

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO**

**PROCESSOS EVAPORATIVOS COM E SEM
MACRÓFITAS EM PEQUENO RESERVATÓRIO NO
RECÔNCAVO BAIANO, NORDESTE DO BRASIL**

Danilo Brito da Silva Souza

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2025**

**PROCESSOS EVAPORATIVOS COM E SEM MACRÓFITAS EM
PEQUENO RESERVATÓRIO NO RECÔNCAVO BAIANO,
NORDESTE DO BRASIL**

Danilo Brito da Silva Souza

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola (Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos).

Orientador: Prof. José Carlos de Araújo
Coorientador: Prof. Lucas Melo Vellame

CRUZ DAS ALMAS-BA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

S729p	Souza, Danilo Brito da Silva. Processos evaporativos com e sem macrófitas em pequeno reservatório no Recôncavo Baiano, Nordeste do Brasil. / Danilo Brito da Silva Souza._ Cruz das Almas, Bahia, 2025. 60f.; il. Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo Co-orientador: Prof. Dr. Lucas Melo Vellame Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrária, Ambientais e Biológicas, Mestre em Engenharia Agrícola. 1.Recursos Hídricos - Açudes. 2. Disponibilidade Hídrica – Seca 3. Política de Açudagem – Seca I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título. CDD: 331.91
-------	---

Ficha elaborada pela Biblioteca Central - UFRB.

Responsável pela Elaboração - Neubler Nilo Ribeiro da Cunha (*Bibliotecário - CRB5/1578*)
(os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO**

**PROCESSOS EVAPORATIVOS COM E SEM MACRÓFITAS EM PEQUENO
RESERVATÓRIO NO RECÔNCAVO BAIANO, NORDESTE DO BRASIL**

Comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado de
Danilo Brito da Silva Souza

Aprovado em 18 de julho de 2024

Documento assinado digitalmente
 **JOSE CARLOS DE ARAUJO**
Data: 30/07/2025 15:27:01-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr José Carlos de Araújo
Universidade Federal do Ceará
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **NAZARE SUZIANE SOARES**
Data: 31/07/2025 10:11:32-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dra. Nazaré Suziane Soares
Universidade Federal do Ceará
Examinadora Externa

Documento assinado digitalmente
 **ODILIO COIMBRA DA ROCHA NETO**
Data: 31/07/2025 11:15:40-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Odílio Coimbra da Rocha Neto
Geohidro consultoria
Examinador externo

DEDICATÓRIA

À minha querida mãe que, mesmo não estando mais entre nós, permanece viva em mim e me acompanha em tudo o que faço. Seus ensinamentos, sua persistência e sua força são as principais motivações que impulsionam cada passo da minha vida. Esta conquista é sua também.

AGRADECIMENTOS

Apresento minha profunda gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro e pela confiança depositada em minha formação. À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), pela estrutura oferecida e pelo compromisso com a excelência acadêmica, representado por profissionais capacitados e sempre dispostos a ajudar nos momentos de dificuldade.

Ao Núcleo de Engenharia de Água e Solos (NEAS), pelo acolhimento fraterno que tornou o ambiente de estudo mais leve e produtivo. Aos professores, pela dedicação e generosidade ao compartilhar o conhecimento, e pela prontidão em esclarecer dúvidas com sensibilidade e atenção.

Aos colegas e amigos de curso, cuja presença, apoio e partilha ao longo da jornada acadêmica foram fundamentais para a construção deste resultado.

À minha família, que me deu total suporte na decisão de enfrentar esse desafio, e que, mesmo nos momentos de dúvida, esteve ao meu lado com palavras de incentivo, confiança e amor incondicional.

Ao Professor José Carlos, minha admiração por sua humildade e paciência inabaláveis, especialmente em momentos de maior ansiedade, quando seu auxílio foi fundamental. Ao Professor Lucas Vellame, por acreditar em mim e me oferecer uma confiança que fez toda a diferença nas horas mais desafiadoras.

Muito obrigado!!!

PROCESSOS EVAPORATIVOS COM E SEM MACRÓFITAS EM PEQUENO RESERVATÓRIO NO RECÔNCAVO BAIANO, NORDESTE DO BRASIL

RESUMO: A estimativa precisa da evaporação e da evapotranspiração tem ganhado cada vez mais relevância no cenário atual. Ao longo dos séculos, diferentes estratégias foram adotadas para conviver com a seca, sendo a política de açudagem uma das mais expressivas, impulsionando a construção intensiva de açudes com foco na reserva e na gestão dos recursos hídricos. A poluição dos cursos d'água favorece o processo de eutrofização dos reservatórios, acompanhado pelo crescimento acelerado de macrófitas aquáticas. A combinação de elevadas taxas de evaporação e do povoamento intenso desses corpos hídricos por macrófitas sugere o questionamento sobre a influência da evapotranspiração vegetal nesses ambientes e sua influência no balanço hídrico. É preciso entender se a evapotranspiração vegetal apresenta taxas superiores à evaporação de águas livres. Neste trabalho, foram adotadas metodologias de medição *in situ* da evapotranspiração de dois tipos de macrófitas (salvinia e taboa) comparadas à evaporação de águas sem cobertura vegetal. O estudo foi realizado em um pequeno reservatório localizado no campus da UFRB, no município de Cruz das Almas, Bahia. A evapotranspiração da taboa foi monitorada por meio de um sistema com sensor de pressão, em um cultivo implantado com flutuadores e reservatórios em tubos de PVC entre as plantas nativas, transplantadas do próprio ambiente. Já a evapotranspiração da salvinia foi medida com um sensor acústico, instalado em um tanque evaporativo conforme as diretrizes da Organização Meteorológica Mundial, fixado em um deck suspenso a 4,50 metros da margem, com apoio de flutuadores. A evaporação de águas livres foi avaliada com o mesmo sistema utilizado na medição da salvinia, mas sem a presença de vegetação. Os períodos de monitoramento foram de 304 dias para a salvinia e 221 dias para a taboa. Os índices de área foliar das espécies foram obtidos por método destrutivo. A água livre evaporou, em média, 3,53 mm/dia no período monitorado. A água com cobertura de taboa apresentou uma taxa de evapotranspiração 36% superior à da água livre, enquanto a taxa da salvinia foi 21% maior que a da água livre. Os resultados sugerem que há aumento da taxa evaporativa quando a superfície do reservatório é ocupada por macrófitas e que as macrófitas com maior índice de área foliar evapotranspiram mais, sob mesmas condições meteorológicas.

Palavras-chave: disponibilidade hídrica, açudagem, taboa, salvinia, evaporação, evapotranspiração

EVAPORATIVE PROCESSES WITH AND WITHOUT MACROPHYTES IN A SMALL RESERVOIR IN THE RECÔNCAVO REGION OF BAHIA, NORTHEASTERN BRAZIL

ABSTRACT: Accurate estimation of evaporation and evapotranspiration has become increasingly relevant in the current context, as they represent large transfers of water from reservoirs. Over the centuries, various strategies have been adopted to cope with droughts, with the ponding policy being one of the most prominent, driving the intensive construction of dams focused on water resource storage and management. Pollution of watercourses has favored the eutrophication of reservoirs, accompanied by the accelerated growth of aquatic macrophytes. Given the high evaporation rates in tropical areas and their influence on the water balance, along with the intense colonization of these water bodies by macrophytes, questions have arisen regarding the influence of plant evapotranspiration and whether it presents higher rates than free water evaporation. In this study, *in situ* measurement methodologies were adopted to assess the evapotranspiration of two types of macrophytes, *salvinia* and *taboa* compared to the evaporation of water without vegetation cover. The study was conducted in a small reservoir located on the UFRB campus, in the municipality of Cruz das Almas, Bahia. Evapotranspiration of *taboa* was monitored using a pressure sensor system, in a setup with floaters. Evapotranspiration of *salvinia* was measured using an acoustic sensor installed in an evaporative pan, following the guidelines of the World Meteorological Organization, mounted on a deck suspended 4.5 meters from the shore and supported by floaters. Free water evaporation was assessed using the same system employed for *salvinia*, but without vegetation. Monitoring period encompasses 304 days for *salvinia* and 221 days for *taboa*. Leaf area indices of the species were obtained using a destructive method. On average, free water evaporated at a rate of 3.53 mm/day during the monitored period. Water covered by *taboa* showed an evapotranspiration rate 36% higher than free water, while *salvinia* showed a 21% increase. The study concluded that evaporative processes increase when the reservoir surface is occupied by macrophytes and that the leaf area index influences the evapotranspiration rates of macrophytes.

Keywords: water availability, ponding, *taboa*, *salvinia*, evaporation, evapotranspiration

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1. Açudagem no Nordeste	12
2.2. Evaporação em superfície de águas abertas	13
2.3. Macrófitas	17
2.3.1. <i>Taboa (Typha spp.)</i>	17
2.3.2. <i>Salvinia (Salvinia spp.)</i>	18
2.4. Evapotranspiração em reservatórios com macrófitas.....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1. Área de estudo.....	24
3.2. Monitoramento da evaporação e da evapotranspiração.....	26
3.2.1. <i>Unidade de monitoramento da evaporação de águas livres.....</i>	<i>26</i>
3.2.2. <i>Unidade de monitoramento da evapotranspiração da salvinia.....</i>	<i>28</i>
3.2.3. <i>Unidade de monitoramento da evapotranspiração da taboa</i>	<i>29</i>
3.2.4. <i>Método de avaliação do Índice de Área Foliar</i>	<i>34</i>
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1. <i>Evaporação e evapotranspiração do reservatório</i>	<i>36</i>
4.2. <i>Índice de área foliar</i>	<i>43</i>
4.3. <i>Avaliação do sistema de medição da evapotranspiração da taboa</i>	<i>48</i>
5. CONCLUSÕES.....	52
6. REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

Os açudes são reservatórios hídricos formados a partir de barramentos artificiais, utilizados para reter água da chuva e de cursos naturais de drenagem. São projetados para múltiplos usos: dessedentação humana e animal, abastecimento doméstico, atividades industriais, agrícolas, pecuárias e outros serviços.

A finalidade do processo de açudagem é promover o desenvolvimento regional por meio da garantia de disponibilidade hídrica, atendendo às demandas das atividades agrícolas, industriais, de serviços e, prioritariamente, ao abastecimento humano (DANTAS, 2020).

Há registros de grandes barragens de terra na Mesopotâmia por volta de 3.000 a.C., evidenciando práticas antigas de retenção hídrica. Países como Egito, Índia, China e Iêmen também apresentam vestígios de obras hidráulicas milenares. No Sri Lanka, há cerca de 2.500 anos, destaca-se uma importante estrutura construída sob o comando do rei Panduwaasa, demonstrando a ancestralidade da gestão da água em diferentes culturas (OLIVEIRA, 2024).

No Nordeste brasileiro, consolidou-se uma tradição de construir açudes voltados à reserva de água para fins diversos. Essa prática resultou de uma política de açudagem com raízes no século XIX, voltada ao enfrentamento da seca. Atualmente, a região abriga mais de 70 mil reservatórios, configurando o segundo maior conjunto de barragens do mundo, atrás apenas da Índia, conforme o Manual do Pequeno Açude (ANA, 2025).

Um exemplo é o estado do Ceará em que os recursos hídricos estão enfrentando uma situação crítica de eutrofização. Mais de 80% dos mananciais monitorados apresentam condições eutróficas ou hipereutróficas, evidenciando a gravidade do problema (BARBOSA, 2017).

Grande parte dos reservatórios na região semiárida encontram-se eutrofizados e com isso com grande volume de áreas ocupadas por macrófitas. De acordo com Zhang *et al.* (2018), uma visualização de imagens revelou que uma porção significativa da superfície da água do lago Paus Branco, mais precisamente 80%, estava ocupada por macrófitas flutuantes e emergentes.

Atualmente, a maior parte destes açudes encontra-se eutrofizados (COELHO *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018), o que gera plantas aquáticas (macrófitas) em abundância. Assim, para açudes com presença de macrófitas, a evaporação por si só não representa

todas as perdas de água para a atmosfera, sendo necessária a estimativa da evapotranspiração das macrófitas para uma medida mais assertiva.

Com os altos índices de eutrofização que ocorre nos reservatórios do país, entende-se que estudar a evaporação por si só, não fornece estimativas efetivas da quantidade de água perdida para a atmosfera, sendo assim necessário a identificação dos processos que ocorrem quando há plantas, evapotranspiração.

A evaporação é responsável por transferir grandes quantidades de água e energia para a atmosfera, afetando o equilíbrio hídrico e térmico dos reservatórios. Em contextos de gestão de recursos hídricos, é considerada uma perda, pois representa uma saída de água que poderia ser utilizada em atividades humanas, especialmente em lagos tropicais (FEITOSA *et al.*, 2021).

No Brasil, estima-se que cerca de 75% da água retorne à atmosfera por meio da evapotranspiração, destacando sua importância no ciclo hidrológico. Fatores como clima, tipo de solo, uso da terra e manejo da água influenciam diretamente a evapotranspiração. No entanto, é desafiador estimar e medir a evapotranspiração diretamente nos açudes (ANA, 2020). A evapotranspiração nos reservatórios acontece por causa das plantas aquáticas, chamadas de macrófitas.

De acordo com Mitsch e Gosselink (2015), essas plantas podem aumentar a taxa de perda de água de reservatórios devido ao processo transpiratório. À luz da literatura, a estimativa da água evapotranspirada dos reservatórios com macrófitas ainda é incipiente, pois o objeto principal de muitos estudos tem sido a utilização desse conjunto de plantas no tratamento de água.

A taboa (*Typha* spp.) desenvolve-se em ambiente sem restrição hídrica o que sugere alterações fisiológicas, como resistência estomática. A salvina são samambaias cujas folhas apresentam diâmetro inferior a 2 cm, elevando-se menos de 1 cm acima da água e possuem estômatos não possuem capacidade de regulação, que permanecem constantemente abertos (DE LA SOTA; PAZOS, 1990). Considerando os experimentos de penetração com diferentes líquidos realizados por RAJAN *et al.* (1971), juntamente com os dados obtidos por meio do uso do porômetro que não indicaram variações na condutividade estomática, infere-se que os estômatos permanecem constantemente abertos e não apresentam capacidade funcional de regulação da abertura estomática. (DE LA SOTA; PAZOS, 1990).

As metodologias atualmente utilizadas para calcular a evapotranspiração têm desafios devido à variabilidade espacial e temporal do processo, como a sensibilidade às

diferenças marcantes na vegetação entre as áreas úmidas e o ambiente ao redor (WANG; DICKINSON, 2012). O presente trabalho descreve o método desenvolvido para medir a evapotranspiração (*in situ*) de macrófitas (taboa -*Typha* spp., salvinia- *Salvinia* spp.) e apresenta os resultados preliminares da influência da evapotranspiração dessas plantas no balanço hídrico de um reservatório. Além disso, compara a taxa de evapotranspiração de superfícies com macrófitas com a taxa de evaporação de superfícies de águas livres de plantas. Deste modo, apresentamos uma questão científica a analisar: qual o impacto das macrófitas (taboa-*Typha* spp., salvinias-*Salvinia* spp.) sobre os processos evaporativos dos pequenos açudes?

A hipótese é de que a evapotranspiração das macrófitas é superior à evaporação de água livre. Assim, os corpos hídricos eutrofizados, com presença de macrófitas evaporam mais que aqueles sem vegetação. O objetivo geral dessa pesquisa é quantificar a evapotranspiração de macrófitas e a evaporação de água livre em um pequeno reservatório no Recôncavo Baiano através de medidas de precisão *in loco*. São objetivos específicos:

- (i) Medir a evaporação real, em água livre, do reservatório;
- (ii) Medir a evapotranspiração real da taboa (*Typha* spp.) e da salvinia (*Salvinia* spp.) no mesmo reservatório, comparando-a com a evaporação em água livre; e
- (iii) Verificar se há correlação entre o Índice de Área Foliar das macrófitas e seu impacto nos processos evaporativos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Açudagem no Nordeste

De Araújo *et al.* (2006) descreveram que a construção de sistemas de açudes na região semiárida brasileira tem reduzido a fragilidade a períodos de escassez de chuva, tornando-se fonte de água para mais de 90% da população dessa região. Segundo Lima e Pertile (2019) ao longo dos anos, vários mecanismos e órgãos foram criados para facilitar as estratégias de combate às frequentes estiagens, como a Sudene e o DNOCS. As intervenções nesta região foram predominantemente marcadas por grandes obras hídricas, como a Política de Açudagem.

A prática de construção de lagoas artificiais que se tornou uma política de combate ao fenômeno seca para a região semiárida, chamado de “sistema hidráulico”, iniciou em fins do Século XIX e posteriormente passando para área de domínio do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas DNOCS (ASSUNÇÃO; LIVINGSTONE, 1988).

Essas obras de criação de reservatórios artificiais foram e ainda são a solução que mantêm a população do semiárido nordestino em suas propriedades, tendo facilitado a disponibilidade da água para uso humano e para dessedentação animal (NOVAIS *et al.*, 2022).

Embora a importância dessas obras deva ser ressaltada, vale notar que, em algumas ocasiões, elas criaram novos problemas ou atenuaram os já existentes (OLIVEIRA *et al.*, 2011). O conflito mais emblemático relacionado à questão da água no Brasil ocorreu em Correntina, no Oeste da Bahia, quando, em novembro de 2017, moradores da região, afetados pela privatização dos recursos hídricos locais, recorreram à ação direta, destruindo maquinário em fazendas do agronegócio. Dias depois, receberam o apoio de uma parte significativa da população do município, que se manifestou nas ruas para expressar seu descontentamento com a escassez de água e reivindicar o direito ao acesso a esse recurso essencial, (PEIXOTO *et al.*, 2022).

A açudagem é uma das práticas cruciais nas políticas de armazenamento de água e amplamente adotada no semiárido do Nordeste. Com raízes no Século XIX, a prática foi generalizada no semiárido do Brasil a partir da década de 1960 do século seguinte, ganhando mais destaque (ZANELLA, 2014).

A seca caracteriza-se por um início gradual e persistente, associando-se à escassez ou à ausência de água, e apresenta limitada previsibilidade (DE ARAÚJO; BRONSERT,

2015). A política de açudagem criada nos séculos passados, é uma tentativa de amenizar o sofrimento das populações das regiões semiáridas.

Segundo Farias (2018), a política de construção de reservatórios (açudes) visava armazenar a água das chuvas do período úmido para o seco, permitindo uma reserva hídrica em grande quantidade. Essa reserva não apenas abasteceria as comunidades locais durante a estação seca, mas também facilitaria o desenvolvimento de áreas de irrigação próximas aos açudes. Para Dantas (2020), fica claro que a política de construção de infraestrutura para armazenar água, visando garantir o abastecimento humano e animal, é amplamente adotada em todo o mundo.

Historicamente, a construção de açudes no semiárido nordestino tem sido uma estratégia governamental para minimizar os efeitos das secas, fenômeno natural que embora não passível de erradicação, requer estratégias de convivência. Essas obras hidráulicas, como o Açude Público Encanto, são essenciais para garantir a segurança hídrica, mas suas repercussões socioeconômicas e ambientais evidenciam a complexidade das políticas de gestão de recursos hídricos na região, Albuquerque *et al.* (2020).

2.2. Evaporação em superfície de águas abertas

Segundo Tucci e Beltrame (2001) a evaporação é o processo pelo qual a água passa do estado líquido para o gasoso (vapor d'água) sendo transportada pela atmosfera pela advecção. Durante o processo de evaporação ocorrem dois fatores em paralelo, a água líquida passa para o estado gasoso (vaporização), e também o processo de transporte do vapor d'água pelo vento (advecção) (ALLEN *et al.*, 1998; MCMAHON *et al.*, 2013). Segundo Trenberth *et al.* (2011) a evaporação da água em suas condições naturais é vista como um dos principais fatores do ciclo hidrológico, representando aproximadamente 63% das chuvas, sendo que as superfícies hídricas contribuem todos os anos para o retorno de água para atmosfera.

Conforme apontado por Wurbs e Ayala (2014), é fundamental compreender de maneira detalhada os efeitos da evaporação no balanço hídrico de reservatórios e sistemas fluviais, a fim de contribuir para o aprimoramento do desenvolvimento, alocação, gestão e uso sustentável dos recursos hídricos.

Um estudo de Alvarez *et al.*, (2008), demonstra que evaporação em reservatórios de irrigação agrícola em clima semiárido, levavam a perdas anuais da ordem de 58×10^6

m³ representando 8,3% do total de recursos hídricos que seriam utilizados pelo setor agropecuário.

A evaporação da água em reservatórios artificiais, especialmente nos de superfície exposta, é um fator de grande relevância para a sociedade, pois impacta a confiabilidade do fornecimento de água para o consumo humano, bem como afeta setores como geração de energia, pecuária, agricultura e indústria, os quais dependem da água para a realização de seus processos (OLIVEIRA, 2017). O estudo de Rodrigues (2023) investigou a taxa de evaporação em um reservatório tropical ao longo de 22 dias de monitoramento contínuo esse estudo contribui significativamente para a compreensão da dinâmica da evaporação em reservatórios tropicais, além de fornecer uma base sólida para a escolha de tecnologias de medição adequadas para monitoramentos precisos em tais ambientes.

A evaporação é um fenômeno natural e que pode ser agravado ou atenuado com relação aos componentes meteorológicos, vento, temperatura, umidade relativa e radiação solar. A evaporação já era notada desde os filósofos da antiguidade, John Dalton em 1802 publicou o que alguns críticos consideram a maior contribuição para o desenvolvimento da teoria atual sobre a evaporação.

A evaporação pode ser estimada por métodos baseados em dados meteorológicos ou pode ser medida. As equações baseadas em dados meteorológicos para estimar a evaporação, como o método do balanço de energia simplificado (Equação 1), estima a evaporação da água livre (E_L) fazendo um balanço simplificado de energia, desconsiderando o termo de armazenamento da energia no lago (OLIVEIRA, 2009).

$$El = \frac{Rn}{(1+\beta) \cdot L} \quad (1)$$

Na Equação 1, E_L é a evaporação do lago (mm.dia⁻¹), Rn é a radiação líquida ((MJ. m⁻². dia⁻¹) e L é o calor latente de vaporização (MJ Kg⁻¹).

A razão de Bowen (β) (Equação 2) também tem sido usada para estimar evapotranspiração (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA,1997).

$$\beta = \left[\frac{\Delta T_u}{L(1-W)\Delta T_s} - 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

Na Equação 2, ΔT_u representa a diferença de temperatura do (bulbo úmido) ($^{\circ}\text{C}$), ΔT_s é a diferença de temperatura do ar (bulbo seco) ($^{\circ}\text{C}$), os valores de W (Equações 3 e 4) são estimados baseados em Vishwanadham *et al.* (1991).

$$W = 0,407 + 0,0145 T_u \quad \text{Se } 0 < T_u < 16 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

$$W = 0,483 + 0,01 T_u \quad \text{Se } 16,1 < T_u < 32 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

A Equação 5, de Priestley e Taylor, estima a evaporação em função do calor latente de evaporação e do fluxo de calor em um corpo d'água (STEWART; ROUSE, 1976).

$$EL = \alpha \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot \left(\frac{R_n}{2,45} \right) \quad (5)$$

Na Equação 5, os termos são definidos da seguinte forma: EL é a evaporação em ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$), α é 1,26 sendo a constante empírica adimensional derivada por Priestley-Taylor, Δ é a inclinação da curva pressão saturante de vapor e_s ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e R_n é a radiação líquida (energia radiante recebida pela superfície) ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$). A variação de armazenamento de calor no lago é considerada desprezível.

A Equação 6, destinada ao cálculo da evaporação de uma superfície, foi proposta por John Dalton (1802).

$$E = kD \cdot (e_s - e_a) \quad (6)$$

Na Equação 6, E é a taxa de evaporação (mm/dia ou mm/h), KD é um coeficiente empírico (depende da velocidade do vento, temperatura, entre outros), e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa) e e_a é a pressão real de vapor (kPa). A Equação 7, de Penman fornece a estimativa de evaporação da água livremente exposta.

$$E = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) e_s + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) e_a \quad (7)$$

Na Equação 7, E é a evaporação em uma superfície de água livremente exposta ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); γ é o coeficiente psicométrico, ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); Δ é a declividade da curva de pressão

de saturação de vapor, (kPa °C⁻¹); E_s é o componente de evaporação devido ao ciclo do aquecimento, (mm.d⁻¹); e E_a é o componente de evaporação devido aos fatores aerodinâmicos (mm.d⁻¹).

As medidas da evaporação podem ser feitas baseadas na utilização de tanques evaporimétricos que são considerados uma medida indireta, utilizam um coeficiente de ajuste de acordo com a região. O vento, a área superficial se coberta ou nua distância da borda são utilizados para estimar a evaporação de uma região, lavoura ou lago (NEVES, 2022). Os tanques evaporimétricos podem ser de diversos tipos e podem ter variadas aplicações, os mais comuns são os tanques soviético GGI-3000 (0,3 m²) e o tanque GGI 20 m², sendo os dois instalados a 0,075 a 0,1 m acima do nível do solo (JENSEN; ALLEN, 2016), o método do tanque Classe A que no Brasil é o de maior utilização.

Os níveis de água são utilizados originalmente para estimativa da evapotranspiração de referência, foi aplicado em duas regiões do estado da Paraíba sendo necessário a utilização de coeficiente de ajuste do tanque K_p , utilizando a equação para estimativa da evaporação. Esse referido tanque é construído de chapa galvanizada de 0,05 mm de espessura, em formato cilíndrico com diâmetro de 121 cm e 25,5 cm de profundidade, montado sobre um estrado de madeira a 15 cm de altura do solo para evitar a transmissão de calor do solo para o referido tanque e desse modo interferir nas avaliações. Vale ressaltar que o tanque deve ser cheio com água até 5 cm da borda e o nível da água não deve ficar abaixo de 7,5 cm. Tendo que ser reposta rotineiramente (PEREIRA *et al.*, 1995). A Equação 8 é utilizada para a estimativa de E_L , baseada nas medições do tanque classe A.

$$E_L = K_p \cdot E_p \quad (8)$$

O termo E_L corresponde à evaporação da superfície de água livremente exposta a atmosfera em (mm.dia⁻¹), E_p é a evaporação diária do tanque Classe A, o parâmetro K_p é calculado pela Equação 9, proposta por Snyder (1992).

$$K_p = 0,482 + [0,024 \cdot \ln(F)] - (0,000376 \cdot U) + (0,0045 \cdot UR) \quad (9)$$

Na Equação 9, F é o tamanho da área de bordadura vegetada do tanque (m), U é a velocidade do vento (km.dia⁻¹) e UR é a umidade relativa média diária (%).

2.3. Macrófitas

A eutrofização é um processo que pode ocorrer de forma natural ou de origem antrópica causada pela deposição excessiva de nutrientes nos corpos hídricos (ESTEVES, 2011). A eutrofização é considerada uma grande preocupação ambiental aos ecossistemas aquáticos, devido aos elevados aportes de nitrogênio (N) e fósforo (P), Santos e Medeiros, (2023). Nos últimos anos, as atividades humanas têm provocado um aumento nas concentrações de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, o que tem levado ao processo de eutrofização (ARAÚJO, 2018). O enriquecimento da água dos lagos e reservatórios com nutrientes tem como resultado a aceleração do processo de eutrofização com o surgimento e aumento das macrófitas e aumento das concentrações de clorofila-a e fósforo (P), (ROCHA; LIMA NETO, 2021).

As macrófitas aquáticas ao longo de seu processo evolutivo adaptaram-se ao ambiente aquático de forma muito eficiente. Apresentam aproximadamente 2600 espécies espalhadas por mais de 450 gêneros e estão representadas por sete grandes grupos: cianobactérias, clorófitas, rodófitas, xantófitas, briófitas, pteridófitas e espematófitas (CHAMBERS *et al.*, 2008).

As macrófitas aquáticas apresentam uma grande versatilidade com relação ao seu *habitat*, assim sete classificações são atribuídas de acordo com suas características adaptativas ao ambiente aquático (ESTEVES, 2011). [1]. Anfíbia: capaz de viver tanto na forma emersa quando imersa; [2]. Emergente: apresenta as raízes no fundo do ambiente aquático, e parte dos caules e folhas estão parcialmente emersos; [3]. Flutuante fixa: as raízes estão no fundo do ambiente aquático, mas os caules e folhas estão flutuando; [4]. Flutuante livre: não apresentam raízes fixas e podem ser levadas pela correnteza; [5]. Submersas fixas: as raízes estão fixas no fundo do ambiente aquático assim como todas as outras partes da planta; 6. Submersas livres: As raízes não estão fixas no fundo dos lagos ou rios e todas as outras partes da planta também estão submersas.

2.3.1. *Taboa (Typha spp.)*

A *taboa (Typha spp.)* é uma planta herbácea perene da família Typhaceae. Nos Estados Unidos, ela é amplamente encontrada crescendo em pântanos, lagoas, lagos e rios. Essa planta é considerada um competidor dominante em zonas úmidas e, em muitas áreas, pode atingir alturas de 3 metros. Suas folhas se assemelham a grandes folhas de

grama, com cerca de 2,5 centímetros de largura. Nas planícies superiores do Centro-Oeste dos EUA, as taboas estão invadindo lagos agrícolas, canais de irrigação e valas de drenagem, o que prejudica o fluxo de água e aumenta o assoreamento (MITCHELL *et al.*, 2011).

A taboa é uma planta bastante vigorosa, chegando a produzir 7.000 kg de rizomas por hectare. Seus rizomas são comestíveis, possuindo valor proteico igual ao do milho e de carboidratos igual ao da batata. Plantas de *Typha* absorvem metais pesados, inclusive o cobre, podendo contribuir para o saneamento ambiental (KISSMANN, 1997).

No Brasil, atualmente, são reconhecidas três espécies do gênero *Typha* segundo a Flora do Brasil 2020 (PAIVA *et al.*, 2020): *Typha angustifolia* L., *T. domingensis* Pers. e *T. latifolia* L. Nesse gênero, a ocorrência de híbridos putativos é comum (SMITH, 1986; KUEHN; WHITE, 1999; KIM; CHOI, 2011; CARVALHO, 2019), assim como a plasticidade de diversos caracteres diagnósticos, o que torna a identificação das espécies desafiadora. Ao longo do processo evolutivo, as macrófitas migraram do ambiente terrestre para o aquático, desenvolvendo adaptações morfológicas e anatômicas essenciais para a sobrevivência na água. Essas adaptações são especialmente voltadas para a flutuação, como a presença de uma cutícula fina, tecidos esponjosos (aerênquima), caules ocos e pelos hidrofóbicos que repelem a água. Além disso, as flores dessas plantas geralmente são posicionadas fora da água, sendo visíveis a olho nu, e as partes fotossintetizantes podem estar totalmente submersas, parcialmente submersas ou mesmo flutuantes (XAVIER *et al.*, 2021).

Segundo Rezig *et al.* (2024) os principais fatores que influenciam a riqueza e a composição das macrófitas aquáticas, conforme relatado por diversos autores, incluem a área, a altitude, a concentração de nutrientes na água e no sedimento, a luminosidade e as flutuações hidrológicas.

2.3.2. *Salvinia* (*Salvinia* spp.)

As espécies de salvina (*Salvinia* spp.) são pteridófitas aquáticas com uma estrutura simplificada, podendo alcançar até 30 cm de comprimento quando isoladas (KISSMANN, 1991). Seus rizomas flutuantes se estendem horizontalmente e, a partir de suas gemas, formam-se frondes modificadas sempre em grupos de três. Dessas, duas permanecem na superfície para realizar a fotossíntese, enquanto a terceira, com aspecto

de pena e coloração amarronzada, permanece submersa, atuando como raiz (SCHNEIDER, 2009).

Salvinia é o único gênero da família Salviniaceae, com cerca de 12 espécies, alguns híbridos, diversos com presença no Brasil, também conhecida como salvinia, samambaia-aquática, erva-de-sapo, murué e carrapatinho, é uma macrófita aquática flutuante de água doce originária da América do Sul (KISSMANN, 1991).

Nesse gênero existe um chamado "complexo auriculata", encerrando uma série de espécies afins. A característica marcante nesse complexo é a presença de pelos hidro-repelentes (KISSMANN 1991). Trata-se de uma planta anual ou perene, com folhas ovaladas de aproximadamente 2,5 por 2,0 centímetros, cobertas por pelos que repelem a água. A planta não possui raízes verdadeiras; em vez disso, apresenta folhas modificadas que emergem de uma estrutura em formato de âncora localizada abaixo das folhas, funcionando como esponjas que retêm água e sedimentos (WOLFF *et al.*, 2009).

Salvinia auriculata, popularmente conhecida como orelha-de-onça ou salvinia, é uma macrófita aquática livre e flutuante, capaz de colonizar extensas superfícies de água doce em pouco tempo. Comum em ambientes aquáticos tropicais, apresenta ampla distribuição geográfica, ausente apenas em regiões frias (LOLIS; THOMAS, 2011).

2.4. Evapotranspiração em reservatórios com macrófitas

Segundo Allen *et al.* (1998), a evapotranspiração (ET) é composta pela evaporação da água do solo e pela transpiração das plantas, que consiste na perda de água por meio dos estômatos das folhas. A evapotranspiração refere-se à quantidade de água que é perdida por meio da evaporação da superfície do solo e da transpiração das plantas. A ET desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico e afeta significativamente a disponibilidade de água para usos humanos e para o meio ambiente. Compreender e monitorar a evapotranspiração é essencial para assegurar a sustentabilidade no uso dos recursos hídricos e na prática agrícola (RODRIGUES *et al.*, 2017; VELLAME *et al.*, 2024).

A evapotranspiração é um processo meteorológico que desempenha um papel crucial no balanço de energia, associado ao fluxo de calor sensível. Durante o processo de evapotranspiração, a água líquida é convertida em vapor, consumindo uma quantidade considerável de energia da superfície. Em sistemas de cultivo agrícola, especialmente em

áreas irrigadas, a ET é responsável pelo consumo de, aproximadamente 60% a 80% do saldo de radiação durante a fase de crescimento vegetativo (SUYKER; VERMA, 2009).

Dentro dos componentes do ciclo hidrológico, a evapotranspiração (ET) é fundamental, pois representa a saída de água através dos processos de evaporação do solo e transpiração das plantas (BRITO *et al.*, 2020).

A evapotranspiração engloba os processos que envolvem o movimento vertical do vapor d'água entre a superfície terrestre, corpos d'água, vegetação e atmosfera. É fundamental no ciclo hidrológico e desempenha um papel crucial na gestão sustentável dos recursos hídricos. A obtenção de estimativas precisas desse processo é essencial tanto para o planejamento da irrigação quanto para pesquisas em hidrologia, climatologia e ecologia (SHARMA; SINGH; JAIN, 2022).

A evapotranspiração pode ser estimada por meio de métodos empíricos ou por técnicas de medição direta. Os principais métodos de estimativa baseiam-se em princípios físicos e utilizam dados meteorológicos. Os principais métodos empíricos são Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, Jensen Haise, Linacre, Benavides, Lopez e Hamon, Thorntwaite.

O método de Penman-Monteith (Equação 10) estima a evapotranspiração de referência (ET_o, dada em mm.dia⁻¹) em qualquer clima e local, sendo definido como a metodologia padrão para estimativa da ET_o pela FAO (Organização das nações Unidas para Alimentação e a Agricultura) (VESCOVE; TURCO, 2005; CARDOSO; JUSTINO, 2014).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n + G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \cdot u^2)} \quad (10)$$

Na Equação 10, ET_o é a evapotranspiração de referência, mm d⁻¹; Δ é a declividade da curva de pressão de vapor, kPa °C⁻¹; R_n é o saldo da radiação diário, MJ.m⁻².d⁻¹; G é o fluxo de calor no solo MJ.m⁻².d⁻¹, γ é o parâmetro psicrométrico, kPa °C⁻¹; u₂ é a velocidade do vento a 2 m de altura, m s⁻¹; e_s é a pressão de saturação do vapor de água atmosférico, kPa; e_a é a pressão real do vapor de água atmosférico, kPa e T_a é a temperatura média do ar, °C.

O método de Hargreaves-Samani (Equação 11) estima a ET_o em mm d⁻¹, sendo utilizado quando há falta de dados de radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (SILVA *et al.*, 2005).

$$ET_o = 0,408 \cdot 0,0023 \cdot (T_{med} + 17,8) \cdot \sqrt{T_{máx} - T_{min}} \cdot R_a \quad (11)$$

Na Equação 11, ET_o é a evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ; T_{med} é a temperatura média do ar em $^{\circ}\text{C}$, $T_{máx}$ é a temperatura máxima do ar em $^{\circ}\text{C}$; T_{min} é a temperatura mínima do ar em $^{\circ}\text{C}$ e R_a é a radiação extraterrestre em $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$.

O método de Linacre (Equação 12) estima a evapotranspiração em mm d^{-1} , podendo ser obtida em função da altitude, latitude e das temperaturas mínima e máximas diárias, ponto de orvalho (LINACRE, 1977).

$$ET_o = \frac{700 \frac{T_m}{100 - \phi} + 15(T_a - T_d)}{(80 - T_a)} \quad (12)$$

Na Equação 12, ET_o é a evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ; z é a altitude (m) temperatura média do ar em $^{\circ}\text{C}$; ϕ é a latitude (graus) e T_d é a temperatura média do ponto de orvalho. O método de Thornthwaite (Equações 13 – 15, ver também ONGARATO; BORTOLIN, 2021) também é usado para o cálculo da evapotranspiração de referência.

$$ET_0 = 16 \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a \quad (13)$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} I^3 - 7,71 * 10^{-5} I^2 + 1,7912 * 10^{-2} I + 0,4239 \quad (14)$$

$$I = \Sigma_i^{12} = 1(0,2T_i)^{1,514} \quad (15)$$

Nas Equações 13 – 15, ET_o é a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Thornthwaite (mm. mês^{-1}); T_i é a temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$); a é o expoente função do índice anual I e i é o índice mensal de calor para o mês j .

O método de Camargo (Equação 16, ver também ONGARATO; BORTOLIN, 2021) estima ET_o .

$$ET_0 = R_a(dia).T.K_f \quad (16)$$

Na Equação 16, ET_o é a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Camargo (mm.dia^{-1}); R_a é a radiação solar extraterrestre ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e T é a

temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); K_f é o fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do ar no local de estudo; $K_f = 0,01$ para $T < 23^{\circ}\text{C}$; $K_f = 0,0105$ para $T = 24^{\circ}\text{C}$; $K_f = 0,011$ para $T = 25^{\circ}\text{C}$; $K_f = 0,0115$ para $T = 26^{\circ}\text{C}$; e $K_f = 0,012$ para $T > 26^{\circ}\text{C}$.

A evapotranspiração pode ser medida, esses métodos são descritos na literatura como métodos padrão, os lisímetro de drenagem, lisímetro de pesagem, lisímetro de lençol freático e *eddy covariance*.

Os lisímetros são dispositivos nos quais solo e plantas são incorporados com o objetivo de simular as condições do ambiente de cultivo no campo. Esses equipamentos podem variar em tamanho e formato, além de contar com diferentes sistemas de medição, sendo sempre instalados no nível do solo, muitos desses equipamentos tem um alto custo de instalação e precisão e ainda são dotados de um sistema de observação, manutenção e coleta da água percolada pelo dreno. De acordo com Faria *et al.* (2006), os lisímetros são dispositivos amplamente reconhecidos por sua alta precisão e sensibilidade na determinação direta da evapotranspiração, por meio do balanço de massa de água.

O método de *eddy covariance* (EC) é uma técnica confiável para medir fluxos turbulentos na atmosfera, que pode ser usada para estudar a evapotranspiração. O método do EC é uma abordagem micrometeorológica amplamente consolidada e eficaz para quantificar a troca líquida de carbono entre ecossistemas e a atmosfera em escalas temporais que variam de horas a anos. Tradicionalmente, esse método tem sido empregado principalmente na medição dos fluxos de gases entre o dossel e a atmosfera ou entre o solo e a atmosfera. No entanto, sua aplicação tem se expandido também para ambientes aquáticos, como zonas de interface sedimento-água e superfícies de água doce ou costeiras (ATTARD *et al.*, 2019; BERG *et al.*, 2020).

Embora originalmente projetada para ambientes terrestres, a técnica EC vem sendo adaptada para plataformas móveis e aéreas. A versatilidade torna a EC uma ferramenta promissora para estudar trocas gasosas em interfaces complexas e heterogêneas, como os ecossistemas costeiros entre marés, onde sua aplicação pode ainda enfrentar desafios técnicos significativos, já que ele é um equipamento indicado para análise das trocas gasosas turbulentas em grandes áreas.

Apesar das dificuldades, a técnica EC oferece medições diretas e de alta resolução espacial e temporal, sendo especialmente valiosa para avaliar fluxos de gases de efeito estufa em diferentes interfaces físicas, como sedimento-água, sedimento-ar e água-ar. Isso é fundamental para aprimorar a previsão de tendências de emissão de gases do efeito

estufa em áreas úmidas costeiras em escalas regionais e globais (ATTARD *et al.*, 2019; BERG *et al.*, 2020).

O método do lisímetro de nível constante é uma alternativa mais barata, viável, e de fácil aplicação. O método consiste em um conjunto de reservatórios e tubulações, além de válvulas e torneira boia conectadas entre si. Esse ferramental fica sustentado por um sistema de boias de modo que pode ser inserido em meio ao reservatório ou local aonde é colonizado por plantas aquáticas. O método de lisímetro de nível constante funciona basicamente por rebaixamento de nível de água, que é transpirada pelas plantas e por evaporação da superfície que não é coberta pelas mesmas.

O método apresenta resultados confiáveis para avaliação da evapotranspiração de cultivos que comumente são de locais parcialmente ou totalmente alagados. As plantas vivem em ambientes parcialmente ou totalmente alagados, daí a necessidade de desenvolver um método que possa auxiliar na busca por essas respostas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A fase experimental do projeto de pesquisa, foi desenvolvida na Bacia Experimental do Açude do Arroz (BEAA), localizada no campus de Cruz das Almas-BA, na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), distante 120 quilômetros da capital do estado, Salvador. O clima é descrito como tropical quente e úmido tendo uma precipitação média anual de 1170 mm e que varia entre 800 e 1400 mm, os meses mais chuvosos vão de março a agosto, já os meses menos chuvosos vão de setembro a fevereiro, com umidade relativa de 80%, a temperatura média anual é de 24,5° segundo Rezende (2004). Na Figura 1 pode ser observada o reservatório e a área ao seu redor coberta por vegetação e algumas manchas de solo exposto derivado da extração de cascalho, o reservatório encontra-se tomado por macrófitas, a salvinia que apresenta cobertura de 36% das macrófitas, enquanto a taboa representa 64%. Atualmente (março de 2025), a área de águas livres de macrófitas neste reservatório é muito restrita.

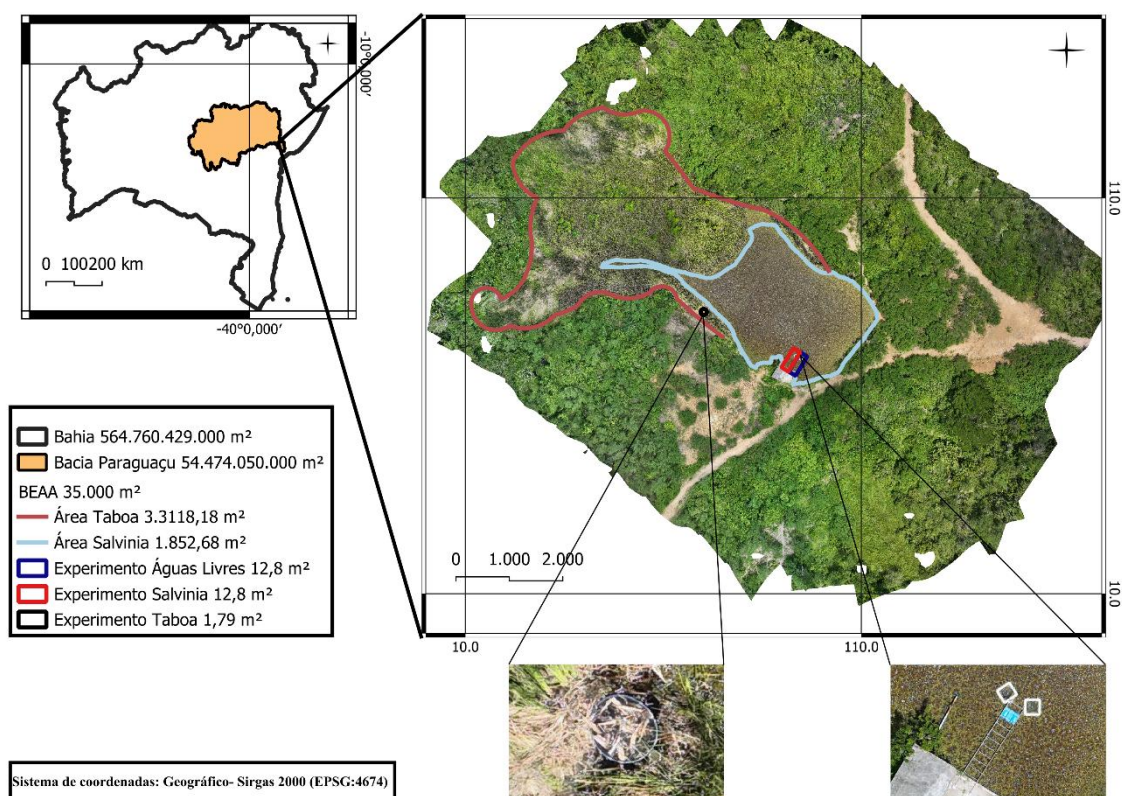


Figura 1. Mapa do estado da Bahia com a delimitação da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Em destaque, uma vista aérea do Açude do Arroz, pertencente à Bacia Experimental do Açude do Arroz (BEAA), localizada na UFRB, Cruz das Almas, BA.

A área da bacia hidrográfica é de 38.500 m², enquanto o reservatório possui uma área de aproximadamente 5.170 m², quase integralmente tomado por macrófitas, sendo as mais abundantes a salvinia (*Salvinia* spp.) e a taboa (*Typha* spp.), já a área do entorno do reservatório é dominada por vegetação, sendo a mais comum a jurema preta (*Mimosa tenuiflora*).

A geologia da área é constituída por três unidades distintas: rochas metamórficas pré-Cambrianas do Complexo Granulítico; material sedimentar Tércio-Quaternário da Formação Capim Grosso; depósitos de sedimentos aluvio coluvionais e detríticos quaternários (CBPM, 1997; RIBEIRO, 1998). Segundo Rodrigues *et al.* (2009) foram identificados cinco classes de solos dominantes: Latossolo amarelo distrocoeso típico, Argissolo amarelo eutrófico, planossolo háplico distrófico, livissolo háplico órtico, Gleissolo húnico eutrófico, sendo que seguindo o mapa de classificação para a BEAA o solo é o Argissolo amarelo.

Essa microbacia recebe muita interferência antrópica por intensas intervenções humanas. Uma dessas interferências é um antigo sistema de coleta e tratamento de efluente, cujos tanques de tratamento e a antiga rede de manilhas ainda são visíveis. Antigamente, o efluente era conduzido para essa central de tratamento que fica no divisor de água da bacia hidrográfica. O despejo de efluentes parcialmente tratados em corpos hídricos pode causar eutrofização, aumentando o risco de proliferação de diversos organismos, como bactérias, microalgas e macrófitas flutuantes. Esse processo pode comprometer a qualidade da água e afetar negativamente a vida no ambiente (BARROSO JÚNIOR, 2020).

Recentemente a área da bacia foi utilizada para retirar cascalho, para o descarte de animais mortos (bovinos, equídeos e cães), extração de barro para fabricação de fogos de artifício (espadas de fogo) o que gerou uma cratera enorme num paredão ao lado da área de extração de cascalho, além da criação de animais que requerem pequenas pastagens, o que resulta no desmatamento das áreas no entorno das nascentes e do reservatório num geral.

Esse local foi utilizado como ponto de descarte de entulho e um local de lazer, sendo que ao fazerem a prática de pescaria ou tomar banho no local descartam lixo no ambiente. Sendo assim, fontes antrópicas são uma possível explicação para a tomada excessiva do reservatório em estudo por macrófitas.

3.2. Monitoramento da evaporação e da evapotranspiração

As unidades de monitoramento do Sistema de águas livres (SAL), Sistema da salvinia (SS) e do sistema da taboa (ST) foram projetadas para que representassem as condições ambientais presentes no reservatório, fazendo com que as avaliações trouxessem o máximo da realidade local. O sistema de monitoramento da evapotranspiração e evaporação foi inserido em meio ao reservatório.

3.2.1. Unidade de monitoramento da evaporação de águas livres

O monitoramento da evaporação de águas livres (EVAL) foi realizado com a utilização do sensor acústico, o sensor foi inserido no tanque de evaporação, distando 5 m da margem do açude, em uma área livre de macrófitas. com a profundidade aproximada de 4 m. Esse tanque é feito em aço galvanizado nas dimensões de 60 cm de diâmetro por 60 cm de altura, sustentado por meio de flutuadores (mini balsa), são quatro seções de tubo com 80 cm cada, quatro joelhos de 90° e peças aço galvanizado (abraçadeiras, Figura 4) que ligam a mini balsa ao tanque de evapotranspiração, esse tanque segue (recomendações da Organização Meteorológica Mundial, 2018), esse sistema está acoplado a um deck montado a 5 m da margem do açude da BEAA esse local foi escolhido pelo fato de haver um abrigo para bombas, responsável pelo abastecimento de projetos de pesquisa em um campo experimental da UFRB, esse abrigo conta com energia elétrica e uma estrutura de suporte.

Em seu fundo, do tanque foi instalado um sensor acústico de nível com incerteza de 0,1 mm, devidamente testado e aprovado por Rodrigues *et al.* (2023). Através do balanço hídrico do tanque impermeável é possível estimar com elevada precisão a evaporação em escala diária, horária ou sub-horária. O sistema de evaporação é conectado a uma central de transmissão que envia os dados registrados via internet a um computador.

A EVAL de plantas é medida em intervalos regulares e armazenada diretamente em intervalos de minuto a minuto com a utilização do sensor acústico. O desenvolvimento desse medidor de nível acústico segue uma ideia de redução de erros e de maior precisão na coleta de dados de evaporação. Os medidores de nível acústico determinam o nível através da reflexão das ondas de ultrassom, que são emitidas e que retornam para o receptor do instrumento.

O sensor acústico Corvo-Aqua (*Steinbeis-STW*) conta com um emissor e um receptor. As ondas sonoras se propagam à velocidade do som (340 m/s ao nível do mar).

Utilizando o tempo de reflexão da onda, o sensor calcula o atraso entre a emissão e a recepção e, assim, determina a altura correspondente ao nível do líquido. O sistema de monitoramento está separado por flutuadores de pvc de 100 mm, que definem a área de 12,25 m² de águas livres Figura 2.



Figura 2. Experimento com os sensores acústicos, lado esquerdo águas livres de macrófitas (sensor 2073), lado direito monitoramento da evapotranspiração da salvinia (sensor 2074).

A Figura 3 do sistema que está montado no lago além do esquema do tanque aonde está inserido o sensor acústico.

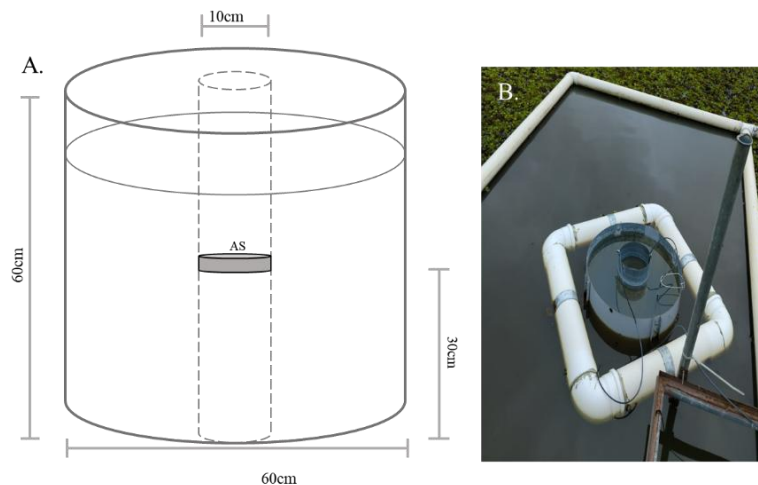


Figura 3. Esquema do reservatório com sensor acústico Corvo-Aqua (STEINBEIS-STW) (A); reservatório com sistema de medição da evaporação de águas livres 2073 (B).

A Equação 17 foi utilizada para a determinação da lâmina evaporada, de forma que a diferença entre a nível anterior e o nível atual, somada à precipitação, resultasse no valor da evaporação:

$$E = N_{(i-1)} - N_{(i)} + P \quad (17)$$

Na Equação 17, E é a evaporação em (mm.dia⁻¹); N_(i-1) é nível dia anterior em (mm); N_(i) é o nível do dia (mm) e P é a precipitação do dia em (mm).

3.2.2. Unidade de monitoramento da evapotranspiração da salvinia

O monitoramento da evapotranspiração da salvinia conta com um sistema de flutuação (mini balsa forma em vermelho) desenvolvido com tubos e conexões de 150 mm, são quatro seções de tubo com 80 cm cada, quatro joelhos de 90° e peças aço galvanizado (abraçadeiras, Figura 4) que ligam a mini balsa ao tanque de evapotranspiração. O tanque é um recipiente de aço galvanizado nas dimensões de 60 cm de diâmetro por 60 cm de altura. No fundo do tanque foi instalado um sensor acústico de nível com incerteza de 0,1 mm, devidamente testado e aprovado por Rodrigues *et al.* (2023). Através do balanço hídrico do tanque impermeável é possível estimar com elevada precisão a evapotranspiração em escala diária, horária ou sub-horária. O sistema foi desenvolvido para evitar a perda do sistema de avaliação da evaporação quando houvesse chuvas intensas, já que o sistema de flutuadores faz o tanque evaporimétrico flutuar. Todo esse sistema é conectado por meio de cabos a uma central de transmissão que envia os dados registrados diretamente a um endereço na internet, onde ficam disponíveis para acesso. O sistema e o sensor são os mesmos aplicados ao monitoramento de águas livres, que está no experimento ao lado.

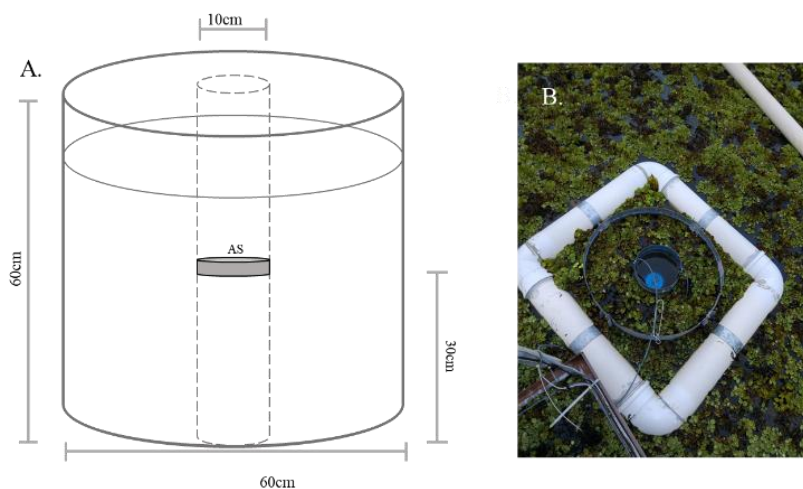


Figura 4- Esquema do reservatório com sensor acústico Corvo-Aqua (STEINBEIS-STW) (A); foto do reservatório com sistema de medição da evapotranspiração da Salvinia 2074, com o sensor acústico (em azul, dentro do tanque tranquilizador (B). junho de 2024.

3.2.3. Unidade de monitoramento da evapotranspiração da taboa

O ponto preto na Figura 1 representa a unidade de monitoramento que está inserida em meio às plantas existentes no açude, que cresceram de forma natural e tem seu desenvolvimento pleno nas condições do ambiente. As lâminas evapotranspiradas foram medidas de duas formas: por lisimetria de nível constante e monitoramento do rebaixamento de nível. Em um reservatório com capacidade de 1.000 litros foram plantadas 25 mudas de taboa.

O plantio da taboa foi realizado, a princípio, com a retirada de mudas do próprio açude, levando em conta o seu rápido desenvolvimento e de forma que ocupasse todo ambiente do reservatório. O tanque cultivo possui 1,51 m de diâmetro na sua parte superior e uma altura de 0,76 m, resultando numa área efetiva de cultivo de 1,79 m² (Figura 5). Um dreno a 15 cm da borda evita o transbordamento decorrente das águas pluviais. O sistema de flutuação e do tanque de cultivo, bem como os estádios de desenvolvimento são apresentados na Figura 5.

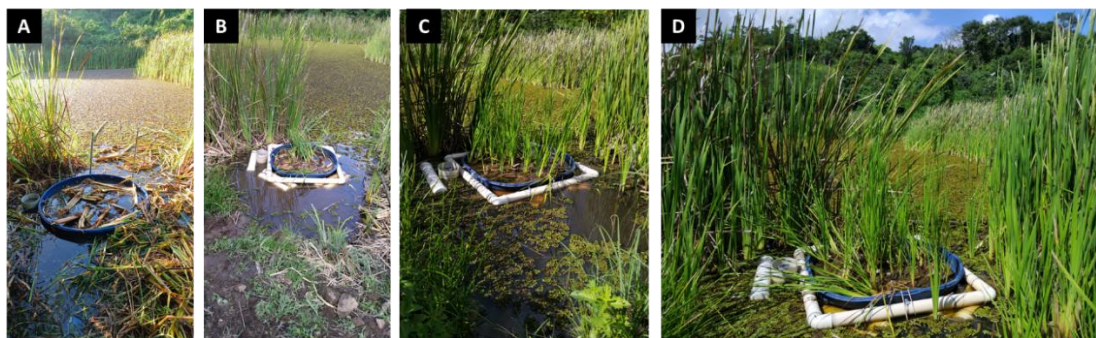
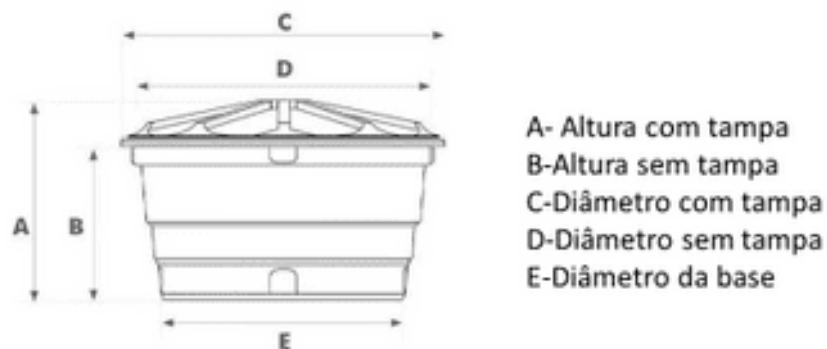


Figura 5. Unidade experimental do tanque de cultivo da taboa, em 27 de março (A), 19 de maio (B), 21 de junho (C) e 17 de julho de 2024 (D).

Para manter o tanque de cultivo Figura 6 na superfície do espelho d'água, foi construído um sistema de flutuação. Esse flutuador foi construído unindo quatro seções de tubo de 100 mm, de 1,60 m cada, com joelhos de 90° de mesmo diâmetro, formando um quadrado. Como esse sistema não foi capaz de fazer o tanque de cultivo flutuar, adicionou-se oito tubos PVC, de 150 mm de diâmetro, comprimento 0,8 m, vedados com CAPs soldáveis, abaixo deste sistema. A fixação do tanque de cultivo foi realizada por meio de uma cinta de aço de meia polegada.



Capacidade (L)	Dimensões em metros				
	A	B	C	D	E
1.000	0,97	0,76	1,52	1,51	1,16

Figura 6. Dimensões do reservatório de polietileno utilizado no ST da unidade de monitoramento da evapotranspiração da taboa.

O sistema hidráulico da unidade de monitoramento é constituído de três reservatórios conectados por uma tubulação de 20 mm a representação esquemática do ST. O tanque abastecedor (Item 1 da Figura 7) é responsável pelo suprimento diário de água evapotranspirada no tanque de cultivo (Item 10 da Figura 7).

As medições de evapotranspiração diárias são aferidas por um indicador visual de nível (Item 2 da Figura 7) e monitoradas por um sensor de pressão (Item 3 da Figura 7) instalado na base do tanque abastecedor. Conectado ao tanque de cultivo foi instalado um tanque tranquilizador (Item 7 da Figura 7) que mantém o mesmo nível de água do tanque de cultivo por meio de vasos comunicantes. Nesse tanque, estão monitoradas as variações de nível por meio de um sensor de pressão, em escala sub-horária (a cada 10 minutos), sendo registrada uma média das leituras feitas no período anterior registradas no *data-logger*, (Item 8 da Figura 7). Assim como o tanque de cultivo, o tanque tranquilizador foi mantido na superfície do espelho d'água, por meio de um sistema de flutuação constituído por uma seção de 0,8 m de tubo de 150 mm vedada nas extremidades por CAP soldável de mesmo diâmetro.

A variação da altura da água observada no tanque tranquilizador é transferida automaticamente ao lisímetro se o registro estiver aberto, por meio do princípio dos vasos comunicantes. No lisímetro, encontra-se instalada uma boia de nível (Item 6 da Figura 7), que permite o controle automático do fornecimento de água ao tanque de cultivo. Para isso, utilizou-se uma válvula solenoide (Item 4 da Figura 7) instalada na saída do tanque

abastecedor que é aberta diariamente entre 3 e 4 horas da manhã para repor a água evapotranspirada do dia.

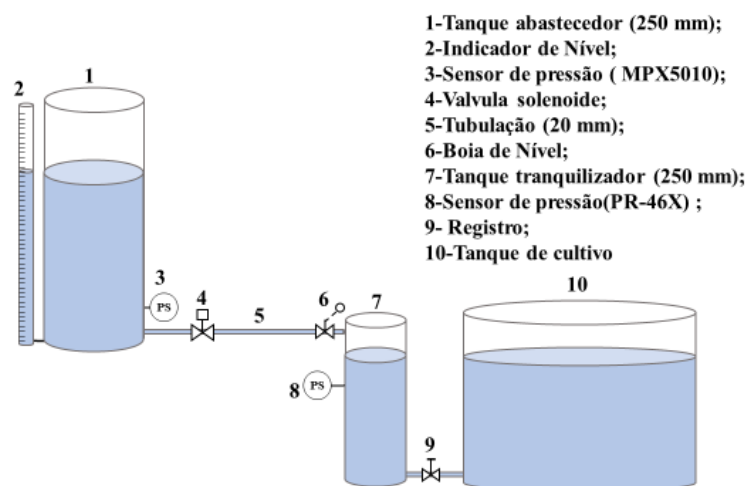


Figura 7. Unidade de monitoramento da evapotranspiração da taboa

A instrumentação utilizada no sistema de monitoramento automatizado é composta por um sistema de aquisição de dados (PNCF) desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Agrícola do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (LIAGRI-PPGEA-UFRB). Esse sistema é responsável pela coleta de dados dos sensores de pressão e pelo acionamento da válvula solenoide (Figura 8).

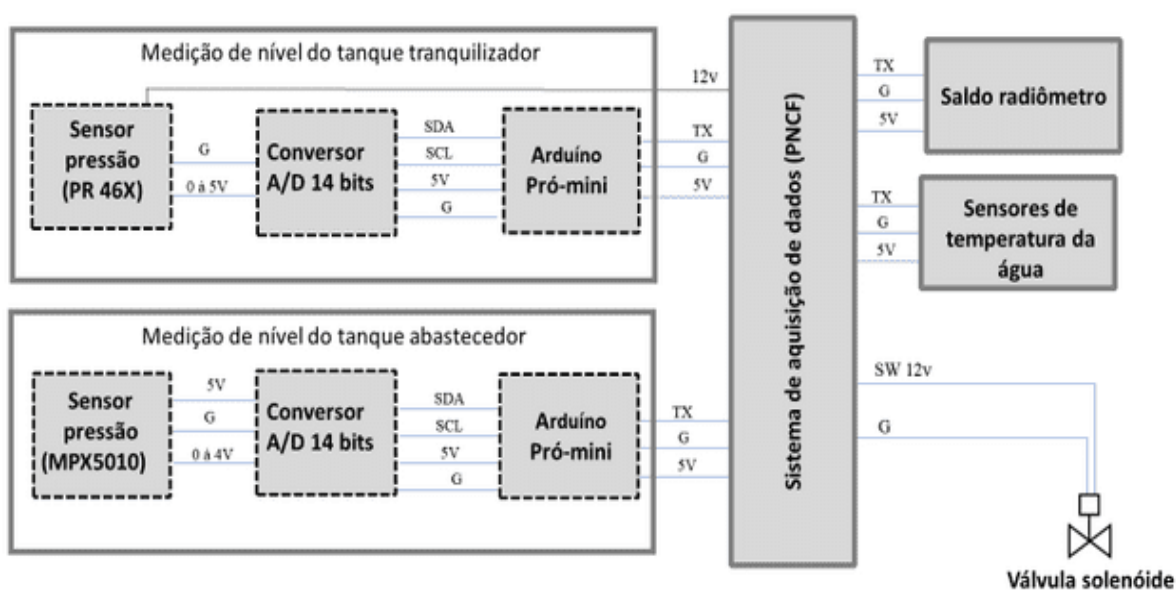


Figura 8. Sistema elétrico eletrônico do monitoramento da evapotranspiração da taboa.

A medição de nível direta refere-se ao método em que a grandeza é medida diretamente, utilizando como referência a posição do plano superior do líquido. Nesse tipo de medição, podem ser empregados dispositivos como flutuadores, visores de nível, boias e réguas (OLIVEIRA NETO, 2023).

Um sensor de pressão Mpx 5010 (Motorola) acoplado ao tanque abastecedor mede o nível de água por pressão diferencial. Esse sensor possui duas pequenas entradas. Uma delas é acoplada ao abastecedor e assim recebe a pressão exercida tanto pela coluna da água quanto pela pressão atmosférica, enquanto a outra entrada registra a pressão atmosférica. Esses sensores geram uma tensão de saída linearmente proporcional à pressão medida (OLIVEIRA NETO, 2023).

A tensão de saída aumenta, proporcionalmente, à medida que a diferença de pressão entre a entrada P1 (que mede a pressão da coluna d'água + pressão atmosférica) e o lado P2 (que mede a pressão atmosférica) cresce. Assim, o diferencial de pressão medida nestas duas entradas é o nível de coluna d'água.

Este sensor foi projetado para uma ampla gama de aplicações, como em microcontroladores, produzindo um sinal de saída analógico proporcional à pressão aplicada. O sensor de pressão foi pensado para ser utilizado no projeto de modo que trouxesse uma maior precisão frente ao sistema de medição com o indicador de nível dado pela régua graduada.

Na tubulação que conecta o tanque abastecedor ao tanque tranquilizador, foi instalada uma válvula solenoide. Esse sistema entra em operação durante um período específico da madrugada e, ao ser ativada, a válvula se abre, provocando a diminuição do nível de água no tanque abastecedor. Esse deslocamento gera uma diferença de pressão que aciona o sensor de pressão, resultando em um aumento na tensão de saída. A partir disso, o sistema de coleta de dados realiza automaticamente o registro da lâmina de água evapotranspirada.

No tanque tranquilizador foi inserido o sensor de pressão diferencial PR-46X (fonte: *Keller® Company*) que foi pensado para o projeto para auxiliar com uma maior precisão de leitura já que sua faixa de erro total $0 \pm 0,2\%$. Está alocado em uma plataforma de 10 cm de diâmetro, com um suporte no seu interior para sustentação do sensor, fazendo com que o mesmo fique a uma altura do fundo do recipiente e ao mesmo tempo fique submerso mantendo uma altura de no mínimo 0,3 m de água acima dele.

O sensor detecta a pressão da água e do ar. Quando essa pressão muda, um diafragma se movimenta e gera um sinal elétrico que é registrado pelo sistema de coleta de dados.

Esse sensor de pressão está ligado a um Arduino Pro-mini para coleta dos dados, que fará as medições da lâmina evapotranspirada a cada minuto podendo fornecer uma informação mais precisa tanto para os períodos de minuto a minuto quanto para cada hora do dia, além de manter um erro mínimo. Essa mudança do nível é registrada como a evapotranspiração da taboa.

A metodologia para análise comparativa de boias de nível aplicadas ao sistema de lisimetria de nível constante consistiu em testes com duas boias de nível, comumente utilizadas em tanques de abastecimento residencial. No contexto do projeto da evapotranspiração da taboa, a boia escolhida foi instalada no tanque tranquilizador, recebendo água do tanque abastecedor para repor a água evaporada durante o processo de evapotranspiração que ocorre ao longo do dia (Figura 9).

A busca por possíveis erros nos equipamentos utilizados é uma tentativa de otimizar a precisão na análise dos dados relacionados à evapotranspiração. O critério inicial para a seleção das boias foi seu tamanho, uma vez que a boia precisava ter dimensões adequadas para se ajustar a um tubo de 250 mm que serviu como tanque tranquilizador. Dessa forma, foram encontradas duas opções de boias: uma com 71 mm (boia 1) e outra com 190 mm (boia 2) de comprimento.

A fim de avaliar o controle do nível constante, a ser realizado pelas boias, as mesmas foram instaladas em um tanque de 250 litros e realizadas medições contínuas de nível por meio do sensor de pressão PR-46X e um registrador de dados Datalogger (*Campbell Scientific*). Os testes foram realizados em dezembro de 2023 e janeiro de 2024, na Figura 9 é apresentada a imagem do sistema de avaliação e das dimensões e especificações das boias.



Figura 9. Sistema de teste das boias montado no LIAGRI-PPGEA-UFRB, boia 1 lado esquerdo e boia 2 lados direito (adaptado de carmonamultimarcas.com.br (2024); e produto.mercadolivre.com.br/MLB-4873985266-valvula-flutuaco-esfera-boia-caixa-dagua-alta-vazo-1/2-JM)

3.2.4. Método de avaliação do Índice de Área Foliar

A avaliação da AF e do IAF das espécies salvinia e taboa foram realizadas com base na medição direta da área de uma sub amostra das folhas coletadas no lago. As sub amostras foram dispostas sobre um fundo branco contendo uma régua graduada de 10 cm, utilizada como escala de referência. As folhas foram prensadas com uma placa de acrílico transparente, posicionadas com a face superior voltada para cima, e então fotografadas. Após essa etapa, a imagem foi processada no software ImageJ (Image Processing and Analysis in Java, 2014) conforme ilustrado na Figura 10, obtendo-se a área foliar da sub amostra. Após a análise digital, as folhas foram colocadas em estufa a 65 °C até atingirem peso seco constante. Esse procedimento foi aplicado tanto para as amostras de salvinia quanto de taboa.

$$IAF = \frac{AF_a}{A_a} \quad (18)$$

$$AF_a = \frac{AF_{sa}}{m_{sa}} m_a \quad (19)$$

Em que IAF é o índice de área foliar; AF_a a área foliar da amostra (m^2); AF_{sa} é a área da sub amostra processada pelo software ImageJ (m^2); m_{sa} = massa seca da sub amostra processada (g); m_a = massa seca total da amostra (g) e A_a = área da amostra (m^2).

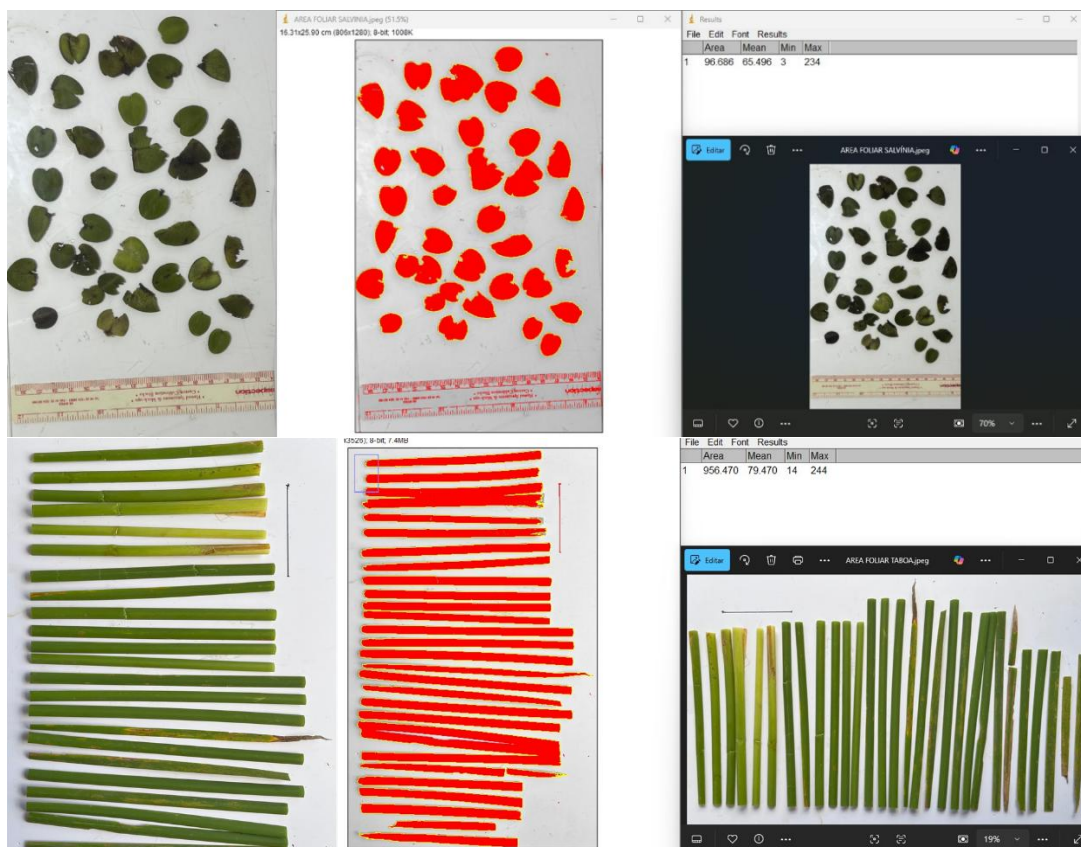


Figura 10. Processamento da área foliar das sub amostras de salvinia e taboa feitas no software ImageJ.

Foram retiradas amostras das plantas de salvinia e taboa a fim de determinar o Índice de Área Foliar (IAF) das plantas. A coleta das plantas de salvinia seguiu o método da amostragem destrutiva por quadrantes, utilizando um molde de tubo de pvc com área de 1 m², lançado de modo a alcançar uma área representativa do povoamento das macrófitas no lago. Já para a coleta das amostras de taboa, foi feita utilizando a área do tanque de cultivo com 1,79 m². Após o processo de obtenção da área foliar da sub amostra, foram retiradas as amostras de salvinia e de taboa das suas respectivas áreas e levadas a o laboratório, aonde foram separadas as partes consideradas como raiz e folha e levado a estufa pra secagem a 65 °C, até a secagem completa desse material, para que fosse finalizado processo de obtenção do índice de área foliar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Evaporação e evapotranspiração do reservatório

A análise inicial dos dados de EV e ET foi conduzida com base na Figura 11, que apresenta a variação desses parâmetros ao longo do período de avaliação. O gráfico contempla a EV em águas livres, a ET com salvinia e a ET com taboa acumuladas, além dos registros de precipitação. Apesar da alta variabilidade desses dados, visualmente nota-se que a ET com taboa de uma maneira geral é mais alto que a EV em águas livres, ET com salvinia.

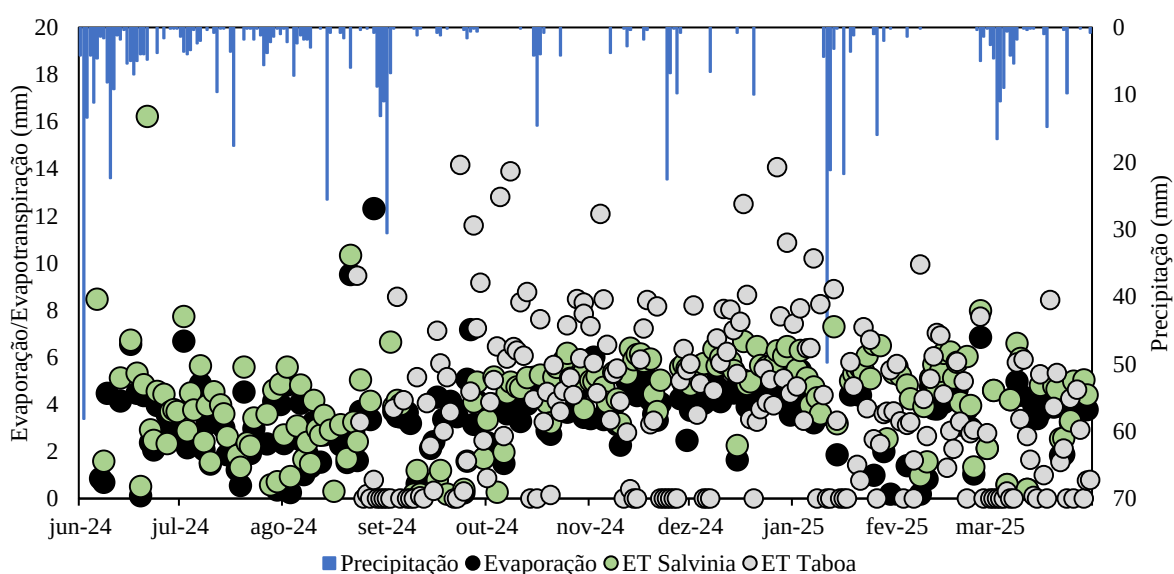


Figura 11. Análise gráfica dos dados da EV em águas livres, ET com salvinia, ET com taboa além da precipitação.

O ponto de partida para a discussão é a Figura 11 e a partir do gráfico é possível notar que a maior concentração entre a EV e a ET variaram entre 2 mm e 8 mm. O mais interessante de visualizar EV e da ET com salvinia, apresentando uma leve tendência de aumento e a correlação alta entre esses fenômenos.

Análise dos dados obtidos da evaporação direta de águas livres de macrófitas é discutida, considerando os desafios e limitações enfrentados durante o processo de medição. A análise abrangeu tanto os períodos diários quanto os dados acumulados para todo o período de coleta dos dados, com o objetivo de compreender a dinâmica da evaporação ao longo do período analisado.

Apesar de os resultados poderem ser influenciados por diversos fatores, como a seleção dos atributos, a escolha dos algoritmos e as técnicas de amostragem, um ponto essencial para garantir sua qualidade é o tratamento adequado dos valores ausentes, como destaca Fan *et al.* (2014). Foi observado um valor máximo de evaporação de 12,32 mm.dia⁻¹ e um valor mínimo de 0,13 mm.dia⁻¹, resultando em uma amplitude de 12,183 mm.dia⁻¹, considerada bastante elevada. Essa grande amplitude pode ser atribuída principalmente às mudanças nas condições meteorológicas ao longo do período estudado, como variações significativas na temperatura, na radiação solar e também na velocidade dos ventos, além de períodos de chuvas constantes que ocorrem na região do estudo.

Os valores de evaporação variaram conforme o esperado ao longo do período analisado. O desvio padrão, relativamente alto em relação à média, leva a interpretar uma grande variabilidade nos dados coletados. A existência de valores extremos, como o máximo de 12,32 mm.dia⁻¹, indica dias com alta demanda evaporativa, normalmente ligados a temperaturas muito altas, baixa umidade relativa do ar e ventos mais intensos e os números muito baixos deixando a entender que foram os dias com menos intensidade de brilho solar, por consequência menor temperatura e menor demanda atmosférica.

Embora a média da evaporação tenha sido de 3,53 mm.dia⁻¹, a grande dispersão dos dados e a amplitude elevada. Feitosa *et al.* (2021) estudaram o reservatório tropical-subúmido Gavião, Ceará, cuja taxa média de evaporação foi de 6,9 mm.dia⁻¹. Essa análise foi realizada utilizando um sensor de pressão hidrostática (precisão de 0,1mm), e feito em dois meses de análises que aconteceram de 11 de outubro de 2019 a 11 de dezembro de 2019, esses meses são correspondentes ao período mais seco nessa região de estudo.

Considerando a lâmina média evaporada e tomando como base um reservatório de pequeno porte com as mesmas dimensões do açude do Arroz, sem cobertura vegetal em sua superfície, estima-se uma perda diária de aproximadamente 18,13 m³. dia⁻¹ de água por evaporação. Esse volume, convertido em água disponível para uso humano ou animal, abastecimento doméstico, industrial e serviços, é bastante significativo.

Para efeito de comparação, tomando como base o consumo médio de água no Brasil, 150 litros por pessoa por dia de acordo com (EMBASA, 2025). Com isso, o volume evaporado em um açude com as proporções do açude da BEAA poderia suprir, diariamente, as necessidades de até 40 famílias, considerando 3 pessoas por família.

Apesar da relevância dos volumes estimados e das comparações realizadas quanto ao potencial de abastecimento hídrico, é importante ressaltar que o processo de coleta dos dados enfrentou limitações operacionais e ambientais que podem influenciar a precisão dos resultados. Entre os principais fatores que impactaram a coleta de dados estão interferências externas, como a presença de aves, e interrupções no fornecimento de energia elétrica, os períodos intensos de chuva, que interferiram a continuidade e a precisão das medições, gerando assim dados faltantes e uma série de ajustes que tiveram que ser feitos.

A Figura 12 ilustra a análise das taxas diárias de EV, tomando como base a ET com salvinia e a EV em águas livres. Os gráficos foram confeccionados no ambiente R com o uso do pacote `{ggstatsplot}` (PATIL, 2021).

Para a elaboração dos gráficos, foram excluídos os dias em que a precipitação ultrapassou 5 mm, considerando apenas os registros que apresentavam medições simultâneas da EV e da ET associada às macrófitas. Esse procedimento de filtragem foi aplicado uniformemente às duas espécies vegetais analisadas e a EV em águas livres de vegetação. A análise das séries temporais exigiu a presença de dados correspondentes nos dois conjuntos, de modo a assegurar consistência e validade comparativa entre os parâmetros avaliados.

Um aspecto particularmente relevante nesta análise é a presença de outliers em ambos os conjuntos de dados, o que reforça a existência de uma correlação positiva. Essa tendência observa-se para a faixa dos registros de EV em águas livres com valores baixos.

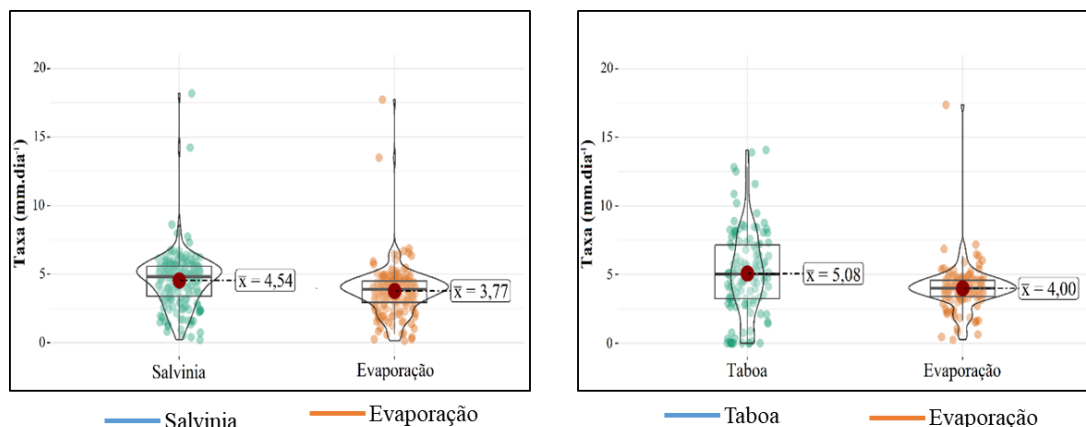


Figura 12. Representação gráfica das taxas diárias ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) de ET com Salvinia e Taboa com EV em Águas Livres nos dois períodos de monitoramento. A visualização inclui medidas descritivas (mediana, quartis e outliers).

Observa-se que a ET com salvinia apresentou uma mediana de $4,54 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ e a EV em superfície de águas livres $3,77 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$, indicando que a presença da macrófita intensificou o processo evaporativo. No entanto, o gráfico revela que a largura do violino no grupo da evaporação é mais acentuada em determinadas faixas, indicando maior concentração de dados próximos à média e a mediana, o que sugere uma distribuição mais homogênea nesse grupo.

Já no grupo ET com salvinia, a distribuição se apresenta mais estreita em algumas regiões demonstrando uma menor coesão no conjunto de dados e mais larga em outras, evidenciando uma maior dispersão dos dados.

A ET com taboa analisada a partir dessa abordagem, apresentou uma mediana de $5,08 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ para o mesmo período de análise da EV em águas livres que apresentou uma mediana de $4 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ havendo um incremento de $1,08 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ com relação ao valor da mediana. A dispersão dos dados relacionados a ET com taboa foi muito alta, revelando um afunilamento do “violino” no gráfico e para a evaporação um maior alargamento do “violino” revelando uma maior concentração dos dados em torno do valor médio e mediano, uma menor dispersão desses valores, sinal de muita coerência entre os dados da ET e da EV. A expectativa era que as taxas de ET com taboa (*Typha* spp.) fossem superiores àquelas em condição de águas livres.

Outro aspecto relevante foi a necessidade de adição de cloro à água do sistema lisimétrico, como forma de controlar o acúmulo de matéria orgânica, que frequentemente resultava no entupimento das linhas. Mesmo com a utilização de um filtro improvisado

(pano de algodão), foram registradas várias obstruções no sistema fator que pode, ainda que de forma indireta, ter interferido nos registros das taxas de EV em águas livres.

A adição do cloro também pode ter afetado o desenvolvimento das plantas, que ao final do período de análise não apresentavam um desenvolvimento pleno, de modo que não alcançaram a mesma altura e densidade das plantas do lago. Sugerindo uma menor capacidade dessas plantas transferirem água para a atmosfera.

Tabela 1. Número de observações, máximos, mínimos, médios, desvio padrão, coeficiente de variação e amplitude da EV, e ET com macrófitas com relação ao período total de coleta de dados levando em conta os dias com precipitação até 5 mm.

Condição experimental	EV em Águas Livres	ET com Salvinia	ET com Taboa
Nº observações (n)	195	197	167
Valor máximo (mm.dia ⁻¹)	12,32	16,24	14,16
Valor mínimo (mm.dia ⁻¹)	0,13	0,2	0,11
Média (mm.dia ⁻¹)	3,53	4,30	5,19
Desvio padrão (mm.dia ⁻¹)	1,54	1,95	2,88
C. de variação (%)	43,78	45,25	55,47
Amplitude (mm.dia ⁻¹)	12,18	16,04	14,06

As médias obtidas para EV em águas livres 3,53 mm.dia⁻¹, ET com salvinia média 4,30 mm.dia⁻¹ e ET com taboa média 5,19 mm.dia⁻¹ indicam diferenças relevantes no comportamento dos experimentos, sendo que a taboa apresentou maior valor médio. Além disso, os altos coeficientes de variação todos acima de 40%, mostram que há uma significativa variação ao longo do período de observação, com destaque para a taboa, que apresentou a maior variabilidade no conjunto de dados com um CV de 55,47%. A amplitude também reforça essa oscilação, revelando picos muito altos e quedas expressivas nas medições.

Para a ET com taboa uma análise muito interessante e impactante em termos absolutos a ser observada, seria o alto fator de acréscimo 47% nos valores médios, mesmo esses dados sendo observados em períodos distintos. A ET com taboa apresentando pelo menos 3 meses a menos de avaliação e partindo de um ponto em que essa se desenvolveu por completo no tanque de cultivo. partir dessa análise a taboa apresenta em média um acréscimo de 1,66 mm. dia⁻¹, enquanto esse acréscimo para a salvinia é de 0,77 mm, com relação a média da EV em águas livres.

Mesmo considerando a similaridade entre os conjuntos, esses dados mostram que cada unidade responde de forma distinta às condições ambientais, o que deve ser levado

em conta nas análises e aplicações práticas relacionadas ao comportamento hidrológico das espécies avaliadas.

Analisando os dados, é possível observar que o valor médio da ET com salvinia é superior aos valores da EV em águas livres, mas com uma correlação muito forte. Esse resultado faz sentido, considerando que a EV e a ET foram medidas diretamente por sensores do mesmo tipo e em condições experimentais muito similares tendo como diferença o tratamento com planta e sem planta.

Por outro lado, quando observado os valores mínimos de EV em águas livres e ET com salvinia foi inferior à EV em águas livres, isso demonstra como cada condição experimental se comporta com relação aos fatores que influenciam tanto a EV quanto a ET.

Baseando-se nas análises mensais das três condições experimentais e buscando depurar possíveis distorções derivadas da avaliação do período total, foi confeccionada a Tabela 2. Observa-se que nos meses de agosto e setembro, que correspondem a 20% do período total avaliado (2 de 10 meses), a EV em águas livres apresentou médias mensais superiores à ET com salvinia. Em relação à ET com Taboa, observa-se que a EV superou seus valores em apenas um dos meses avaliados, sendo consistentemente inferior nos demais. Em três ocasiões, os valores de EV também foram inferiores à ET com Salvinia.

Tabela 2. Dados médios mensais da EV em Águas Livres (mm) e ET com Taboa (mm) e ET com Salvinia (mm)

Mês/Ano	EV em Águas Livres (mm)	ET com Salvinia (mm)	ET com Taboa (mm)
jun/24	3,18	4,80	
jul/24	2,86	3,41	
ago/24	2,98	2,95	3,43
set/24	3,27	2,05	4,96
out/24	3,82	4,50	5,97
nov/24	4,16	5,17	5,67
dez/24	4,42	4,54	5,73
jan/25	3,48	5,15	5,14
fev/25	3,36	4,58	4,34
mar/25	3,42	4,01	3,33

Além das comparações mensais, uma análise dos acréscimos médios revela diferenças significativas entre as espécies vegetais utilizadas. Em termos absolutos, observa-se que a presença da Taboa promoveu um acréscimo médio mensal de aproximadamente 1,21 mm em relação à evaporação em águas livres, enquanto a Salvinia

apresentou um acréscimo médio mensal de cerca de 0,62 mm. Na Figura 13 uma análise gráfica trazendo como fonte, os valores médios mensais apresentados na Tabela 2.

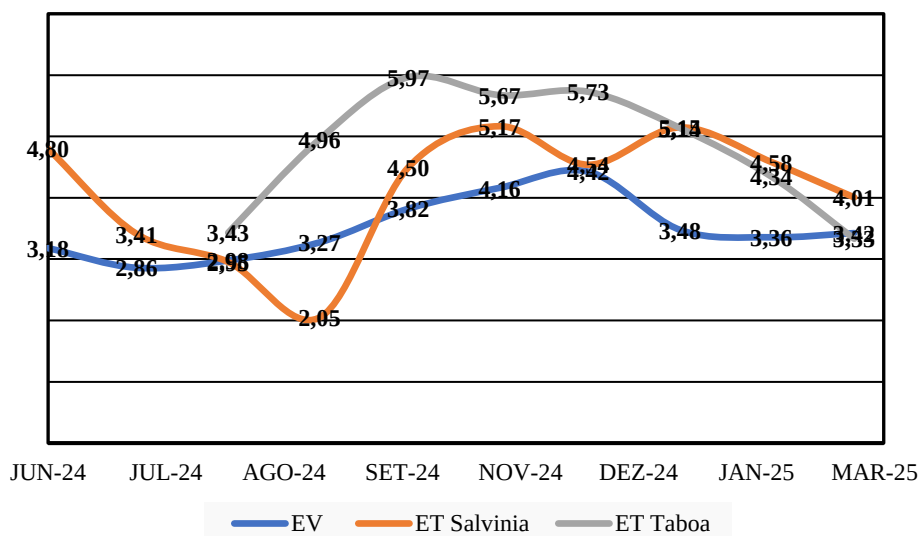


Figura 13. Análise gráfica dos valores médios mensais EV em águas livres, ET com salvinia e ET com taboa.

Considerando que a Taboa foi avaliada em um período reduzido três meses a menos e partindo do ponto em que seu desenvolvimento estava completo no tanque de cultivo, os acréscimos mensais foram consistentes, com destaque para os meses de setembro, outubro e novembro. Já a Salvinia, avaliada ao longo de todo o período, apresentou acréscimos mais modestos, embora constantes.

Esses resultados reforçam o impacto da vegetação aquática sobre os processos de evaporativos, evidenciando que a Taboa, mesmo com menor tempo de avaliação, promoveu um aumento mais expressivo nos valores de ET quando comparada à Salvinia, pra um ponto da avaliação ser coerente e fidedigna tem que ser dito que houve um problema no sistema da taboa ao fazer a manutenção de um equipamento que era utilizado para medir radiação solar haver quebrado uma boa parte das plantas, o que pode ter acarretando a morte de algumas plantas, o que coincide com o período de redução da evapotranspiração.

Ao fazer averiguações diárias nos tanques de EV, as variações no nível do tanque evaporimétrico puderam ser observadas visualmente ao longo dos dias, em períodos sem ocorrência de precipitação, foi possível notar o rebaixamento gradual do nível da água. Essa dinâmica era facilitada pela presença de material orgânico acumulado nas bordas do tanque, que funcionava como referência visual das oscilações de nível.

Da mesma forma, durante os períodos chuvosos, observava-se o aumento do nível do tanque, cuja magnitude variava conforme a intensidade e o volume das precipitações

registradas, muitas vezes indo muito próximo do transbordamento do tanque, sendo necessária a retirada do excesso de água.

4.2. Índice de área foliar

Para a *Salvinia*, o índice de área foliar (IAF) estimado foi de 2,42, evidenciando uma relação significativa entre a ocupação da superfície do lago e a área de exposição foliar. A área foliar (AF) correspondente às plantas coletadas foi de 2,42 m², valor superior à área ocupada, indicando que a cobertura vegetal amplia substancialmente a superfície de interação com os elementos meteorológicos. Esse resultado reforça a compreensão de que há acréscimos relevantes nos processos evaporativos em áreas cobertas por vegetação flutuante, quando comparadas às regiões de água livre

A superfície exposta das plantas aos fatores atmosféricos foi praticamente uma vez e meia superior à área de uma superfície de água sem cobertura vegetal, o que indica maior potencial de perdas por evapotranspiração. No caso do girassol, Salbaş e Erdem (2023) demonstraram uma correlação linear entre o índice de área foliar (IAF) e a evapotranspiração ao longo das estações, evidenciando o papel do IAF na regulação hídrica da cultura.

Esses fatores ajudam a explicar os valores encontrados e reforçam a importância de a estrutura foliar no balanço hídrico de ambientes aquáticos com presença de macrófitas, na Tabela 3 são apresentados a área foliar, massa seca e eficiência foliar da salvinia.

Tabela 3. Relação entre a área foliar e a massa seca total (m². g⁻¹) para a salvinia

Espécie	Área foliar total (m²)	Massa seca total (g)	Eficiência foliar (m²/g)
Salvinia	2,42	223,45	0,0108

O valor de eficiência foliar obtido (0,0108 m²/g) indica que, mesmo com uma menor quantidade de massa seca, as plantas de *Salvinia* conseguem expandir significativamente sua área de cobertura. Essa característica contribui para intensificar os processos evaporativos em superfícies vegetadas, em comparação com áreas de água livre. Além disso, essa relação afeta diretamente a eficiência no uso da água e a condutância estomática do dossel parâmetros que, segundo Wang et al. (2021), são altamente sensíveis às variações no IAF. Alterações nesse índice também influenciam

processos fisiológicos como a fotossíntese e o acúmulo de biomassa, conforme apontado por LI et al. (2019).

Avaliou-se o impacto da cobertura por plantas aquáticas flutuantes em um lago como o de Sobradinho, localizado no Rio São Francisco, cuja superfície de espelho d'água é de 4.214 km² segundo a (CHESF, 2025). Considerando um cenário de cobertura total por salvinia, tomada como espécie representativa, e aplicando-se o fator de incremento do índice de área foliar (IAF) determinado para essa planta, que foi de 2,42, estima-se que a área exposta aos elementos meteorológicos passaria a aproximadamente 10.198 km². Esse valor representa um acréscimo de 5.984 km² em relação à área superficial original do reservatório.

Esse valor destaca o potencial da espécie em interagir com as condições atmosféricas e influenciar os fluxos de evaporação, evidenciando que, mesmo com menor índice em comparação à taboa, sua contribuição também é relevante nos processos hidrológicos da área estudada.

Corroborando a importância do IAF nos processos evaporativos (JIA; WANG, 2021), em um estudo com macieiras, observaram uma relação exponencial forte e significativa entre o IAF e a evapotranspiração, indicando o quanto esse índice pode influenciar diretamente na dinâmica de perda de água para a atmosfera.

A área foliar é um dos principais componentes na determinação dos processos fisiológicos das plantas, pois influencia diretamente a taxa de transpiração. À medida que a área foliar se expande, intensifica-se o processo de evapotranspiração, uma vez que há maior superfície disponível para a perda de água. Dessa forma, evidencia-se uma relação proporcional entre o aumento da área foliar e o crescimento do consumo hídrico das plantas via transpiração.

A evapotranspiração das plantas especialmente das macrófitas exerce influência significativa sobre o balanço hídrico de reservatórios e bacias hidrográficas. Segundo Barreto *et al.* (2009), aproximadamente 64% a 71% da precipitação em bacias retorna à atmosfera por meio da evapotranspiração, enquanto a recarga direta dos aquíferos representa de 22% a 27%, e o escoamento superficial contribui com cerca de 7%.

Também tem que ficar evidenciado que a área foliar utilizada é um valor total, não sendo feito em diversas fases da cultura, pelo fato de as plantas estarem sendo utilizadas para a avaliação da evapotranspiração, já que o método utilizado foi o método destrutivo. Sendo assim, o fator determinante para esse aumento foi a expansão da área foliar, que

resultou em maior capacidade de transpiração pelas plantas, conforme indicado por Coelho *et al.* (2004).

O IAF da taboa foi de 3.92, sendo que a taboa apresenta um emaranhado de plantas que, à primeira vista, se mostra impenetrável, algo que é confirmado pelas análises do índice de área foliar. Para a taboa, os resultados indicam que, para cada 1,79 m² de área de cobertura, corresponde a uma área foliar de 7,02 m², o que representa um aumento de praticamente quatro vezes na superfície de exposição.

Esse acréscimo equivale a um aumento de cerca de 300% na área de atuação dos parâmetros meteorológicos e ambientais. Esse valor demonstra o elevado grau de ocupação espacial dessa espécie, indicando não apenas sua densidade estrutural, mas também sua maior suscetibilidade às influências dos parâmetros meteorológicos, além de reforçar sua significativa participação nos processos evaporativos. Segundo Jiménez-Rodríguez *et al.*, (2019), *T. geniculata* apresenta a maior área foliar entre as espécies analisadas (152,9 cm²), o que favorece uma maior transferência de água para a atmosfera em comparação a outras coberturas vegetadas de pântanos e áreas de águas abertas.

Partindo de o cenário de análise da área foliar, foram feitas também estimativas de eficiência foliar, para entender a real influência das macrófitas nos processos evaporativos. A ideia da eficiência foliar está relacionada ao tamanho da área que a planta ocupa em função da biomassa que ela produz.

Para cobrir uma grande superfície com suas folhas, a salvinia precisa gerar uma quantidade de biomassa bem menor em comparação com a taboa, que mesmo tendo um índice de área foliar cerca de duas vezes e meia maior que a da salvinia, apresenta uma massa seca total em torno de 20 vezes maior.

Daí vem a ideia de eficiência foliar usada aqui. Na Tabela 4 estão apresentados os dados de área foliar e da massa seca total, que inclui a biomassa das raízes somada à das folhas. Essa diferença na superfície evaporante entre a taboa e a área de coleta ajuda a entender por que cada uma dessas plantas tem um comportamento diferente em relação à evaporação e como elas respondem às mudanças nas condições meteorológicas e ambientais.

Tabela 4. Valor totais da área foliar, massa seca total e eficiência foliar da taboa.

Espécie	Área foliar total (m²)	Massa seca total (g)	Eficiência foliar (m²/g)
Taboa	7,02	5781,1	0,0012

Tal característica reforça a compreensão sobre a maior influência da taboa nos processos evaporativos, uma vez que diversos autores apontam a área foliar como um dos principais fatores responsáveis pelos elevados valores de transpiração em plantas.

A taboa com uma massa seca muito maior e eficiência foliar muito menor. No estudo realizado por (WERADUWAGE, *et al.* 2015), as avaliações indicam que a medição de área foliar não representava o desenvolvimento da planta. Na Figura 13 a correlação entre a ET com salvinia e a EV em águas livres acumuladas foi significativa, reforçando a importância do método de medição utilizado, a ET com taboa apresenta uma correlação muito forte para essa condição experimental. O fato de os sensores serem do mesmo modelo certamente contribuiu para essa boa correlação, já que permitiam medições mais precisas e acuradas, quando se trata da EV em águas livres e da ET com salvinia.

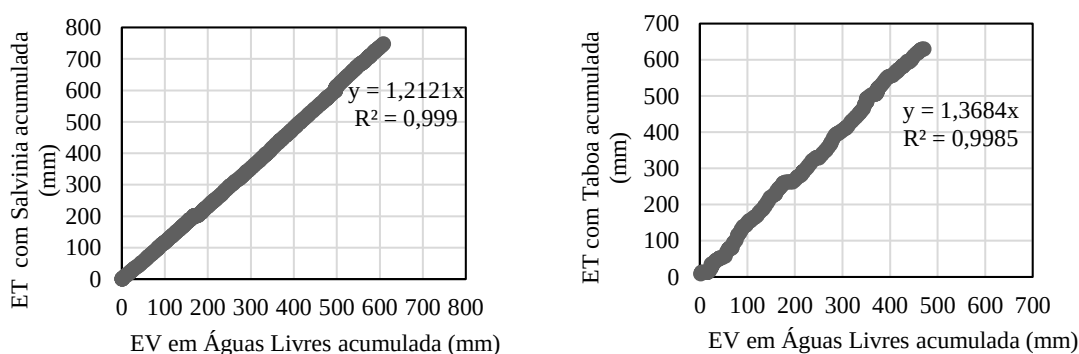


Figura 13. Correlação da ET com Salvinia acumulada, EV em Águas Livres acumulada para o período de 01/06/2024 a 31/03/2025 e correlação da ET com Taboa acumulada, EV em Águas Livres acumulada para o período de 23/08/2024 a 31/03/2025, levando em conta os dias em que tiveram registro para os dois tratamentos.

Em outros estudos com macrófitas, os valores da evapotranspiração também tendem a ser superiores aos da EV em águas livres. Considerando os valores acumulados para determinar uma relação entre a ET com salvinia e a EV em águas livres (EV), observa-se que a primeira supera a segunda em 21%. Isso confirma, para a salvinia, a hipótese desse trabalho, segundo a qual as taxas de transferência de água do reservatório para a atmosfera são superiores quando há presença de macrófita.

Em um estudo realizado no Rio Paraná na Argentina (LALLANA *et al.*, 1987), com diversas espécies de macrófitas, encontrou-se uma relação ET/EV em especial para

a *Salvinia Herzogii* de 1,20 em média, o que condiz com o estudo que foi realizado na BEAA (1.19).

Os valores da ET com taboa foram correlacionados com os dados de EV em águas livres de macrófitas e se mostraram superiores, conforme antecipado na hipótese do trabalho. Essa diferença é atribuída à maior exposição da taboa às condições atmosféricas, dada sua projeção vertical.

Os valores acumulados da ET com taboa foram correlacionados com os valores de água livre de macrófitas já que a ideia do trabalho era investigar a influência da tomada excessiva das macrófitas sobre os processos evaporativos, e para isso foi feita uma análise da evapotranspiração total no período. O estudo realizado na BEAA em que foi medido a evapotranspiração da taboa encontrou valor médio de evapotranspiração de 5,19 mm.dia⁻¹ com um desvio padrão de 2,8 mm.dia⁻¹, enquanto no estudo realizado por Abteu e Obeysekera (1995) no período de 12 de fevereiro a 19 de dezembro de 1993 o valor médio foi de 3,9 mm.dia⁻¹.

O acréscimo da evaporação relacionada a taboa foi da ordem de 30% com relação apresentação gráfica, considerando os valores acumulados, esse dado reforça a hipótese do trabalho, de que os processos evaporativos com a presença das macrófitas seriam maiores que a evaporação de água livre de plantas. Os dados de evaporação e evapotranspiração apresentaram uma forte correlação, corroborando observações já descritas na literatura, a exemplo de Otis (1914) que descreve que em sua pesquisa realizada nos Estados Unidos, a taboa (*Typha* sp.) foi identificada como uma das plantas que mais aumentam a evaporação da água, com taxas chegando a ser até três vezes maiores do que aquelas observadas em superfícies livres. Esse aumento significativo é atribuído à morfologia da planta, especialmente ao crescimento linear e vertical das folhas, que amplia a área exposta e favorece a perda de água por transpiração.

A amplitude observada nos dados de EV e ET reflete a dinâmica das condições meteorológicas no ambiente lacustre, evidenciando variações associadas à demanda evaporativa. Essas oscilações são resultantes da alternância entre períodos de intensa radiação solar, temperaturas elevadas e ocorrência de ventos, que influenciam diretamente os fluxos hídricos para a atmosfera.

Considerando essa variação, observa-se a ocorrência de valores elevados em dias ensolarados, contrastando com reduções expressivas em dias nublados ou chuvosos. De acordo com o estudo conduzido por Lemos Filho et al. (2010), as variações dos elementos meteorológicos impactam significativamente os valores da evapotranspiração de

referência (ET_0) em diferentes regiões do estado de Minas Gerais, sendo o déficit de pressão de vapor e a velocidade do vento os parâmetros de maior influência sobre essa variabilidade.

Nesse ponto da análise, observa-se um aspecto relevante, embora as médias da EV e da ET apresentem valores próximos como apresentados na tabela, respectivamente, os valores máximos são significativamente distintos, evidenciando picos de intensidade diferenciada nos processos evaporativos. Esse contraste sugere a influência das condições meteorológicas sobre a variabilidade dos dados, ou mesmo a presença de outliers que não foram possíveis a retirada por falta de identificação.

As plantas da taboa apresentam altura superior às demais e sua superfície evaporante se encontra acima da superfície mais úmida (JIMÉNEZ-RODRÍGUEZ *et al.*, 2019). *T. domingensis* tem folhas até 50 cm acima da superfície da água, expondo as plantas a uma atmosfera menos saturada, mais exposta ao vento, levando a alta evaporação. A taboa da BEAA tem alturas que variam de 1,5 m a 3 m acima da superfície da água.

4.3. Avaliação do sistema de medição da evapotranspiração da taboa

Durante o período de observação, as boias apresentaram respostas distintas ao longo do tempo. Os níveis da boia1 variaram entre 123,9 mm e 134,4 mm, com flutuações em torno desses valores. Por outro lado, os valores da boia 2 variaram entre 106,0 mm e 111,5 mm, apresentando uma amplitude de variação menor em comparação com a boia 1.

A boia 1 apresenta flutuações mais amplas, o que sugere menor sensibilidade às variações de nível. Essa característica pode acarretar um erro maior nas medições, especialmente em situações em que a evapotranspiração registrada seja inferior a 10,5 mm. Nesses casos, não há identificação visual da variação na régua e na mangueira, já que o erro supera o valor da própria medida.

Por outro lado, a boia 2 apresenta uma variação mais estreita, indicando maior sensibilidade às flutuações de nível e, consequentemente, maior controle e menor erro na estimativa da evapotranspiração. No entanto, mesmo com esse desempenho mais preciso, medidas inferiores a 5,5 mm não seriam visualmente perceptíveis na régua e na mangueira, o que limita a detecção de pequenas variações.

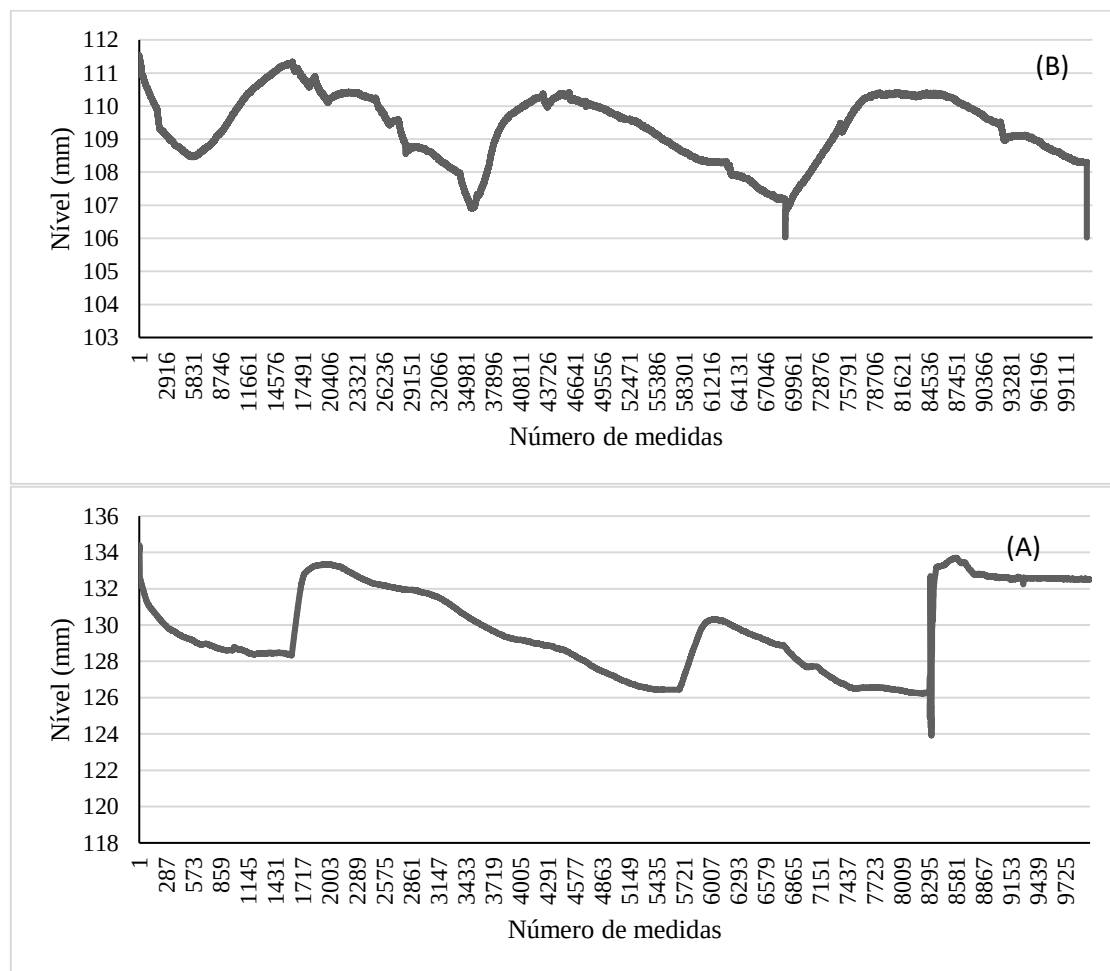


Figura14. Evolução temporal dos níveis da boia 1 (A) e boia 2 (B).

As diferenças nas amplitudes correspondem ao erro de cada boia. Quando é mencionado que essas diferenças de amplitude são os erros das boias, esse fato é relatado por que a boia só aciona quando há um rebaixamento de nível para a boia 2, um rebaixamento de 5,5 mm, referente ao seu erro e da boia 1 um rebaixamento do nível de 10,5 mm valor referente ao seu erro.

Esse erro é bastante expressivo considerando que a lâmina evapotranspirada em um dia para muitas culturas é maior. A exemplo de Miranda (2011) que utilizou lisímetros de drenagem para determinar o coeficiente de cultivo da mamoneira, cv. Al Guarany, em plantio adensado, sob as condições climáticas de Lavras-MG. Os volumes evapotranspirados (Etc) nas fases inicial, de crescimento, intermediária e final foram, respectivamente, 1,65 mm.dia⁻¹; 3,07 mm.dia⁻¹; 9,14 mm.dia⁻¹ e 5,85 mm.dia⁻¹. O erro

apresentado inviabiliza estimativas diárias da evapotranspiração, devendo um período maior ser considerado para estimativas mais acuradas.

As medições da evapotranspiração foram realizadas por meio de um sistema de lisimetria de nível constante, no período de agosto de 2024 a março de 2025, composto por uma régua graduada e uma mangueira conectada ao tanque de cultivo da taboa (*Typha* spp.), esse sistema permitiu a quantificação contínua da ET com taboa de forma simples.

Outro fator que influenciou os resultados foi a ocorrência de precipitações, já que o tanque de cultivo possui abertura superior e, portanto, está diretamente exposto à chuva, um fenômeno frequente na região do estudo. Assim, foi necessário realizar o monitoramento diário do nível do tanque de abastecimento, registrando visualmente quaisquer variações perceptíveis.

Estabeleceu-se uma relação de equivalência entre as medições da régua e a variação do nível no tanque de cultivo, sendo que cada 1 mm medido na régua correspondia a um rebaixamento de 0,03 mm no nível de água do tanque de cultivo. Essa equivalência foi determinada com base no volume e na capacidade dos reservatórios utilizados.

A proposta de utilização do sistema de lisimetria de nível constante visou desenvolver uma metodologia alternativa e de baixo custo para a mensuração da evapotranspiração, viabilizando sua aplicação em diferentes regiões, em contraste com o alto custo dos sensores com tecnologia embarcada, que dificultam a replicação em larga escala desse modelo de experimento.

Os valores de ET variaram entre 0 e 19,1 mm.dia⁻¹, com picos após o reabastecimento do tanque e durante períodos de alta demanda evaporativa, caracterizados por dias secos, quentes e ensolarados. As medidas obtidas por meio da régua graduada apresentaram resultados sujeitos às falhas no funcionamento da boia.

Esse comportamento é compatível com o relatado por Abtew e Obeysekera (1995), que, ao utilizar lisímetros e três métodos de estimativa em condições tropicais, identificaram valores médios de evapotranspiração diária de 3,9 mm.dia⁻¹ para *Typha domingensis*. Nos demais meses, os valores médios de ET diária foram de 5,39; 5,81 e 5,23 mm dia⁻¹, demonstrando a influência das variáveis climáticas sobre a necessidade hídrica da cultura.

Durante o período experimental, as medições foram realizadas diariamente. Contudo, ocorreram problemas pontuais relacionados ao entupimento da boia de nível, o que exigiu manutenção regular a cada 15 dias. Essas manutenções consistiam, principalmente, na limpeza da tela filtrante acoplada ao sistema da boia. O entupimento ocorreu devido à utilização da água do próprio açude para o abastecimento, a qual, mesmo após filtragem, ainda continha impurezas que comprometiam o funcionamento do sistema.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nessa pesquisa, conclui-se que há influência direta das macrófitas sobre os processos evaporativos no reservatório estudado, o que confirma a hipótese dessa pesquisa. A salvinia apresentou, em média, taxa de evapotranspiração superior ($0,77 \text{ mm.dia}^{-1}$) à evaporação em águas livres. Isso equivalente a um acréscimo de 21% em relação à taxa do sistema sem vegetação. A taboa apresentou, em média, taxa de evapotranspiração superior ($1,68 \text{ mm.dia}^{-1}$) à evaporação em águas livres. Isso equivalente a um acréscimo de 33% em relação à taxa do sistema sem vegetação. A razão entre a evapotranspiração das macrófitas e a evaporação em águas livres, na escala diária, apresentou grande dispersão, refletindo a complexidade do sistema. Isso se deve, em parte, à existência de seres vivos (macrófitas), influenciando a dinâmica dos processos e suas respostas. Conclui-se também que, embora a relação entre a evapotranspiração das macrófitas não apresente proporcionalidade com o índice de área foliar, foi possível avaliar correlação entre as grandezas. Isso pode ter se dado pelo fato de não ter havido monitoramento em estádios distintos de desenvolvimento das macrófitas. Concluiu-se que as boias utilizadas na avaliação apresentam erros que podem ser diluídos, se essa avaliação for feita por um período de tempo mais extenso. Recomenda-se investigar a influência da presença de macrófitas sobre os reservatórios de abastecimento público e, portanto, sobre a gestão das águas, particularmente para abastecimento humano, animal, industrial ou agrícola.

6. REFERÊNCIAS

- ABTEW, W.; OBEYSEKERA, J. Lysimeter study of evapotranspiration of cattails and comparison of 3 estimation methods. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n. 1, p. 121 a 129, 1995.
- ANDERSEN, I. H.; DONS, D.; NILSEN, S.; HAUGSTAD, M. K. Growth, photosynthesis and photorespiration of *Lemna gibba*: response to variations in CO₂ and O₂ concentrations and photon flux density. **Photosynthesis Research**, v. 6, p. 87 a 96, 1985.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **ANA lança estudo sobre estimativa de evapotranspiração real no Brasil**. *Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico*, 17 jan. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-lanca-estudo-sobre-estimativa-de-evapotranspiracao-real-no-brasil>. Acesso em: 7 fev. 2025.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, p. 297 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, S. T., EDWARDS, B. L., REBA, M. L., & KEIM, R. F. Sub-canopy evapotranspiration from floating vegetation and open water in a swamp forest. **Wetlands**, v. 36, p. 681 a 688, 2016.
- ALMEIDA, NÚBIA OLIVEIRA; DE SIQUEIRA PINTO, JOSEFA ELIANE SANTANA. Seca e política de recursos hídricos na bacia do rio Brumado, Bahia. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 9, p. 1133 a 1145, 2012.
- ALVAREZ, V. MARTINEZ; GONZÁLEZ-REAL, M. M.; BAILE, A.; MAESTRE VALERO, J. F.; ELVIRA, GALLEGÓ B. Regional assessment of evaporation from agricultural Irrigation reservoirs in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 9, p. 1056 a 1066, 2008.
- ARAÚJO, D. R.; MENDONÇA, A. S. F.; REIS, J. A. T. Análise de variação e comparação de índices de estado trófico: reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos de rio bonito e suíça. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 23, n. 1, p. 55 a 62, fev. 2018.
- ASSUNÇÃO, LUIZ MÁRCIO; LIVINGSTONE, IAN. Desenvolvimento inadequado: construção de açudes e secas no sertão do Nordeste. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 47, n. 3, p. 425 a 448, 1993.
- ASSUNÇÃO, LUIZ MÁRCIO & LIVINGSTONE, IAN. **Água, seca e desenvolvimento no Nordeste do Brasil** Recife, SUDENE, 1988.
- ATTARD, K. M., GLUD, R. N., MCGINNIS, D. F., RYSGAARD, S., & BERG, P. Seasonal rates of benthic primary production in a Greenland fjord measured by aquatic eddy covariance. **Limnology and Oceanography**, v.64, n.3, 1144–1158, 2019.
- BARRETO, C. E. A. G.; WENDLAND, E.; MARCUZZO, F. F. N. Estimativa da evapotranspiração a partir de variação de nível estático de aquífero. **Engenharia**

Agrícola, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 48–57, mar. 2009. BERG, P., KOOPMANS, D. J., HUETTEL, M., LI, H., MORI, K., & WÜEST, A. A new robust oxygen-temperature sensor for aquatic eddy covariance measurements. **Limnology and Oceanography: Methods**, v.18, n.9, 511 a 523, (2020).

BRITANNICA. What type of climate does the Everglades have? Encyclopædia Britannica. Disponível em: <https://www.britannica.com/question/What-type-of-climate-does-the-Everglades-have>. Acesso em: 22 abr. 2025. BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1982.

CAMPANILI, M. No Brasil, há déficit em meio à abundância. **Agência Estado, Caderno Ciência**, São Paulo, 2003.

CAMPOS, J.N.B. Modelando o Rendimento-Evaporação-Derramamento no Processo de Armazenamento do Reservatório: O Diagrama do Triângulo de Regulação. **Water Resources Management** **24**, 3487 a 3511, 2010.

CARVALHO, J. D. T. **Morfoanatomia e desenvolvimento de órgãos reprodutivos em espécies de *Typha* L. (Typhaceae)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Botânica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. 97 p.

CARDOSO, G.M.; JUSTINO, F. Simulação dos componentes da evapotranspiração sob condições climáticas atuais e de cenários climáticos futuros de aquecimento global com o uso de modelos de clima-vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 85 a 95, 2014.

CHAMBERS, PATRICIA A.; LACOUL, PAULA; MURPHY, KEVIN J.; THOMAZ, SIDINEI M. Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater. **Hydrobiologia**, v. 595, n. 1, p. 9 a 26, 2008.

COELHO FILHO, M. A.; ANGELOCCI, L. R.; DELGADO ROJAS, J. S.; CAMPECHE, L. F. S. M.; FOLEGATTI, M. V. Relações entre transpiração máxima, área foliar e evapotranspiração de referência em pomar jovem de lima ácida ‘Tahiti’. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 265–274, 2004.

COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (CHESF). Sistema Chesf Sobradinho. Disponível em: <https://www.chesf.com.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Sobradinho.aspx>. Acesso em: 24 jul. 2025.

DA SILVA, ROBERTO MARINHO ALVES. Entre o Combate à Seca e a Convivência com o Semiárido: políticas públicas e transição paradigmática. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 38, n. 3, p. 466 a 485, 2007.

DANTAS, S. P. Dimensionamento e gestão de reservatórios: breve discussão acerca da experiência do estado do Ceará/Brasil. **Revista Verde Grande – Geografia e Interdisciplinaridade**, Montes Claros, v. 2, n. 1, p. 25 a 36, 2020.

DANTAS, S. P. Dimensionamento e gestão de reservatórios: breve discussão acerca da experiência do estado do Ceará/Brasil. **Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, Montes Claros, v. 2, n.1, p. 25 a 36, 2020.

DNOCS, Departamento Nacional de Obras Contra Seca, **Castanhão**. Brasília, Dnocs, 2020.

DE LA SOTA, E. R.; PAZOS, L. A. C. de. On the stomata of *Salvinia herzogii* (Salviniaceae, Pteridophyta). **Plant Systematics and Evolution**, v. 172, p. 119 a 125, 1990.

EMBASA-Empresa Baiana de Águas e Saneamento. Reservatório. Disponível em: <https://www.embasa.ba.gov.br/reservatório>. Acesso em :22 jul.2025.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, p. 790, 2011a.

ESTEVES F.A. **Fundamentos de Limnologia**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, p. 790, 2011b.

FAN, JIANQING; HAN, FANG; LIU, HAN. Challenges of big data analysis. **National science review**, v. 1, n. 2, p. 293 a 314, 2014.

FARIA, R. T. DE; CAMPECHE, F.S.M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 237 a 242, 2006.

FLORIDA CLIMATE CENTER. Everglades City Climate Normals (1991-2020). Florida State University. Disponível em: <https://climatecenter.fsu.edu/products-services/data/1991-2020-normals/everglades>. Acesso em: 22 abr. 2025.

IMAGEJ. *Image processing and analysis in Java*. Bethesda: National Institutes of Health, 2014.

JENSEN, M. E. e ALLEN, R. G. Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements. **American Society of Civil Engineers**, 2ª Ed., p. 744, 2016.

JIA, Q., & WANG, Y.-P. Relações entre o Índice de Área Foliar e a Evapotranspiração e o Coeficiente de Cultura em um Pomar de Maçãs em Colinas no Planalto de Loess. **Water**, v.13, nº14: 1957, 2021.

JIMÉNEZ-RODRÍGUEZ, C. D.; ESQUIVEL-VARGAS, C.; COENDERS-GERRITS, M.; SASA-MARÍN, M. Quantificação das taxas de evaporação de seis tipos de cobertura de zonas úmidas no Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. **Água**, v. 11, p. 674, 2019.

LEMO FILHO, L. C. A.; CARVALHO, L. G.; EVANGELISTA, A. W. P.; ALVES JÚNIOR, J. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1367–1373, dez. 2010.

LI, J.; QU, Z.; CHEN, J.; YANG, B.; HUANG, Y. Effect of Planting Density on the Growth and Yield of Sunflower under Mulched Drip Irrigation. **Water**, n. 11, v.4, p. 1-14, 2019.

LINACRE, E.T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, v. 18, n. 6, p. 409 a 424, 1977.

LIMA, JOÃO FERNANDO SOUZA; PERTILE, NOELI. 60 ANOS DA PRIMEIRA GRANDE OBRA “CONTRA AS SECAS” NO ESTADO DA BAHIA: AÇUDE PÚBLICO JACURICI. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 20, n. 70, p. 385 a 397, 2019.

LOLIS, S. F.; THOMAZ, S. M. Monitoramento da composição específica da comunidade de macrófitas aquáticas no reservatório Luís Eduardo Magalhães. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 29, n. 2, p. 247 a 258, 2011.

MCGUINNESS, J. L.; BORDNE, E. F. Um comparador da evapotranspiração potencial derivada do lisímetro com valores computados. *Boletim Técnico*, 1452. Washington, DC: Serviço de Pesquisa Agrícola, Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, 1972.

MCMAHON, T. A.; FINLAYSON, B. L.; PEEL, M. C. Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data. **Wiley Water**, v. 3, n. 6, p. 788 a 818, 2016.

MIRANDA, W. L. **Coefficiente de cultura para a mamoneira em plantio adensado**. 2011. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras, 2011. 75p.

MITCHELL, M. E.; LISHAWA, S. C.; GEDDES, P.; LARKIN, D. J.; TREERING, D.; TUCHMAN, N. C. Lakes coastal wetland complex. **Wetlands**, v. 31, n. 5, p. 1039 a 1047, 2011.

NEVES, E. das.; GUTIERRES, M. I. de A.; SILVA, P. F. da.; SANTOS, T. M. Determination of hydric demand through the use of evaporimeters tanks. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. e4611124578, 2022.

NOVAIS, ROBERTO PEREIRA DE; CARVALHO JÚNIOR, ADAUTO PEREIRA DE; OLIVEIRA, MANOEL ALVES DE. A perenização de rios pela construção de açudes para o combate à seca no semiárido nordestino. **Geopauta**, v. 6, p. e9401, 2022.

NASCIMENTO, S. R. **Oscilações no desempenho de motoristas profissionais, motoristas pluriacidentados e não-motoristas em tarefas de atenção mantida**. 2001. Dissertação (Mestrado em Psicologia) – Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

OLIVEIRA, DIEGO BRUNO SILVA DE. **O uso das tecnologias sociais hídricas na zona rural do semiárido paraibano: entre o combate a seca e a convivência com o semiárido**. 2013. 186 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

OLIVEIRA, GREICE XIMENA SANTOS. **Relações entre medidas de evaporação de superfícies de água livre por evaporímetros e estimativas por métodos meteorológicos em duas regiões do Estado de São Paulo**. 2009. (Tese Doutorado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

OLIVEIRA, Vandemberg Salvador de. **Quixadá e os açudes no Nordeste: técnicas, políticas e escolhas**. Jornal da USP, São Paulo, 04 dez. 2024. ONGARATTO, JULIA MATTIA; BORTOLIN, TAISON ANDERSON. Comparação entre métodos de

estimativa de evapotranspiração de referência no município de São José dos Ausentes (RS), Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, p. 979 a 987, 2021.

OTIS, C. Transpiration from aquatic plants. **Botanical Gazette**, v. 58, n. 6, p. 473 a 498, 1914.

PAIVA, G.C.P., MATOS, A.M.D.M.V., LOURENÇO, A.R., BOVE, C.P. *Typhaceae in Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020.

PATIL, Indrajeet. *Visualizations with statistical details: The 'ggstatsplot' approach*. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 61, p. 3167, 2021.

PEIXOTO, F. DA S.; SOARES, J. A.; RIBEIRO, V. S. Conflicts over water in Brazil. **Sociedade & Natureza**, v. 34, p. e59410, 2022.

PENMAN H.L. Evaporação natural de águas abertas, solo nu e grama. **Anais da Royal Society of London**, London, v.193, p. 120 a 145, 1948.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N.; PEREIRA, A. S.; BARBIERI, V. A model for class-A pan coefficient. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 76, p. 75 a 82, 1995.

PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N.A.; SHOCK, C. C. Estimation of reference evapotranspiration by modified Bowen method. In: **Annual International Irrigation Show** - The Irrigation Association, 25., 2004. Tampa Bay, Florida. Proceedings... Omnipress, p.325 a 339, 2004.

PRIESTLEY, CHARLES HAROLD, TAYLOR, RICHARD JOHN, On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, p. 81 a 92, 1972.

RAJAN, A. K.; BETTERIDGE, B.; BLACKMAN, G. E. Changes in the growth of *Salvinia natans* induced by cycles of light and darkness of widely different duration. **Annals of Botany**, v. 35, p. 597 a 604, 1971.

REZENDE, JOELITO DE OLIVEIRA. Recôncavo Baiano: Berço da Universidade Federal Segunda da Bahia: Passado, Presente e Futuro. 1 ed. Salvador: P & A, 2004, p. 194.

ROCHA, M. J. D.; LIMA NETO, I. E. Modeling flow-related phosphorus inputs to tropical semiarid reservoirs. **Journal of Environmental Management**, [s.l], v. 295, p. 113123, out. 2021.

RODRIGUES, G. P.; RODRIGUES, Í. S.; RAABE, A.; HOLSTEIN, P.; DE ARAÚJO, J. C. (2023). Direct measurement of open-water evaporation: a newly developed sensor applied to a Brazilian tropical reservoir. **Hydrological Sciences Journal**, 68(3), 379 a 394.

KIM, C., CHOI, H-K. Molecular systematics and character evolution of *Typha* (Typhaceae) inferred from nuclear and plastid DNA sequence data. **Taxon**, v.60, nº5, p. 1417 a 1428, 2011.

KISSMANN, K.G. Plantas infestantes e nocivas. São Paulo, SP: **Basf Brasileira S.A.**, 608 p., 1991.

KISSMANN, K. G. Plantas nocivas e infestantes. 2. ed. São Paulo, SP: **Basf Brasileira S.A.**, 608 p., 1997.

KUEHN, M. M., WHITE, B. N. Morphological analysis of genetically identified cattails *Typha latifolia*, *Typha angustifolia* and *Typha* × *glauca*. **Canadian Journal of Botany**, 77, p. 906 a 912, 1999.

WANG, W.; WANG., X.; HUO, Z.; RONG, Y.; HUANG, Q.; HUANG, G. Variation and attribution of water use efficiency in sunflower and maize fields in an irrigated semi-arid area. **Hydrological processes**, v. 35, n.3, p. e14080, 2021.

WOLFF, G.; ASSIS, L. R.; PEREIRA, G. C.; CARVALHO, J. G.; CASTRO, E. M. Effects of zinc toxicity on leaves of *Salvinia auriculata* cultivated in nutrient solution. **Planta Daninha**, v. 26, p. 315 a 325, 2009.

WERADUWAGE, S. M., CHEN, J., ANOZIE, F. C., MORALES, A., WEISE, S. E., & SHARKEY, T. D., The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana*. **Frontiers in plant science**, vol. 6, p.167,2015.

WURBS, R. A.; AYALA, R. A. Reservoir evaporation in Texas, USA. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 1 a 9, 2014.

SALBAŞ, B.; ERDEM, T. Evaluation of plant-based measurements during the flowering period for purposes of the management of irrigation of sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Journal of Elementology**, v. 28, n. 2, p.449- 464, 2023.

SÁNCHEZ-CARRILLO, SALVADOR; ANGELER, DAVID G.; SÁNCHEZ-ANDRÉS, RAQUEL; ALVAREZ-COBELAS, MIGUEL; GARATUZA-PAYÁN, JAIME. Evapotranspiração em áreas úmidas semiáridas: relações entre inundação e a relação macrófita-cobertura: águas abertas. **Advances in Water Resources**, [S.l.], v. 27, n. 6, p. 643 a 655, 2004.

SANTOS, E. DE O.; MEDEIROS, P. R. P. A Ação Antrópica e o Processo de Eutrofização no Rio Paraíba do Meio. **Sociedade & Natureza**, v. 35, p. e66441, 2023.

SCHNEIDER, I. A. H. **Biossorção de metais pesados: com a biomassa de macrófitas aquáticas**. 1995. 157 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista brasileira de Agrometeorologia**, 1º ed., Santa maria, 1996.

SILVA, V.P.R.; BELO FILHO, A.F.; SILVA, B.B.; CAMPOS, J.H.B.C. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 547 a 553, 2005.

Sistema CHESF – Sobradinho. Disponível em: <https://www.chesf.com.br/SistemaChesf/....> Acesso em: 13 jun. 2025.

- SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Jerusalem, v.118, n.6, p.977 a 980,1992.
- SMITH, S. G. The cattails (Typha): Diferenças ecológicas interespecíficas e problemas de identificação. **Lake and Reservoir Management**, v.2, n. 357 a 362, 1986.
- SOTA, E. R., & CASSA DE PAZOS, L. A. On the stomata of *Salvinia herzogii* (Salviniaceae, Pteridophyta). **Plant Systematics and Evolution**, 172, 119 a 125, 1990.
- SOUZA ALBUQUERQUE, D.; NOBRE DE SOUZA, A. C.; GOMES DE SOUZA, S. D.; MARTINS DE SOUSA, M. L. A açudagem e suas implicações na convivência com o semiárido brasileiro: uma análise do Açude Público Encanto, RN, Brasil. **Revista Homem, Espaço e Tempo**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 7 a 25, 2022.
- THIMANN, KENNETH V.; SATLER, SERGIO O. Relation between leaf senescence and stomatal closure: senescence in light. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 76, n. 5, p. 2295 a 2298, maio 1979.
- TILLBERG, E., DONS, C., HAUGSTAD, M. & NILSEN, S. Effect of abscisic acid on CO₂ exchange in *Lemna gibba*. **Physiologia Plantarum**, v.52, nº4, p. 401 a 406, 1981.
- TRAVASSOS, I. S., SOUZA, B. I., SILVA, A. B. Secas, desertificação e políticas públicas no semiárido nordestino brasileiro. **Revista Okara: Geografia em Debate**, v. 7, n. 1, p. 147 a 164, João Pessoa, 2013.
- TRENBERTH, KE, JT FASULLO E J. MACKARO, Atmospheric Moisture Transports from Ocean to Land and Global Energy Flows in Reanalyses. **Journal of Climate**, Boston, v. 24, n. 18, p.4907 a 4924, 2011.
- MACHADO, Ugo Leonardo Rodrigues. **Efeitos de macrófitas flutuantes nos processos evaporativos em mesocosmos**. 2023. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- VESCOVE, H.V.; TURCO, J.E.P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara- SP. **Associação Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 713 a 721, 2005.
- VISWANADHAM, Y.; SILVA FILHO, V. P.; ANDRE, R. G. B. The Priestley-Taylor parameter α for the Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, v. 38, n. 3-4, p. 211 a 225, 1991.
- ZHANG, S., FOERSTER, S., MEDEIROS, P., DE ARAÚJO, J. C., & WASKE, B. Effective water surface mapping in macrophyte-covered reservoirs in NE Brazil based on TerraSAR-X time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 69, 41 a 55, 2018.