Sustainability**, v.2 (2), p. 115-122, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>.
- ZENERE, P. V. S.; VENTURA, T. M.; GOMES, R. S. R.; RODRIGUES, T. R. Uso de árvore de decisão para escolha de método de preenchimento de falhas em dados meteorológicos. *In: BRAZILIAN E-SCIENCE WORKSHOP (BRESOI)*, 14, 2020, Cuiabá. **Anais [...]**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, p. 89-96, 2020.
- ZENG, X.; HU, T.; GUO, X.; LI, X. Water Transfer Triggering Mechanism for Multi-Reservoir Operation in Inter-Basin Water Transfer-Supply Project. **Water Resources Management**, v. 28, n. 5, p. 1293–1308, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0541-2>.
- ZHANG, X. *et al.* Urban drought challenge to 2030 sustainable development goals. **Science of the Total Environment**, v. 693, p. 133536, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.342>.

ZHAO, L.; XIA, J.; XU, C-Y.; WANG, Z.; SOBKOWIAK, L.; LONG, C. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. **Journal Of Geographical Sciences**, v. 23, n. 2, p. 359-369, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11442-013-1015-9>.

ZHU, X.; ZHANG, C.; YIN, J.; ZHOU, H.; JIANG, Y. Optimization of water diversion based on reservoir operating rules: Analysis of the biliu river reservoir, China. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 2, p. 411–421, 2014. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000805](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000805).

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Erros (MAE e RMSE) encontrados para cada método de imputação das variáveis de Temperatura(°C), Temperatura máxima(°C), Temperatura Mínima(°C), pressão atmosférica (kPa), umidade relativa (%), velocidade do vento (m/s) e radiação (Mj/m².dia), na estação automática de Iguatu-CE (junho de 2007 a dezembro de 2022). Os melhores valores estão destacados em negrito.

% Falhas	Método	TEMPERATURA		TEMPERATURA MÁXIMA		TEMPERATURA MÍNIMA		PRESSÃO		UMIDADE RELATIVA		VELOCIDADE DO VENTO		RADIÇÃO	
		MAE (°C)	RMSE (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	MAE (kPa)	RMSE (kPa)	MAE (%)	RMSE (%)	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	MAE (Mj/m ² .dia)	RMSE (Mj/m ² .dia)
10%	interp_linear	0,0390	0,1861	0,0337	0,1616	0,0342	0,1669	0,0016	0,0072	0,1752	0,8805	0,0505	0,2321	0,1557	0,7634
	interp_stine	0,0377	0,1816	0,0317	0,1540	0,0323	0,1598	0,0014	0,0062	0,1687	0,8581	0,0504	0,2332	0,1566	0,7691
	interp_spline	0,0407	0,1945	0,0329	0,1572	0,0327	0,1616	0,0012	0,0054	0,1829	0,9115	0,0592	0,2718	0,1888	0,9266
	ma_simple	0,0926	0,3871	0,0921	0,3785	0,0896	0,3794	0,0061	0,0244	0,4206	1,7714	0,0696	0,2997	0,1652	0,7656
	ma_linear	0,0758	0,3218	0,0745	0,3112	0,0729	0,3134	0,0049	0,0195	0,3449	1,4822	0,0625	0,2719	0,1588	0,7433
	ma_exponential	0,0608	0,2654	0,0585	0,2517	0,0578	0,2552	0,0036	0,0148	0,2763	1,2331	0,0568	0,2508	0,1552	0,7351
	mean_median	0,3115	1,1774	0,3221	1,2074	0,2940	1,1231	0,0189	0,0741	1,7108	6,4419	0,7754	10,0345	0,3853	1,6566
	mean_mode	0,3971	1,5878	0,4312	1,7156	0,3521	1,4270	0,0193	0,0761	1,8993	7,4099	0,8115	10,0157	0,5423	2,1654
	mean_harmonic	0,3119	1,1846	0,3230	1,2175	0,2941	1,1283	0,0189	0,0741	1,8604	6,9659	-	-	0,3854	1,6659
	mean_geometric	0,3115	1,1768	0,3222	1,2093	0,2941	1,1214	0,0189	0,0741	1,7529	6,5524	-	-	0,3905	1,6167
	seadec_ma	0,0397	0,1896	0,0345	0,1669	0,0360	0,1761	0,0021	0,0093	0,1979	0,9879	0,0570	0,2518	0,1608	0,7613
	seadec_locf	0,0471	0,2322	0,0409	0,2032	0,0421	0,2142	0,0032	0,0144	0,2341	1,2147	0,0714	0,3132	0,1934	0,9345
	seadec_interp	0,0369	0,1800	0,0309	0,1516	0,0315	0,1580	0,0014	0,0066	0,1782	0,9144	0,0544	0,2460	0,1641	0,7966
	seadec_mean	0,1669	0,6501	0,1688	0,6517	0,1597	0,6186	0,0177	0,0696	1,2995	4,7946	0,8722	10,0112	0,4091	1,5980
	seasplit_interp	0,0856	0,3892	0,0817	0,3778	0,0841	0,3851	0,0180	0,0701	0,4849	2,2384	0,1309	0,5770	0,2253	1,0114
	seasplit_locf	0,1031	0,4691	0,0988	0,4581	0,1011	0,4638	0,0184	0,0724	0,5883	2,7284	0,1762	0,8663	0,2688	1,2251
	seasplit_mean	0,1857	0,7503	0,1885	0,7544	0,1787	0,7168	0,0178	0,0698	1,3623	5,1537	0,8724	10,0125	0,4093	1,6054
seasplit_ma	0,0826	0,3706	0,0793	0,3622	0,0813	0,3665	0,0132	0,0516	0,4749	2,1582	0,1198	0,5715	0,2201	0,9571	
20%	interp_linear	0,0850	0,2866	0,0744	0,2520	0,0751	0,2613	0,0038	0,0121	0,3803	1,3529	0,1045	0,3396	0,3187	1,0863
	interp_stine	0,0814	0,2775	0,0691	0,2375	0,0704	0,2483	0,0032	0,0104	0,3622	1,3098	0,1043	0,3417	0,3212	1,0973
	interp_spline	0,0869	0,2950	0,0710	0,2402	0,0710	0,2498	0,0026	0,0083	0,3908	1,3904	0,1233	0,4015	0,3941	1,3383

% Falhas	Método	TEMPERATURA		TEMPERATURA MÁXIMA		TEMPERATURA MÍNIMA		PRESSÃO		UMIDADE RELATIVA		VELOCIDADE DO VENTO		RADIÇÃO	
		MAE (°C)	RMSE (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	MAE (kPa)	RMSE (kPa)	MAE (%)	RMSE (%)	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	MAE (Mj/m ² .dia)	RMSE (Mj/m ² .dia)
	ma_simple	0,1919	0,5696	0,1906	0,5568	0,1853	0,5567	0,0125	0,0354	0,8649	2,6011	0,1417	0,4303	0,3327	1,0916
	ma_linear	0,1581	0,4776	0,1552	0,4615	0,1518	0,4640	0,0100	0,0286	0,7136	2,1937	0,1276	0,3922	0,3208	1,0606
	ma_exponential	0,1292	0,4018	0,1242	0,3818	0,1226	0,3860	0,0077	0,0223	0,5812	1,8600	0,1168	0,3646	0,3147	1,0507
	mean_median	0,6231	1,6646	0,6440	1,7063	0,5880	1,5886	0,0377	0,1047	3,4231	9,1071	1,5685	14,2502	0,7678	2,3132
	mean_mode	0,7918	2,2484	0,8622	2,4483	0,7042	2,0174	0,0386	0,1073	3,7818	10,4406	1,6407	14,2244	1,2463	3,3247
	mean_harmonic	0,6239	1,6743	0,6459	1,7204	0,5882	1,5957	0,0377	0,1047	3,7243	9,8543	-	-	0,7681	2,3263
	mean_geometric	0,6231	1,6637	0,6441	1,7089	0,5882	1,5860	0,0377	0,1047	3,5088	9,2666	-	-	0,7779	2,2595
	seadec_ma	0,0821	0,2761	0,0715	0,2428	0,0744	0,2578	0,0045	0,0143	0,4068	1,4319	0,1168	0,3643	0,3277	1,0961
	seadec_locf	0,0988	0,3422	0,0862	0,3016	0,0891	0,3202	0,0071	0,0232	0,4904	1,7879	0,1474	0,4590	0,3923	1,3502
	seadec_interp	0,0771	0,2637	0,0650	0,2235	0,0663	0,2353	0,0030	0,0101	0,3704	1,3375	0,1110	0,3558	0,3345	1,1418
	seadec_mean	0,3347	0,9197	0,3379	0,9218	0,3196	0,8741	0,0355	0,0983	2,5978	6,7839	1,7608	14,2186	0,8134	2,2426
	seasplit_interp	0,0856	0,5596	0,1663	0,5430	0,1708	0,5521	0,0342	0,0950	0,9866	3,2310	0,2594	0,8248	0,4608	1,4437
	seasplit_locf	0,1031	0,6734	0,2011	0,6554	0,2057	0,6637	0,0350	0,0991	1,1974	3,9313	0,3583	1,3160	0,5557	1,7345
	seasplit_mean	0,1857	1,0600	0,3772	1,0683	0,3571	1,0143	0,0356	0,0986	2,7231	7,2926	1,7617	14,2202	0,8153	2,2476
	seasplit_ma	0,0826	0,5341	0,1613	0,5204	0,1650	0,5263	0,0264	0,0733	0,9652	3,1130	0,2467	0,8427	0,4493	1,3751

Nota: MAE – Erro absoluto médio; RMSE - raiz do erro quadrático médio.

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

APÊNDICE B

Figura B.1 - Erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada método de imputação da variável Temperatura Mínima (°C)

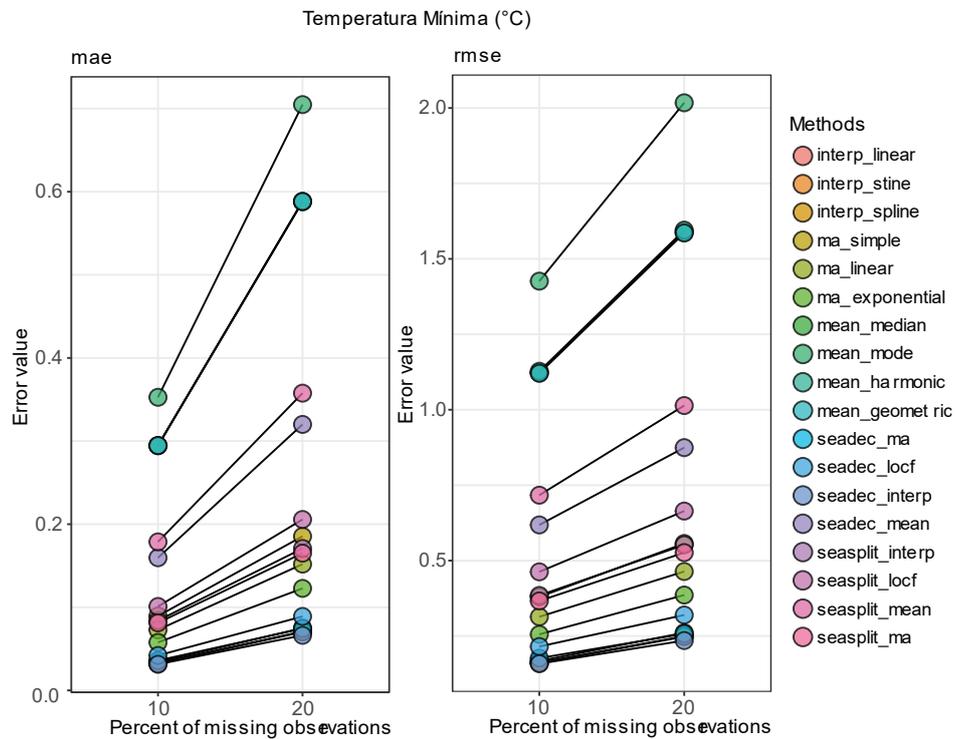


Figura B.2 - Erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada método de imputação da variável Temperatura Máxima (°C)

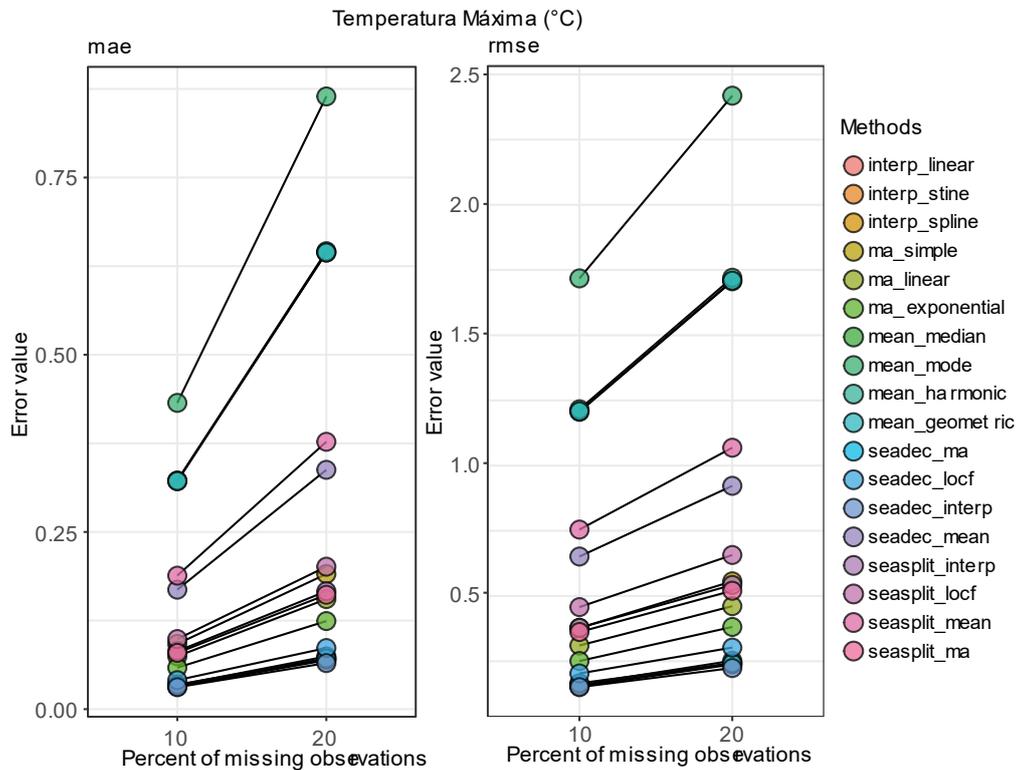


Figura B.3 - Erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada método de imputação da variável umidade relativa (%)

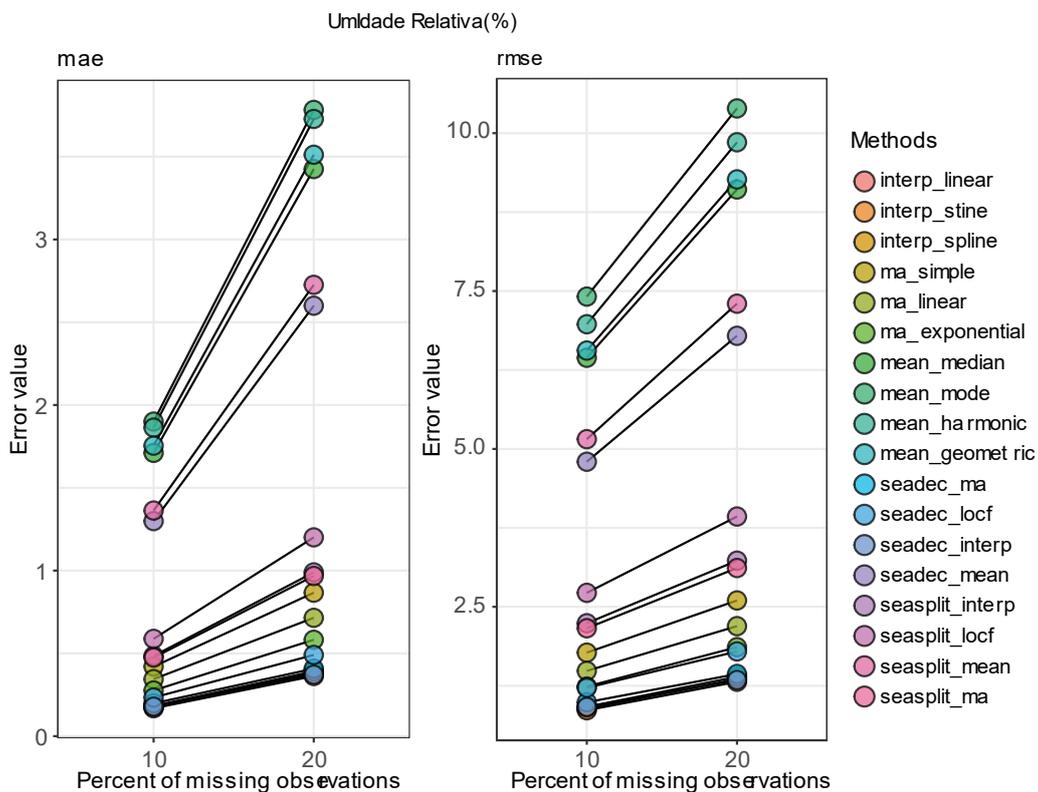


Figura B.4 - Erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada método de imputação da variável velocidade do vento (m/s)

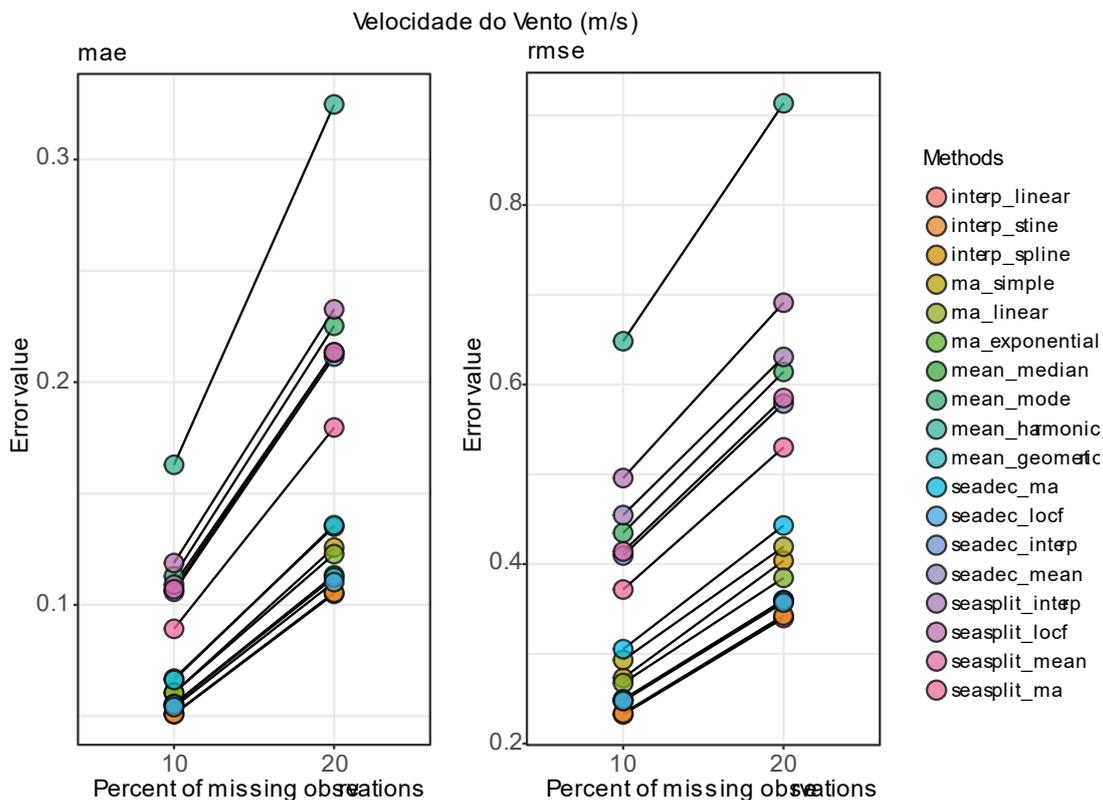
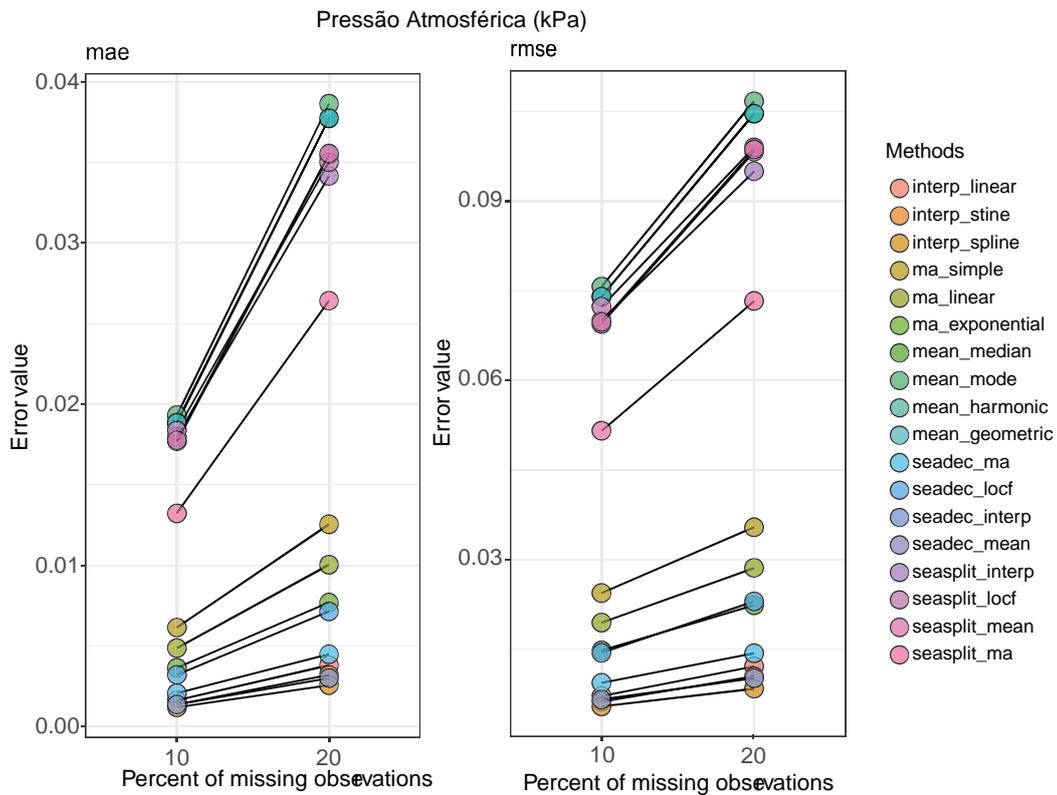


Figura B.5 - Erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada método de imputação da variável Pressão atmosférica (kPa)



APÊNDICE C

Figura C.1 – Comparativo dos métodos de cálculo da Evaporação para os anos 2014-2017.

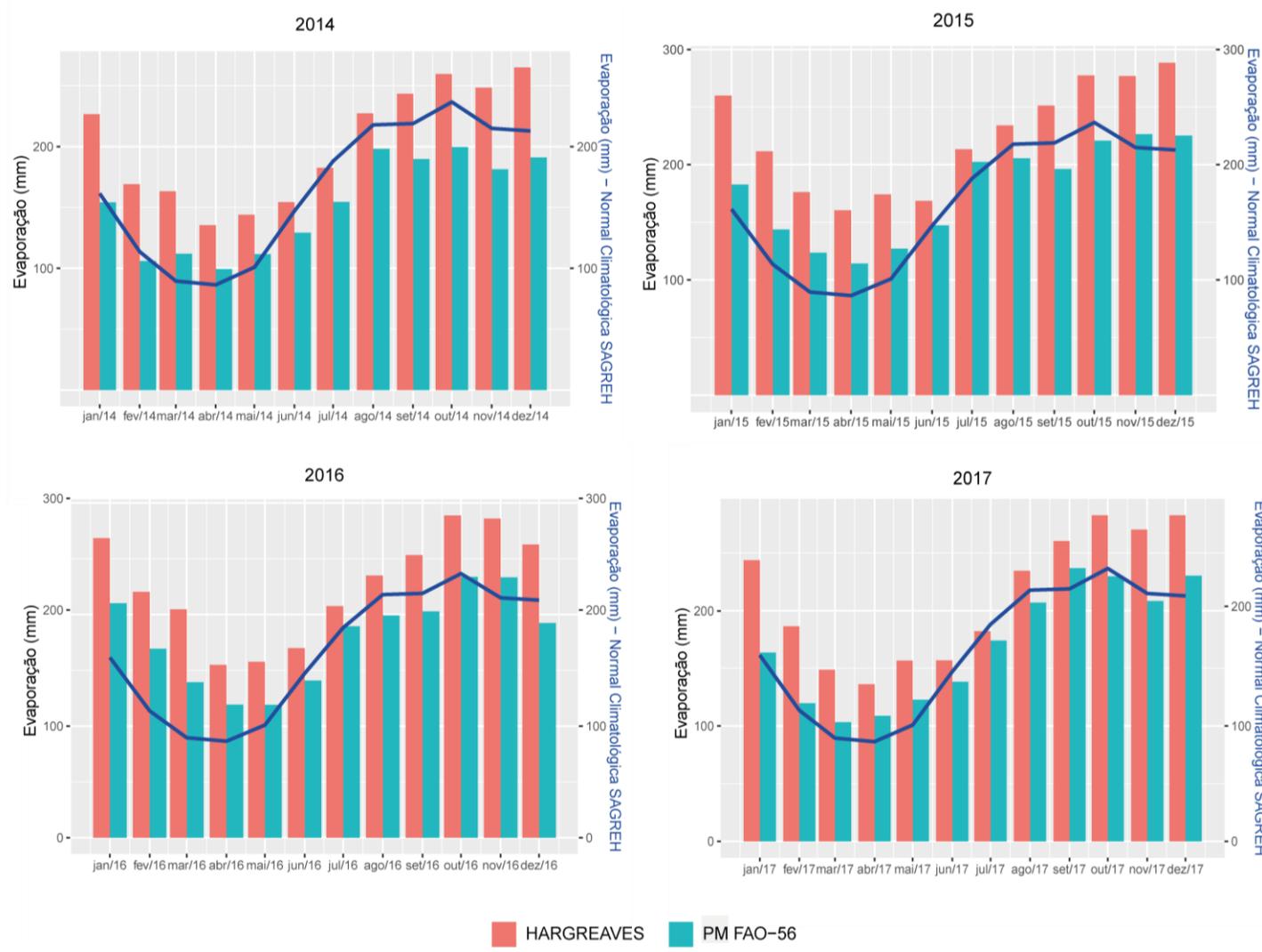
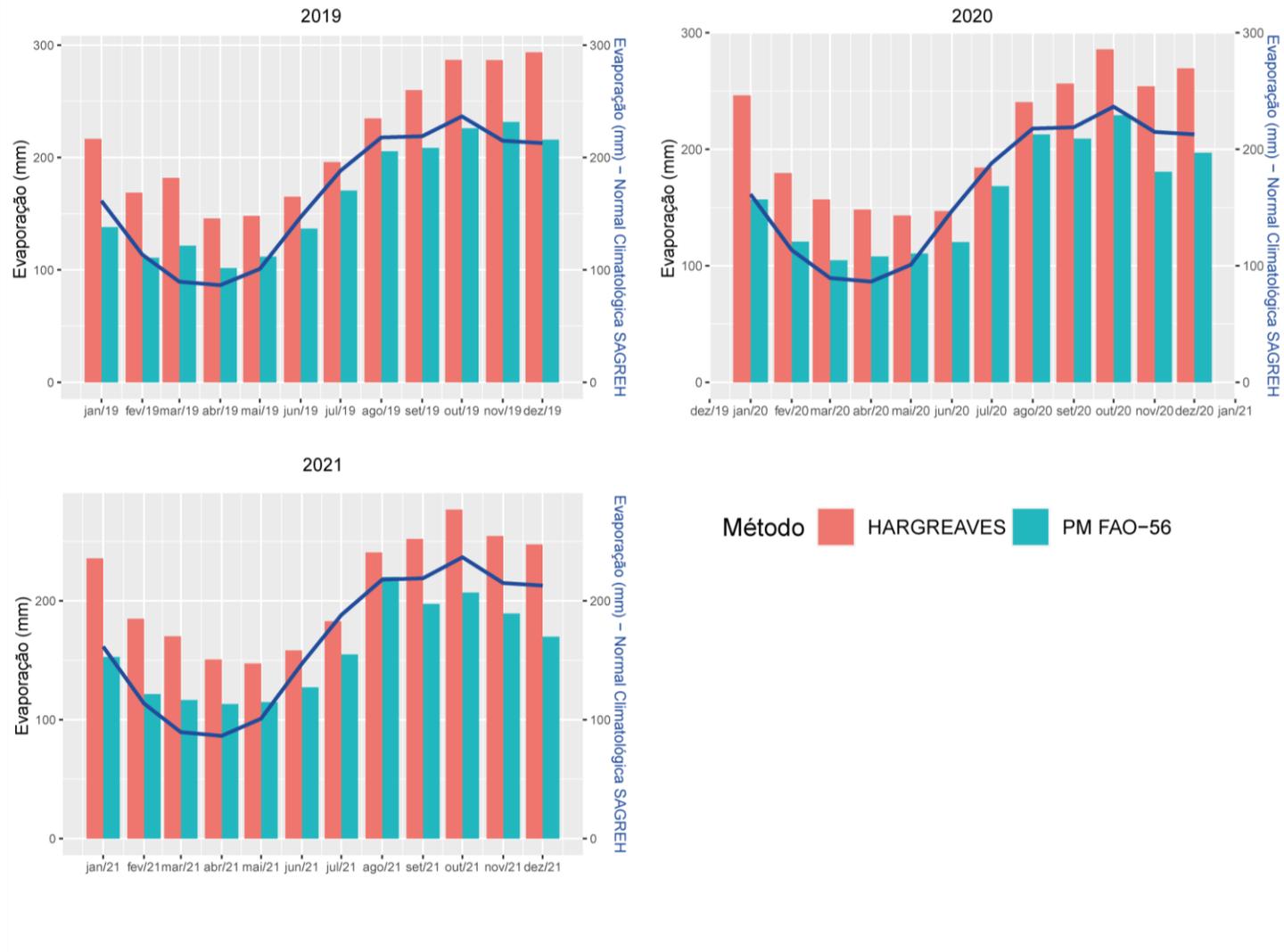


Figura C.2 – Comparativo dos métodos de cálculo da Evaporação para os anos 2019, 2020 e 2021.



ANEXO A

Tabela A 1 - Fator de correção da evapotranspiração de referência em mm por mês, método de Hargreaves.

Latitude	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
-1	2,29	2,12	2,35	2,2	2,14	1,99	2,09	2,22	2,26	2,36	2,23	2,27
-2	2,32	2,14	2,36	2,18	2,11	1,96	2,06	2,19	2,25	2,37	2,26	2,3
-3	2,35	2,15	2,36	2,17	7,08	1,92	2,03	2,17	2,25	2,39	2,29	2,34
-4	2,39	2,17	2,36	2,15	2,05	1,39	1,99	2,15	2,24	2,4	2,32	2,37
-5	2,42	2,19	2,36	2,13	2,02	1,85	1,96	2,17	2,23	2,41	2,34	2,41
-6	2,45	2,21	2,36	2,12	1,99	1,82	1,93	2,1	2,23	2,42	2,37	2,44
-7	2,48	2,22	2,36	2,1	1,96	1,78	1,89	2,08	2,22	2,43	2,4	2,48
-8	2,51	2,24	2,36	2,08	1,93	1,75	1,86	2,06	2,21	2,44	2,42	2,51
-9	2,54	2,25	2,36	2,06	1,9	1,71	1,82	2,03	2,2	2,45	2,45	2,54
-10	2,57	2,27	2,36	2,04	1,86	1,69	1,79	2	2,19	2,46	2,47	2,58
-11	2,6	2,28	2,35	2,02	1,83	1,64	1,75	1,98	2,18	2,47	2,5	2,61
-12	2,62	2,29	2,35	2	1,8	1,61	1,72	1,95	2,17	2,48	2,52	2,64
-13	2,65	2,31	2,35	1,98	1,77	1,57	1,68	1,92	2,16	2,48	2,54	2,67
-14	2,68	2,32	2,34	1,96	1,73	1,54	1,65	1,89	2,14	2,49	2,57	2,71
-15	2,71	2,33	2,33	1,94	1,7	1,5	1,61	1,87	2,13	2,5	2,59	2,74
-16	2,73	2,34	2,33	1,91	1,67	1,46	1,58	1,84	2,12	2,5	2,61	2,77
-17	2,76	2,35	2,32	1,89	1,63	1,43	1,54	1,81	2,1	2,5	2,53	2,8
-18	2,79	2,36	2,31	1,8	1,6	1,39	1,5	1,79	2,09	2,51	2,65	2,83
-19	2,81	2,37	2,3	1,84	1,56	1,35	1,47	1,75	2,03	2,51	2,67	2,86
-20	2,84	2,38	2,29	1,82	1,53	1,32	1,43	1,72	2	2,51	2,69	2,86
-21	2,86	2,38	2,28	1,79	1,49	1,28	1,39	1,69	2,04	2,51	2,71	2,92
-22	2,88	2,39	2,27	1,77	1,46	1,24	1,36	1,66	2,03	2,51	2,73	2,95
-23	2,91	2,4	2,26	1,74	1,42	1,21	1,32	1,63	2	2,51	2,75	2,98
-24	2,93	2,4	2,26	1,71	1,39	1,17	1,29	1,59	2,98	2,51	2,76	3
-25	2,95	2,41	2,23	1,69	1,35	1,13	1,25	1,56	1,95	2,51	2,78	3,03

Fonte: Transcrito de "Potencial Evapotranspiration and Irrigation Requirements for Northeast Brasil". HARGREAVES (1974).