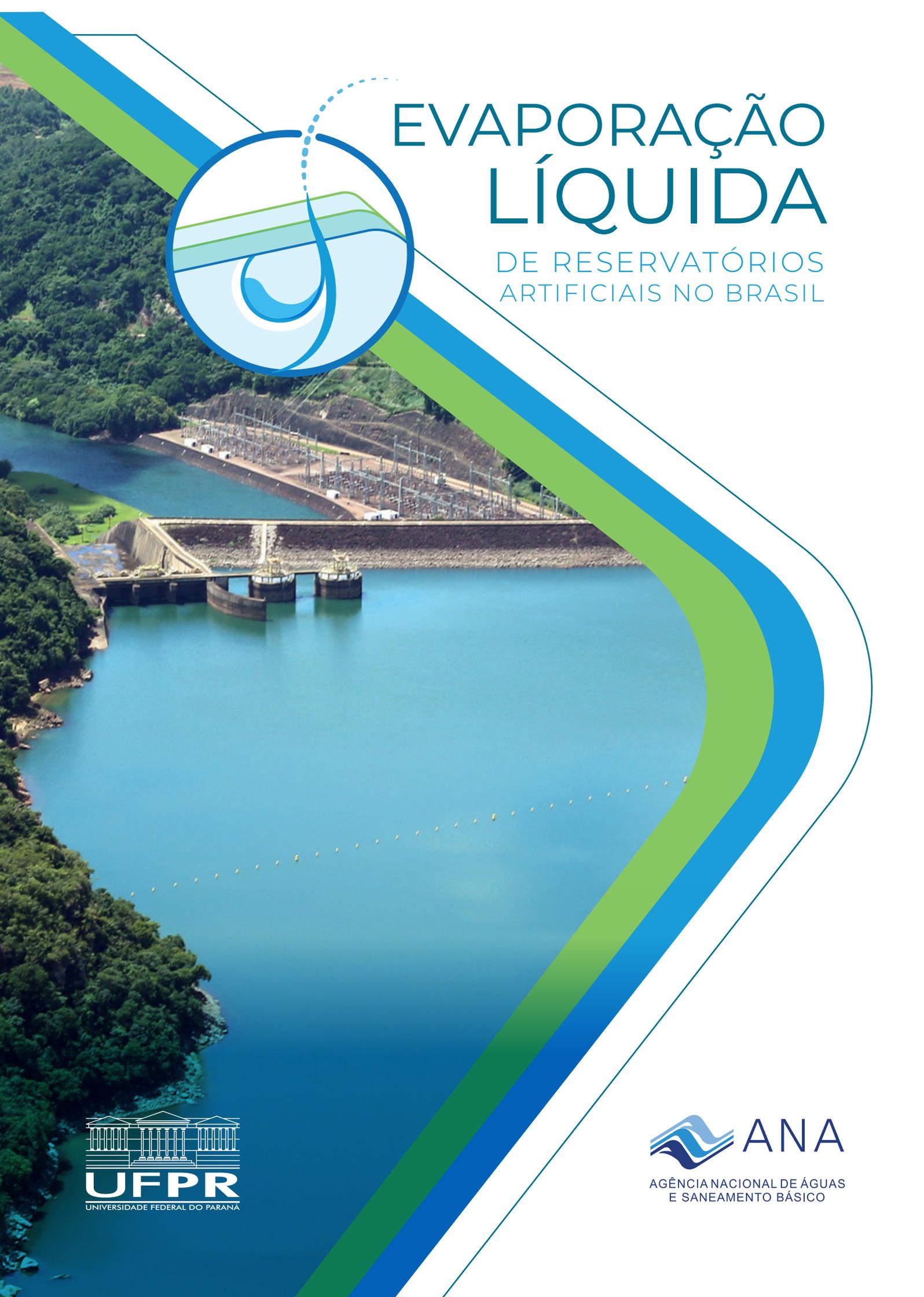


EVAPORAÇÃO LÍQUIDA

DE RESERVATÓRIOS
ARTIFICIAIS NO BRASIL



República Federativa do Brasil

Jair Bolsonaro
Presidente da República

Ministério do Desenvolvimento Regional

Rogério Simonetti Marinho
Ministro

Ministério da Educação

Milton Ribeiro
Ministro

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Diretoria Colegiada

Christianne Dias Ferreira (*Diretora-Presidente*)
Marcelo Cruz
Oscar Cordeiro de Moraes Netto
Vitor Saback
Joaquim Guedes Corrêa Gondim Filho (*interino*)
Ricardo Medeiros de Andrade (*até 6/7/21*)

Universidade Federal do Paraná

Reitoria

Ricardo Marcelo Fonseca (*Reitor*)
Graciela Bolzón de Muniz (*Vice-Reitora*)

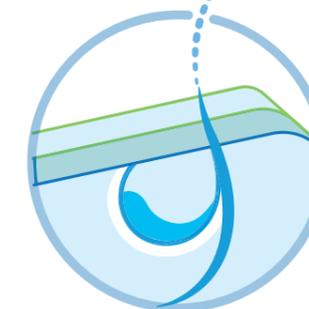
Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL

Universidade Federal do Paraná

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

EVAPORAÇÃO LÍQUIDA
DE RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS
NO BRASIL



BRASÍLIA - DF
ANA
2021

© 2021, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA.

Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L, M, N, O e T.

CEP: 70610-200, Brasília – DF.

PABX: (61) 2109-5400 | (61) 2109-5252

Endereço eletrônico: www.ana.gov.br

Comitê de Editoração

Diretor

Vitor Eduardo de Almeida Saback

Superintendentes

Humberto Cardoso Gonçalves

Joaquim Guedes Corrêa Gondim Filho

Flávio Hadler Tröger

Secretário-Executivo

Rogério de Abreu Menescal

As ilustrações, tabelas e gráficos sem indicação de fonte foram elaborados pela ANA.

Informações, críticas, sugestões, correções de dados: cedoc@ana.gov.br

Disponível também em: <http://www.ana.gov.br>

Todos os direitos reservados

É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Equipe Editorial

Supervisão editorial

Thiago Henriques Fontenelle

Irani dos Santos

Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares

Revisão dos originais

Cesar Augusto Crovador Siefert

Carlos Alberto Perdigão Pessoa

Flávio Hadler Tröger

Gilson Bauer Schultz

Fotografias

Banco de Imagens ANA

Infografia e Capa

Vanessa da Silva Cardoso

Adílio Lemos da Silva

Projeto gráfico e Produção

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Universidade Federal do Paraná

Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR)

Coordenação Geral

Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares

Flávio Hadler Tröger

Coordenação Técnica

Thiago Henriques Fontenelle

Marco Vinícius Castro Gonçalves

Daniel Assumpção Costa Ferreira

Colaboradores

Adalberto Meller

Carlos Alberto Perdigão Pessoa

Gonzalo Álvaro Vázquez Fernandez

Marcela Ayub Brasil

Marcus André Fuckner

Mariane Moreira Ravanello

Paulo Marcos Coutinho dos Santos

Saulo Aires de Souza

Departamento de Geografia

Coordenação

Irani dos Santos

Equipe Técnica

Cesar Augusto Crovador Siefert

Cynthia Roberti Lima

Fernando Helmuth Syring Marangon

Gilson Bauer Schultz

Nathan Streisky da Silva

Nelson Luís da Costa Dias

Equipe de Apoio

Luan Marcus dos Reis Silva

Nicolas Dombrowski Netto

Nicolas dos Santos Rosa

Catálogo na fonte - CEDOC/Biblioteca

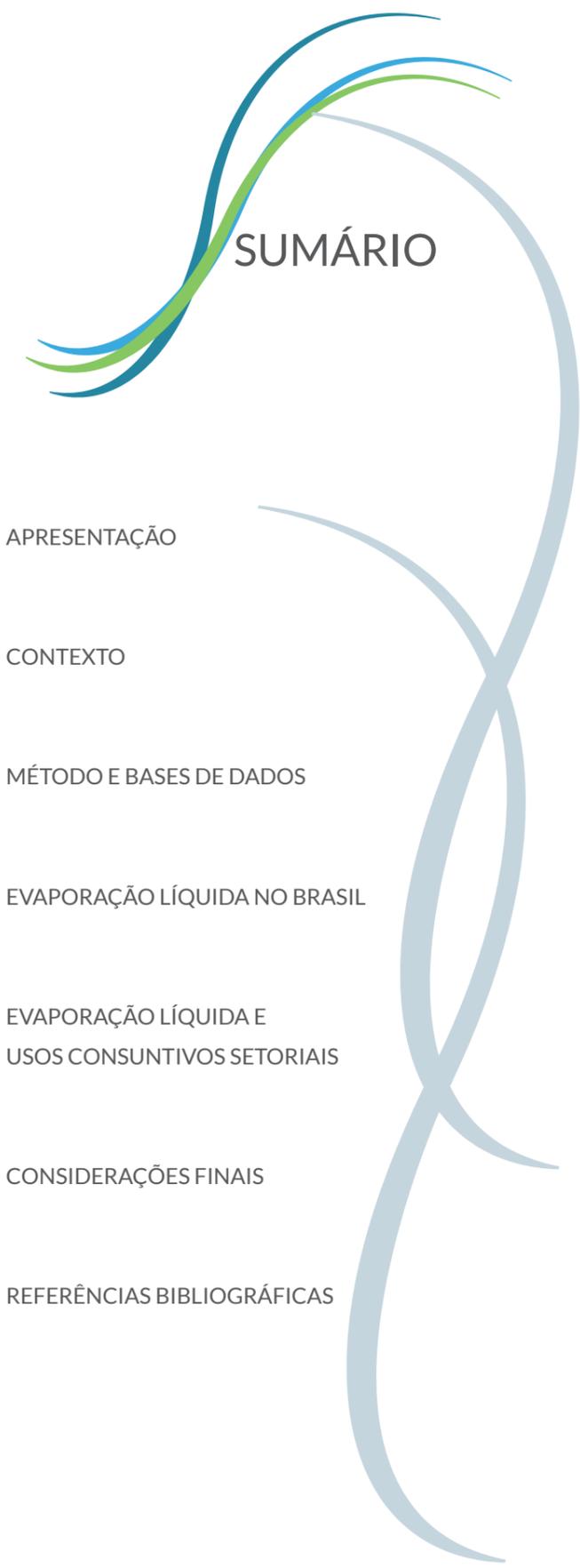
A265e	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Evaporação líquida de reservatórios artificiais no Brasil / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. -- Brasília: ANA, 2021. 92 p.: il. ISBN: 978-65-88101-20-9 1. Reservatórios. 2. Evaporação. I. Título. CDU 627.81
--------------	---

Elaborada por Fernanda Medeiros - CRB-1/1864



SUMÁRIO

Reservatório no bacia do rio Paranapanema
Raylton Alves / Banco de imagens ANA



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	7
1 CONTEXTO	9
2 MÉTODO E BASES DE DADOS	17
3 EVAPORAÇÃO LÍQUIDA NO BRASIL	53
4 EVAPORAÇÃO LÍQUIDA E USOS CONSUNTIVOS SETORIAIS	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85



APRESENTAÇÃO

Os **reservatórios artificiais** são essenciais para o incremento da **oferta hídrica** de uma bacia hidrográfica, sendo de fato parte da solução para situações de escassez e melhoria do balanço hídrico (oferta vs. usos). Por outro lado, a instalação de um reservatório também incrementa o **uso da água na bacia** tanto por atrair usuários para o lago e para os trechos eventualmente beneficiados pela regularização, quanto pelo efeito da evaporação líquida.

A **evaporação líquida** é dada pela diferença entre a evaporação real do reservatório (evaporação bruta do lago) e a evapotranspiração real esperada para a mesma área caso não existisse o reservatório. Contabiliza, portanto, o uso de água adicional causado pelo reservatório, em função das condições ambientais locais e das suas características de construção e operação.

A construção de reservatórios pressupõe que os benefícios à regularidade e garantia da oferta de água superam impactos negativos sobre a vazão natural e os usos. Assim, a evaporação potencial do lago é considerada desde a fase de concepção e projeto. Após a construção, a evaporação permanece como importante variável para a operação. A evaporação líquida representa uma extração de água - uma perda inerente que gera indisponibilidade para outros usos, inclusive para o uso primário motivador da existência do reservatório. Por isso, a estimativa de evaporação líquida já faz parte das ações de planejamento e operação dos setores usuários, assim como da análise de viabilidade individual dos projetos. Ou seja, a água evaporada é descontada para a geração de energia na modelagem do setor elétrico e, ao mesmo tempo, é somada para a reconstituição das séries de vazões naturais.

A incorporação mais explícita dessa componente na **gestão de recursos hídricos** é relevante na medida em que a água evaporada não estará disponível para outros usos e por permitir a análise na escala de bacias e sub-bacias, e não apenas de empreendimentos individualmente, ampliando a capacidade de tomada de decisão no planejamento e na gestão. O conhecimento da evaporação líquida colabora, em última instância, para a **segurança hídrica** dos usuários de água e da população.

Dessa forma, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - **ANA** e a Universidade Federal do Paraná - **UFPR** trabalharam nos últimos dois anos no desenvolvimento de métodos e bases de dados capazes de retratar a evaporação líquida no território brasileiro. Os resultados aprimoram substancialmente os trabalhos pioneiros concluídos pelo Operador Nacional do Sistema - ONS em 2003 e 2004; e atualizam parte do **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**, publicado pela ANA em 2019. Portanto, a ANA e a UFPR apresentam o estudo **Evaporação Líquida de Reservatórios Artificiais no Brasil** como uma importante contribuição à pesquisa, à segurança hídrica e ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos e dos setores usuários no Brasil.

APRESENTAÇÃO



A evapotranspiração real corresponde à água transportada da superfície terrestre para a atmosfera por evaporação do solo e por transpiração das plantas, em condições ambientais reais. Na água, ocorre apenas a evaporação. Por transferir grandes volumes de água e energia para a atmosfera, a evapotranspiração, seja de superfícies líquidas ou de áreas cobertas por vegetação, é um dos principais processos do ciclo hidrológico (Brutsaert, 1982). A evaporação é considerada a maior perda de água dentro do balanço hídrico de massas d'água continentais como lagos e reservatórios (Gianniu & Antonopoulos, 2007), com impactos na dinâmica hidroclimática local, regional e global.

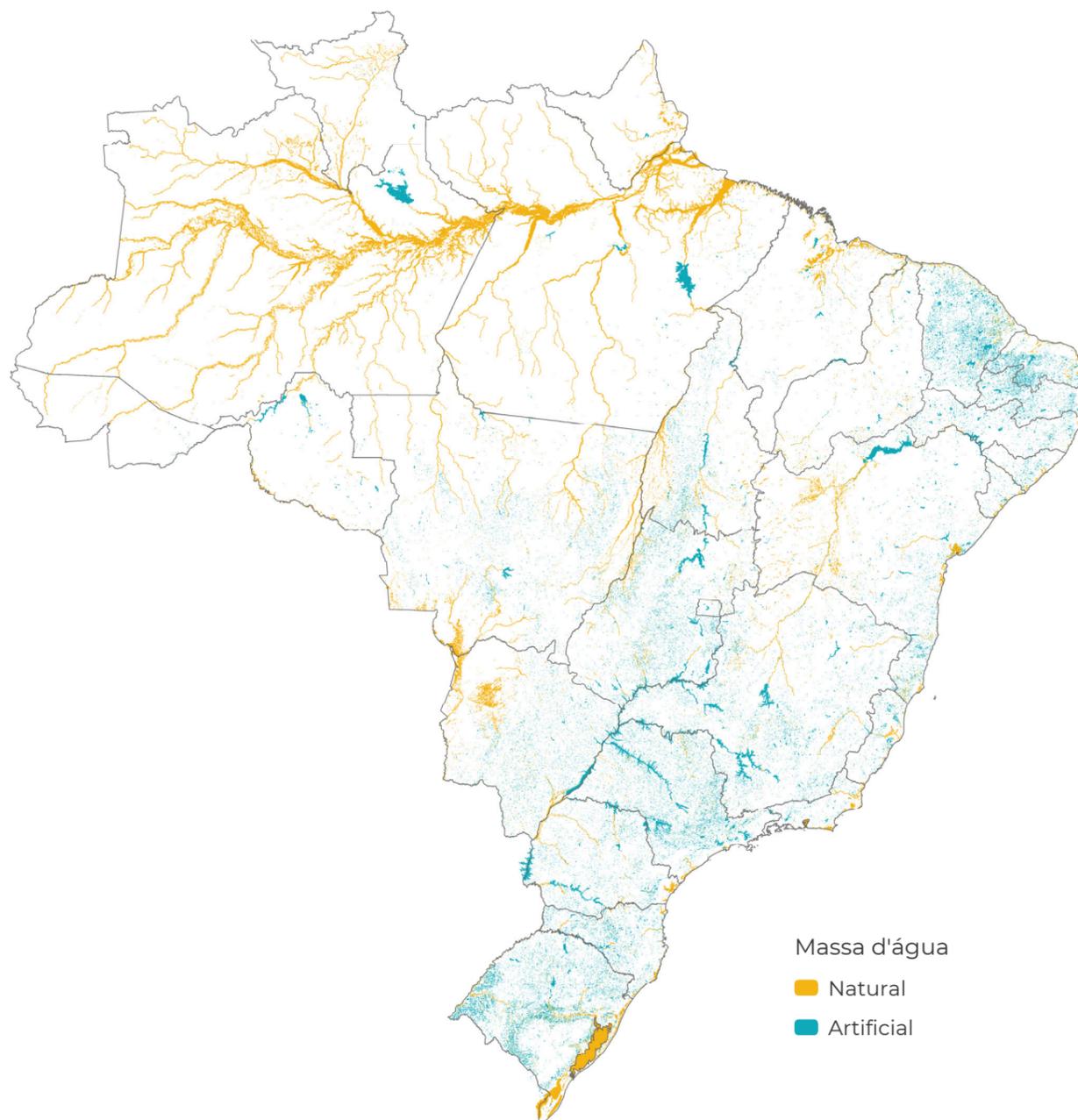
Os reservatórios artificiais e barragens são **intervenções hídricas** que têm a finalidade de acumulação de água e atendem diversos usos: consuntivos (que extraem e consomem água), como a irrigação, o abastecimento público e a dessedentação animal; não consuntivos, como a navegação, a pesca, o turismo e o lazer; e para acumulação de rejeitos, como nos usos da mineração e da indústria. Alguns grandes **reservatórios de acumulação** são criados com o objetivo de armazenar água e regularizar intra e interanualmente a disponibilidade hídrica para fins diversos, inclusive muitas vezes para outros reservatórios de jusante, que se beneficiam e são construídos para operar a **fio d'água**. Muitos outros reservatórios, em geral de pequeno porte, são construídos para criar condições mais propícias à captação de água, geração de energia ou armazenamento de rejeitos, possuindo nenhuma ou limitada capacidade de regularização (diária, semanal).

Assim, construir um reservatório pressupõe benefícios à oferta de água a partir de uma ampliação da segurança hídrica aos usuários diretos e beneficiários difusos indiretos, mas essas intervenções hídricas causam relevante extração de água do ambiente pela evaporação. Esse efeito deve ser considerado no **balanço hídrico** entre oferta e demandas adequadamente sob o risco de prejudicar a própria segurança hídrica que os reservatórios pretendem contribuir.

O Brasil possui cerca de **241 mil massas d'água naturais e artificiais** inventariadas pela ANA, que ocupam 174.000 km², equivalente a pouco menos que a área do estado do Paraná. As massas naturais englobam feições como lagos, lagoas, áreas permanentemente alagadas e trechos de grandes rios, que por seu porte e pela escala dos mapeamentos disponíveis, são representados como polígonos. Com isso, as massas naturais ocupam área maior que as artificiais (73,8%), embora em menor número (27,6%), sendo mais expressivas na Região Amazônica, no Pantanal e nas proximidades da linha de costa (estuários e lagoas costeiras). As massas artificiais ocupam 46 mil km² - a área está concentrada em maiores reservatórios de abastecimento urbano do Se-

1 CONTEXTO

Massas d'água inventariadas - naturais e artificiais



Massa d'água
■ Natural
■ Artificial

Quantitativo de Massas d'água (unidades)



Área Ocupada por Massas d'água (km²)



Fonte: ANA (2020a)

miário e reservatórios de usos múltiplos operados pelo setor elétrico; há também um relevante número de pequenos reservatórios para consumo humano e, principalmente, atividades de mineração e agropecuárias (irrigação, aquicultura e abastecimento animal), que somados representam parcela expressiva da superfície alagada em muitas bacias hidrográficas do País.

Esses dados constam na **base de dados nacional de referência de massas d'água** (ANA, 2020a), que busca cadastrar as feições mapeadas e incluir atributos diversos - como a finalidade de uso, a capacidade de armazenamento, a data de construção, o domínio (estadual ou da União) e a própria origem (natural ou artificial). Essa base é atualizada continuamente e subsidia ações de planejamento, gestão e regulação dos recursos hídricos em escala nacional, integrando a base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos.

A evolução na identificação das massas d'água no Brasil deve-se à digitalização de bases cartográficas sistemáticas e, principalmente, ao desenvolvimento de geotecnologias aliadas à maior disponibilidade de imagens de satélites, o que tem permitido avanços sucessivos no inventário de pequenas massas d'água - muitas vezes antigas, mas não captadas nas escalas de análise anteriormente disponíveis. Com isso, o número de massas d'água identificadas vem crescendo expressivamente nos últimos anos, mas não a área total coberta por esses espelhos, já que os grandes reservatórios são conhecidos e compõem as bases de dados desde suas primeiras versões. O início do enchimento de um novo grande reservatório tende a impactar mais o inventário, em termos de área, do que a inclusão de centenas ou milhares de pequenos reservatórios - esses, por outro lado, possuem uma importância local e podem impactar expressivamente a estimativa da superfície alagada em bacias hidrográficas específicas.

A evaporação de uma superfície líquida é afetada por diversos fatores, mas depende fundamentalmente da **energia disponível** proveniente da irradiância (ou radiação) solar (a mudança do estado líquido para o gasoso consome $L = 2,464 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ a 15°C , onde L é o calor latente de evaporação da água). Em super-

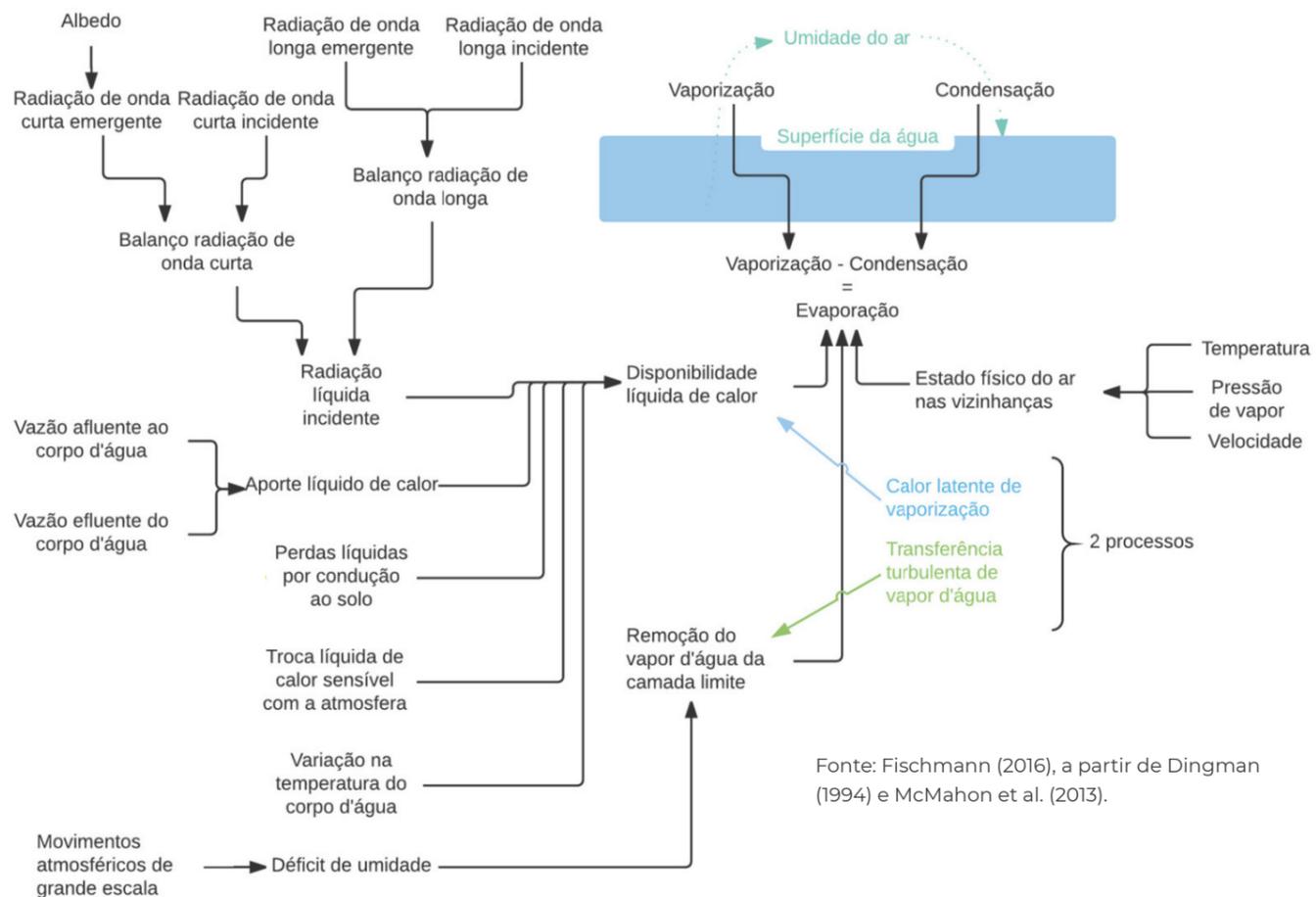
fícies livres de água, fatores climáticos como a temperatura do ar, o vento e a pressão de vapor d'água no ar interferem com mais intensidade no fenômeno de evaporação. Assim, geralmente, as características climáticas locais afetam diretamente o comportamento da evaporação líquida, tendo em conta que a evapotranspiração real é sempre limitada em algum grau pela umidade do solo, enquanto a evaporação da superfície líquida não apresenta essa restrição, dependendo apenas das condições meteorológicas e da energia disponível.

Os volumes de água que fazem parte da fase evaporativa do ciclo hidrológico se tornam indisponíveis e não podem ser recuperados para uso no curto prazo. Assim, a **evaporação líquida constitui-se em uso consuntivo múltiplo da água** bastante significativo e é uma informação necessária, por exemplo, para **reconstituição das séries de vazões naturais** nas bacias que abrigam esses reservatórios, além de ser importante para a própria gestão da oferta hídrica em diversas escalas. Conceitualmente, são esperadas maiores evaporações líquidas em reservatórios onde a precipitação seja limitante na componente da evapotranspiração real.

Assim, do ponto de vista da gestão dos recursos hídricos, os reservatórios artificiais consomem água, pois o barramento promove a sua acumulação, retirando-a de forma parcial e/ou temporariamente do sistema natural a jusante para permitir o desenvolvimento de atividades diversas. O consumo é uma perda inerente que se aplica a todos os **usos setoriais da água** caracterizados como consuntivos (indústria, abastecimento público, irrigação etc.).

Com a criação de espelhos d'água, tender a ocorrer um incremento positivo nos volumes evaporados na bacia hidrográfica em relação ao que existiria naturalmente. A água armazenada no reservatório pode ser parcialmente liberada para o canal fluvial a jusante, caracterizando um retorno e que é realizado de acordo com os critérios de operação, atendendo a interesses de disponibilidade de recursos hídricos e manutenção de processos naturais. Dessa forma, os reservatórios artificiais realizam as fases de retirada, consumo e retorno que caracterizam todos os usos consuntivos da água.

Principais fatores envolvidos no fenômeno da evaporação



Fonte: Fischmann (2016), a partir de Dingman (1994) e McMahon et al. (2013).

Em síntese, a **evaporação líquida** é a diferença entre a evaporação de água de um reservatório artificial (evaporação bruta ou do lago) e a evapotranspiração real na área do espelho de água caso ele não tivesse sido implantado. A evapotranspiração em terra tende a ser inferior à evaporação de uma superfície livre de água no mesmo local e tempo. Assim, por definição, a evaporação líquida **só pode ser determinada para reservatórios artificiais**, os quais alteram as condições de evapotranspiração dos seus locais de formação; o conceito não é, portanto, aplicável para as massas d'água naturais.

Cabe destacar que o resultado do balanço da evaporação líquida é espacialmente heterogêneo e dependente das condições climáticas locais, podendo resultar até mesmo em valores negativos (evaporação do lago menor que a evapotranspiração real esperada), embora esse saldo só seja observado em alguns locais específicos. Quando o resultado é po-

sitivo, é conceitualmente evidente que ocorre consumo de água devido à existência do espelho d'água artificial.

Mesmo os reservatórios construídos e operados por um setor específico da economia geralmente beneficiam múltiplos usuários. Os usuários de um reservatório podem ser tanto aqueles que se beneficiam diretamente do volume armazenado, captando água ou utilizando-a para usos não consuntivos (pesca, lazer, turismo), como aqueles que dependem da regularização do regime hídrico do curso d'água a jusante do barramento para o desenvolvimento de suas atividades. O controle de cheias, a diluição de efluentes e a geração de energia no sistema interligado são outros usos importantes com benefícios difusos dos reservatórios. Por esses motivos, a evaporação líquida de reservatórios artificiais pode ser definida como **uso consuntivo múltiplo da água**.



Como os reservatórios artificiais configuram uma parte importante da infraestrutura hídrica que compõe a base de sustentação de diversas atividades econômicas, é natural que as perdas por evaporação líquida a partir desses espelhos d'água artificiais representem, em termos quantitativos, relevante consumo de água das bacias hidrográficas. Por outro lado, não resta dúvida dos **inúmeros benefícios socioeconômicos** oriundos da implantação de reservatórios artificiais, sendo que o consumo de água resultante desta intervenção deve ser associado aos diversos setores beneficiados.

Por óbvio, esse consumo é atribuído ao local do espelho d'água, cuja barragem em geral possui um proprietário ou operador; mas a atribuição do uso evaporação líquida aos setores não foi realizada. O rateio do consumo aos diferentes setores beneficiados por um reservatório ainda é um desafio na literatura técnica e científica, pois os beneficiados podem variar em número e setor, ao longo do tempo e do espaço. Pode ser objeto de estudos futuros, que integrem elementos econômicos e dos setores beneficiados.

O presente estudo buscou estimar a evaporação líquida dos reservatórios artificiais no Brasil pela sua **relevância no balanço hídrico e, conseqüentemente, no incremento da segurança hídrica** – objetivo central da implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos.

Dadas as dimensões continentais do Brasil, e conseqüente heterogeneidade hidroclimática, torna-se

um grande desafio construir uma base de dados e modelos de estimativa espacialmente representativos. Para a estimativa da evaporação líquida dos reservatórios, foram agregadas informações adicionais ao inventário consolidado pela ANA, especialmente quanto à data de implantação e ao histórico de operação dos reservatórios de acumulação (aqueles que guardam grandes volumes de água e, portanto, apresentam oscilação relevante da área ocupada ao longo do tempo).

O método desenvolvido no presente estudo para a evaporação bruta do lago é baseado nas equações de transferência de massa e calor e de balanço de energia. O modelo requer informações sobre a temperatura superficial da água e dados meteorológicos como irradiância solar incidente, temperatura do ar, pressão de vapor d'água no ar e velocidade do vento. Essas variáveis de cálculo, assim como a estimativa da evapotranspiração real, foram avaliadas com produtos de sensoriamento remoto e calibradas com medições de campo disponíveis em todo o território nacional, seja pelas estações meteorológicas ou pelo balanço hídrico de longo prazo calculado nas principais estações fluviométricas.

O método e as bases de dados serão detalhados no próximo Capítulo. O Capítulo 3 detalha os resultados alcançados e o Capítulo 4 apresenta uma discussão integrada da evaporação líquida com os usos consuntivos setoriais. Na seqüência, são apresentadas as Considerações Finais.



Aquicultura no lago da UHE Chavantes - rio Itararé - entre Carlópolis (PR) e Fartura (SP)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA



Reservatórios para irrigação próximos à Itaberá (SP)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA



2 MÉTODO E BASES DE DADOS

Reservatório e ponte da rodovia SP-334 no rio Grande em Rifaina (SP)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA

Introdução

A modelagem dos **componentes da evaporação líquida** – a **evaporação de lagos** e a **evapotranspiração real** – é um desafio considerável. Medidas de campo são escassas em função da complexidade e da necessidade de investimentos e esforços substanciais e de equipes bem treinadas, limitando ainda mais a abrangência espacial e temporal. Alternativas vêm sendo testadas levando em conta a relevância dos volumes de evaporação das superfícies líquidas na gestão de recursos hídricos e nas modelagens meteorológicas e climáticas.

A **evapotranspiração real (E_R)** pode ser medida diretamente por meio de lisímetros, torres de fluxo (*eddy covariance* e cintilômetros), ou indiretamente por meio de tanques de evaporação e estações de razão de Bowen. Com o desenvolvimento computacional e das geotecnologias, desde os anos 1970 diversas abordagens têm sido desenvolvidas para estimar E_R com base em dados de campo e de sensoriamento remoto (Li et al., 2009), visando cobrir grandes áreas em curtos intervalos de tempo. Modelos mais complexos inspiram-se no balanço de energia na superfície, onde a energia disponível da radiação de ondas curtas e longas é equilibrada por fluxos do aquecimento da superfície e mudanças de fase da água, como é o caso de E_R (McShane et al., 2017). Assim, E_R é estimada pela solução total ou parcial do balanço de energia e pela aplicação de abordagens analíticas com base em modelos físicos.

Há atualmente um conjunto de ferramentas e produtos de E_R que foram analisados nesse projeto a fim de se determinar qual iniciativa apresenta dados mais consistentes para o propósito da estimativa da evapotranspiração real no entorno dos lagos (*proxy* para a E_R que ocorreria caso o lago não existisse na área artificialmente alagada).

Para a **evaporação de lago (E_L)**, medições diretas envolvem métodos micro-meteorológicos conhecidos, sendo os mais comuns o método do balanço de energia e o método de medição de covariâncias turbulentas (Brutsaert, 1982; USGS, 1954, 1958). A estimativa de evaporação por balanço hídrico é muito mais difícil, em função da incerteza sobre os diversos termos que o compõem. Estimativas por balanço hídrico de evaporação de longo prazo, entretanto, são factíveis para alguns lagos (Harbeck, 1962; Morton, 1983a; 1983b).

De toda forma, em sua grande maioria, estudos *in situ* de evaporação em lago baseiam-se nos métodos do balanço de energia (Anderson, 1954; USGS, 1958; Sturrock et al., 1992; Sacks et al., 1994; Reis & Dias, 1998; Lenters et al., 2005); ou no método de medição de covariâncias turbulentas (Stannard & Rosenberry, 1991; Assouline & Mahrer, 1993; Armani et al., 2020; Dias & Malheiros, 2003; Dias & Vissotto, 2017).

Apesar do razoável progresso proporcionado por esses estudos de campo específicos, há uma grande escassez de métodos práticos para a estimativa da evaporação em lago que não dependam de medições *in situ* para sua cali-

bração. Como quase sempre em hidrologia, estudos específicos resultam em grande variabilidade dos coeficientes calibrados localmente ou permanecem dependentes de medições micrometeorológicas e limnológicas realizadas permanentemente dentro e sobre o corpo d'água. Tais medições são intrinsecamente caras e difíceis de serem mantidas por longos períodos, sendo impraticáveis no amplo conjunto das massas d'água no país.

Para a estimativa de evaporação de lagos, também uma ampla variedade de modelos empíricos ou formulados a partir de equações com base física foram propostos e aplicados em larga escala no mundo. Conceitualmente, os modelos existentes podem ser classificados em diversas categorias, incluindo:

- a) modelos baseados nos princípios do **balanço de energia** onde a evaporação é estimada a partir da energia residual no sistema disponível para o processo (por exemplo, o modelo de Penman (1948) e seus derivados como as equações de Kohler et al., (1958) e Priestley & Taylor (1972);
- b) modelos baseados na **relação complementar** entre a evaporação potencial aparente e a evapotranspiração real em função da interação entre a superfície evaporante e o ar circulante (Bouchet, 1963; Brutsaert, 2015; Brutsaert & Stricker, 1979; Morton, 1983a); e
- c) equações baseadas no método de **transferência de massa** (Cancelli et al., 2012; Dias & Vissoto, 2017; Harbeck, 1962; Marciano & Harbeck, 1954; Singh & Xu, 1997), além de equações puramente empíricas.

Para as estimativas atuais, foi desenvolvido o Sistema de Evaporação em Lago Embasada na Temperatura da Superfície (SELET), cujas principais bases físicas são as equações de transferência de massa e calor e de balanço de energia. O modelo será detalhado ao longo do presente capítulo.

Histórico das estimativas no Brasil

Os estudos sobre evaporação líquida em escala nacional conduzidos pelo ONS (2005; 2006) e pela ANA (2019) basearam-se no modelo de relação complementar (b). A relação complementar é definida como (Morton, 1983a; 1983b):

$$E_R = 2ET_{Wet} - ET_{Pot} \quad (2.1)$$

onde:

ET_{Wet} é a evapotranspiração que ocorreria em condições de ampla disponibilidade de água no solo e para as plantas;

ET_{Pot} é a evapotranspiração potencial aparente, que ocorreria se houvesse ampla disponibilidade de água no solo e para as plantas e as condições meteorológicas fossem as efetivamente observadas.

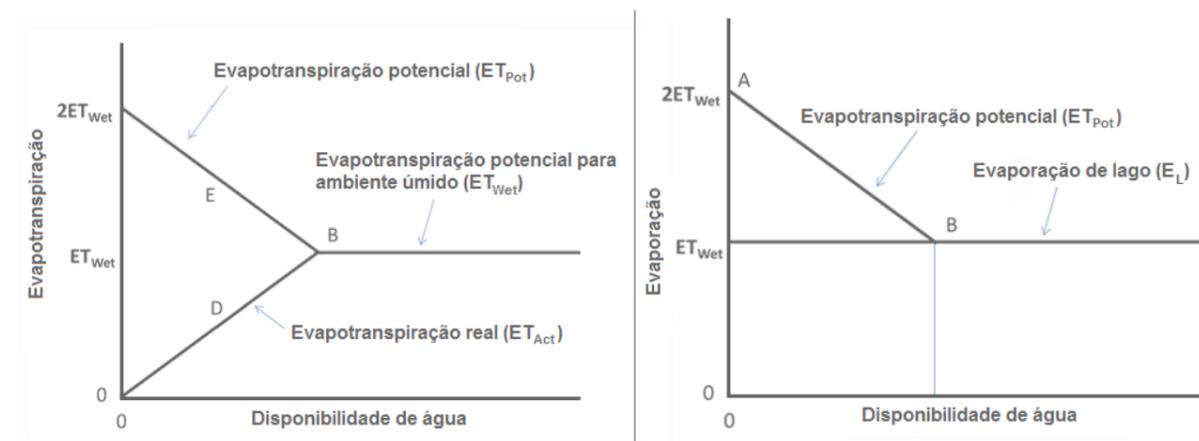
Esse método para estimativa da altura da evaporação líquida é operacionalizado pelo modelo CRAE (Complementary Relationship Areal Evapotranspiration) para a componente da **evapotranspiração real**; e pelo modelo CRLE (Complementary Relationship Lake Evaporation) para a componente da **evaporação do lago** (Morton, 1983a; 1983b).

Nas últimas décadas, o setor elétrico realizou avaliações sobre a evaporação líquida em reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN). Os trabalhos mais recentes coordenados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) atualizaram estimativas elaboradas nos anos 1990 (GCOI, 1992) e foram concluídos em 2003 e 2004 nas bacias incluídas no projeto Estudos de consistência e reconstituição de séries de vazões naturais nas principais bacias hidrográficas com aproveitamentos integrantes do Sistema Interligado Nacional - SIN.

A vazão de evaporação líquida nestes reservatórios do SIN é historicamente calculada a partir de 12 valores médios mensais de altura de evaporação líquida, gerados pelo programa SisEvapo (ONS, 2003b; 2004), combinados com a área média da superfície do lago no dia ou mês considerado. Ou seja, o método considera as características de operação do reservatório e conseqüentemente a sua área superficial, a qual varia bastante em importantes reservatórios operados pelo ONS. Por outro lado, utiliza valores médios mensais fixos de altura de evaporação líquida oriundos das normais climatológicas 1931-1960 e 1961-1990 - não incorporando a variabilidade climática.

No caso de parte dos aproveitamentos do Nordeste no Semiárido (Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso-Moxotó e Xingó), o ONS não adotou o método de Morton operacionalizado pelo SisEvapo devido à

Representação gráfica dos modelos CRAE e CRLE



Fonte: adaptado de McMahon et al. (2013).

inconsistência nos resultados, com valores de evapotranspiração real sistemática e expressivamente superiores à precipitação média anual observada na região, o que não poderia ocorrer (ONS, 2003a).

Com isso, os 12 valores médios mensais de evaporação líquida foram obtidos por meio de **balanço hídrico e evaporação em tanque**: a) a evapotranspiração real foi estimada pelo método do balanço hídrico na bacia do rio Tauá (no Ceará) e extrapolada para os quatro aproveitamentos; e b) a evaporação do lago foi estimada com o evaporímetro da estação de Petrolina (PE) com o coeficiente (C_A) de 0,8 (para Sobradinho); ou com o evaporímetro da estação Paulo Afonso (BA) e o coeficiente de 0,75 (para os demais aproveitamentos) (ONS, 2003a; 2004).

A evaporação do lago estimada por dados de evaporação em tanque classe A (E_A) gera uma grande incerteza nos valores assim obtidos. De fato, os coeficientes de tanque (C_A) reportados em localidades em que existem medições simultâneas e confiáveis de E_L e de E_A possuem grande variabilidade, o que reduz a confiabilidade de estimar E_L por meio de

$$E_L = C_A E_A \quad (2.2)$$

A determinação do coeficiente do tanque é problemática, sendo por vezes motivada por hipóteses ou estatísticas que não representam a realidade do reservatório em relação ao local do(s) tanque(s). Em algumas regiões, a determinação de um coeficiente único no lugar de um coeficiente sazonal também pode distorcer expressivamente as estimativas. Adicionalmente, embora o tanque classe A possa repre-

sentar adequadamente a variação sazonal da evaporação, também pode haver importantes distorções em reservatórios de maior porte, em função do pequeno volume do tanque não representar adequadamente a variação sazonal de calor armazenado no reservatório.

Com o objetivo de realizar um diagnóstico da evaporação líquida em 148 reservatórios integrados ao SIN - que ocupam uma área de 31.000 km² - e em cerca de 7.200 outros reservatórios de usos múltiplos - em geral de pequeno porte e que ocupam uma área de 9.500 km² - a ANA apresentou resultados atualizados no **Manual de Usos Consuntivos de Água no Brasil** (ANA, 2019a) - o estudo aborda séries de uso da água desde 1931 e projeções até 2030, abordando também os demais principais usos consuntivos (irrigação, abastecimento urbano, indústria e outros). Os reservatórios do SIN encontram-se em posição privilegiada em termos de disponibilidade de dados em comparação com o grande número de reservatórios que não dispõem de informações básicas, como por exemplo, a data de implantação. Para os reservatórios que não pertencem ao SIN, a disponibilidade de dados é variável e muitas vezes limita-se à área mapeada do espelho.

O estudo da ANA (2019a) também se baseou no modelo de relação complementar (2.1) adotado pelo setor elétrico, mas com melhorias em relação ao SisEvapo. Esse método para estimativa de forma padronizada das séries de evaporação líquida utiliza dados climáticos das estações meteorológicas (variação mensal) e a área mapeada ou observada mensalmente dos espelhos de água.

Os modelos CRAE e CRLE estão implementados no programa de computador WREVAP (Morton et al., 1985) e suas atualizações mais recentes. O CRAE necessita como **dados de entrada**: a altitude (m) e a latitude da estação meteorológica, a precipitação anual (mm) e séries mensais de temperatura média do ar (°C), umidade relativa (%) e insolação (h). Foram utilizadas 524 estações meteorológicas no país, sendo que o resultado foi interpolado até os locais dos reservatórios artificiais para obtenção das séries dos 7.360 reservatórios mapeados, contemplando os reservatórios do SIN e outros com área superior a 20 hectares, totalizando cerca de 40.000 km² de área inundada (ANA, 2019a).

Conceitualmente, o modelo adotado pelo ONS (exceto para o Semiárido) e o modelo adotado pela ANA baseiam-se no mesmo método: a relação complementar proposta por Bouchet (1963), e que tem sido amplamente adaptada e utilizada desde então (Brutsaert, 2015; Brutsaert & Stricker, 1979; Kahler & Brutsaert, 2006; Morton, 1976, 1978, 1983a). Entretanto, os modelos foram operacionalizados em plataformas (SisEvapo × WREVAP) e com bases de dados diferentes, o que pode ocasionar diferenças expressivas nos resultados. No **Manual de Usos Consuntivos** (ANA, 2019a), foram adotados valores médios mensais observados (um valor para cada mês e ano da série), e não normais climatológicas como nos estudos do ONS (12 valores mensais fixos) - além de contar com um volume de dados superior e mais preciso, em função da ampliação da rede de estações automáticas do INMET, sobretudo a partir de 2002, e dos métodos de consistência dos dados.

Em suma, na formulação dos modelos CRAE e CRLE, as estimativas de evaporação podem ser realizadas com dados meteorológicos rotineiros, reduzindo a necessidade de conhecimentos específicos sobre o lago e seu ambiente, o que, por outro lado, acrescenta **incertezas importantes na magnitude e na sazonalidade** dos resultados gerados e sua aplicação na gestão dos recursos hídricos e de operação dos setores usuários.

Em função da importância em termos de balanço hídrico regional e a importância da evaporação na operação de reservatórios, alguns reservatórios brasileiros foram amplamente estudados a partir da

aplicação de modelos diversos para a estimativa local da evaporação de lagos.

Reis & Dias (1998) realizaram medições de evaporação em lago para o pequeno reservatório de abastecimento de água de Serra Azul/MG, utilizando o método do balanço de energia, e as compararam com os resultados do modelo CRLE. Eles verificaram que as estimativas mensais de evaporação do CRLE sofrem uma significativa defasagem, que pode ser atribuída a erros na estimativa feita pelo modelo das variações de entalpia da água do lago. Kan & Dias (1999) utilizaram o método do balanço de energia-razão de Bowen para estimar a evaporação no reservatório de Foz do Areia/PR e o método do balanço hídrico sazonal para estimar a evapotranspiração, indicando uma possível superestimativa da evaporação líquida pelos modelos CRAE e CRLE em base mensal. Em uma reavaliação das séries de dados para o mesmo reservatório, Dias & Kan (2008) observaram que resultados obtidos pelos métodos de balanço de energia associado ao modelo hidrometeorológico de evapotranspiração HEM são bastante diferentes para o mesmo período de análise, em comparação com o CRLE e CRAE, realçando o grau de incerteza envolvido nas estimativas da evaporação de lago com poucos dados disponíveis.

Pereira et al. (2009) aplicaram os modelos de Linacre (1993) e Kohler et al. (1958), ambos fundamentados na equação original de Kohler et al. (1958), e o CRLE para estimar a evaporação líquida no reservatório de Sobradinho visando avaliar os impactos da construção do reservatório no balanço hídrico. O modelo de Kohler et al. (1958) apresentou o melhor ajuste em termos anuais. Vieira et al., (2016) utilizaram dados de estações meteorológicas para comparar diversos modelos para estimar a evaporação dos reservatórios de Sobradinho e Três Marias, localizados no rio São Francisco. Os autores observaram, por exemplo, que modelos como os de Kohler et al. (1958) e Thornthwaite (1948) produzem valores de evaporação inferiores aos do método de Penman (1948), enquanto os resultados do modelo CRLE não diferem estatisticamente em comparação com o método de Penman em ambos os reservatórios.

Coelho et al. (2018) aplicaram quatro métodos distintos para modelar a evaporação da superfície dos

lagos de Tucuruí/PA e Lajeado/TO, utilizando o método de Penman (1948) como o padrão para comparação - os métodos de Linacre (1993) e Bruin & Keijman (1979) apresentaram os melhores resultados em escala mensal, sobretudo no período seco.

Cabe observar que estudos de comparação entre equações e métodos de evaporação como os citados acima são intrinsecamente limitados, porque neles não se conhece um valor medido diretamente. Conclusões sobre o método “mais consistente” ou “mais robusto” inevitavelmente envolvem julgamentos subjetivos que, em última análise, não têm como ser validados. Na ausência de medições diretas que permitam calibrações para sítios específicos ou pelo menos uma avaliação de métodos com menor erro, deve-se dar preferência a métodos que utilizem dados mais facilmente observados e cujos parâmetros de calibração possuam menor incerteza.

Muito embora diversos modelos tenham sido aplicados a reservatórios individuais no país ou ainda em estudos de maior abrangência conduzidos pelo ONS e pela ANA, não foi possível chegar a um consenso a respeito do método mais indicado para a estimativa da evaporação líquida de lagos artificiais no Brasil. Em geral, estudos de evaporação em superfícies livres são limitados por incorporarem somente grandes reservatórios. No Brasil, cerca de 173 mil reservatórios possuem área evaporante inferior a 1 km², tornando-se imperativo o entendimento e a quantificação da evaporação também sobre reservatórios onde dados são escassos.

Além disso, os modelos anteriormente aplicados, tais como o CRLE, datam da década de 1980, utilizam apenas dados meteorológicos (como visto, utilizando dados mensais ou mesmo somente normais climatológicas), ignorando por exemplo a possibilidade atual de obter a temperatura da superfície da água por sensoriamento remoto, e possuem coeficientes empíricos calibrados com relativamente poucos estudos de caso. O modelo desenvolvido especificamente para este estudo, denominado SELET, incorpora os avanços na quantidade e qualidade de dados ambientais atualmente disponíveis, e força o fechamento do balanço de energia para cada lago individualmente em escala anual. O SELET utiliza dados meteorológicos diários juntamente com dados de temperatura da superfície da água por sensoriamen-

to remoto, e calibra coeficientes de transferência de massa anuais para cada lago utilizando para isso um balanço de energia anual. Desta forma, implementou-se um modelo com forte base física que é capaz de levar em conta efeitos locais e que utiliza de maneira otimizada os dados atualmente disponíveis.

Neste sentido, a definição de um método para a estimativa da evaporação da água em superfícies livres demanda uma extensiva análise de **dados meteorológicos** disponíveis, **características físico-climáticas** das regiões estudadas e **coeficientes de calibração** locais, além da possibilidade de uso de produtos de sensoriamento remoto para incorporar, explicitamente, a **temperatura da água** nas estimativas.

Método aplicado

Dado o histórico de estudos, o projeto buscou avançar na modelagem das estimativas em base física e escala local, valendo-se de geotecnologias e produtos de sensoriamento remoto atualmente disponíveis.

A **evaporação líquida** (E_{Δ}) é definida como sendo a simples diferença entre a **evaporação real** de um reservatório artificial e a **evapotranspiração real** no local do espelho de água caso esse não tivesse sido implantado. O desafio concentra-se no cálculo dessas componentes. Portanto,

$$E_{\Delta} = E_L - E_R \quad (2.3)$$

onde:

E_{Δ} é a evaporação líquida do lago;

E_L é a evaporação da superfície do lago; e

E_R é a evapotranspiração real que ocorreria na mesma área na ausência do lago.

A **evapotranspiração real** (E_R) no presente estudo foi estimada a partir do produto MOD16A do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), baseado na equação de Penman-Monteith (Mu et al., 2011). O confronto do produto com o balanço hídrico de longo curso nas áreas de contribuição hidrográfica de 1.088 estações fluviométricas no Brasil resultou na aplicação de uma superfície de correção de viés. A análise, a seleção e a correção do produto MOD16A serão detalhadas ao longo deste capítulo.

Para a estimativa da componente **evaporação do lago** foi desenvolvido o Sistema de Evaporação em Lago Embasada na Temperatura da Superfície (**SELET**), capaz de lidar com a disponibilidade e a qualidade de dados em um país de dimensões como o Brasil; e de forma individual para reservatórios com tamanhos e em condições geográficas diversas.

O modelo proposto é fundamentado em métodos consagrados na literatura científica e na proposição de novas alternativas para a modelagem utilizando apenas dados meteorológicos medidos em terra (eventualmente, indiretamente, via bancos de dados de reanálise) e dados de temperatura da superfície da água obtidos por sensoriamento remoto.

O **SELET** garante, em cada lago, o **fechamento do balanço de energia**, possuindo aplicabilidade geral já que os únicos **coeficientes** envolvidos **são calibrados para cada lago** de interesse utilizando o balanço de energia de longo curso. O método mostrou-se robusto inclusive em lagos profundos onde o termo problemático de armazenamento de entalpia é relevante para as estimativas. Em lagos rasos, onde esse termo é pouco importante, o **SELET** produz resultados similares a modelos e métodos encontrados na literatura, tais como o método do balanço de energia-razão de Bowen, o método de Penman utilizando a equação de transferência sugerida por McJannet (2012) e o método de transferência de massa calibrado por balanço hídrico.

As principais **bases físicas** para a realização de estimativas de evaporação em lagos do método proposto são as **equações de transferência de massa e calor e de balanço de energia**, aplicadas a um volume de controle que contém a região de interesse.

Para sua operacionalização, o **SELET** necessita de um conjunto de séries de dados de entrada da massa d'água de interesse: a) temperatura da superfície da água (T_0); b) variáveis meteorológicas: velocidade do vento (u), temperatura do ar (T_a), pressão de vapor no ar (e_a) e irradiância solar incidente na superfície (R_s); c) grandezas astronômicas determinadas a partir da latitude e do dia do ano (albedo, número máximo de horas de sol - N , e irradiância solar extra-atmosférica - R_{sea}); e d) a altitude do reservatório em relação ao nível médio do mar.

O fluxo de massa de vapor d'água do lago (E , em $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) está associado ao fluxo de calor latente (LE , em W m^{-2}), via o calor latente de evaporação da água ($L = 2,464 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Para a obtenção da evaporação do lago em milímetros por dia (E_h) calcula-se:

$$E_h = \frac{LE}{L} \times 86400 \quad (2.4)$$

O fluxo de massa de vapor d'água (E), o fluxo de calor sensível médio para a atmosfera em W m^{-2} (H) e o fluxo de calor latente (LE) são calculados pelas **equações de transferência de massa e calor** – amplamente utilizadas para estimativas de evaporação em lagos em função de sua simplicidade e razoável acurácia (Valipour, 2017). Cabe ressaltar que, historicamente, a equação 2.5 é a *lei de Dalton* para evaporação (Brutsaert, 1982), para a qual existe uma enorme variedade de configurações, incluindo: a forma para $f(u)$ (em geral linear), os pontos de medição (em terra corrente acima do lago; sobre o lago; em terra corrente abaixo do lago) e as alturas de medição de u e e_a . Portanto, em uma particular aplicação todos esses elementos precisam ser claramente definidos. As equações de transferência são

$$E = \rho (A + Bu) \frac{0,622}{p} (e_0^* - e_a) \approx (a + bu)(e_0^* - e_a) \quad (2.5)$$

$$H = \rho c_p (A + Bu)(T_0 - T_a) \approx \gamma L (a + bu)(T_0 - T_a) \quad (2.6)$$

$$LE = \rho c_p (A + Bu) \frac{(e_0^* - e_a)}{\gamma} \quad (2.7)$$

onde:

ρ é a densidade do ar (kg m^{-3});

A possui dimensão de velocidade (m s^{-1}) e B é adimensional; u é a velocidade média do vento a 2m de altura sobre a água (m s^{-1});

e_0^* é a pressão de saturação de vapor d'água à temperatura T_0 (Pa);

e_a é a pressão de vapor d'água no ar (Pa);

c_p é o calor específico a pressão constante do ar ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

T_a é a temperatura do ar (K);

T_0 é a temperatura da superfície da água (K);

γ é a constante psicrométrica para a altitude local (Pa K^{-1});

p é a pressão atmosférica média (em Pa) em uma estação meteorológica em função da sua altitude Z (em m); e

$a + bu$ é o coeficiente de transferência de massa.

Destaca-se a importância da **temperatura da superfície da água** T_0 como um dos parâmetros físicos determinantes para boas estimativas de evaporação em lagos, o que é conhecido de longa data, provavelmente desde a proposição da equação empírica de Dalton em 1802 (Brutsaert, 1982). Entretanto, a dificuldade de obtenção desse parâmetro em escalas espacial e temporal adequadas fez com que esse fosse considerado apenas em avaliações pontuais, e não em âmbito regional ou nacional no Brasil.

A razão entre as equações de transferência (2.6-2.7) produz uma equação explícita para a razão de Bowen (Bo) (2.8), que é utilizada juntamente com a equação do balanço de energia (2.9). Levando-se (2.8) em (2.9), obtém-se a **equação para a estimativa de LE pelo método do balanço de energia-razão de Bowen** (2.10).

$$Bo = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{T_0 - T_a}{e_0^* - e_a} \quad (2.8)$$

$$R_n = H + LE + D \quad (2.9)$$

$$LE = \frac{1}{1 + Bo} [R_n - D] \quad (2.10)$$

onde:

R_n (W m^{-2}) é a irradiância líquida média na superfície; e

D (W m^{-2}) é a taxa de variação de entalpia armazenada nas águas do lago (Dias & Reis, 1998; Dias & Rocha, 1999).

O **SELET** é implementado seguindo três passos principais:

1. os coeficientes de transferência A e B são calibrados para cada lago, substituindo-se as equações de transferência para H (2.6) e LE (2.7) na equação do balanço de energia (2.9), e somando-se os valores diários para cada ano civil. Neste caso, o valor acumulado de D torna-se desprezível, e A e B podem ser estimados (para cada ano civil) com as equações (2.22) e (2.23) detalhadas no Box.

2. de posse de A e B , calcula-se valores diários de H e LE por meio de (2.6) e (2.7) e os valores diários de D por meio de (2.9), seguida de uma análise estatística de quartis para todos os valores de D

do histórico. Se Q_1 , Q_2 e Q_3 são o primeiro (25%), segundo (50%, a mediana) e terceiro (75%) quartis, os valores de D são modificados de maneira a respeitar, na escala diária, os limites mínimo e máximo estabelecidos em (2.11). Essencialmente, essa é uma técnica de remoção de valores espúrios (*outliers*).

$$Q_1 - \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1) \leq D \leq Q_3 + \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1) \quad (2.11)$$

3. os valores de LE e H são recalculados utilizando, em princípio, as equações do método do balanço de energia-razão de Bowen (2.10 e 2.9), nesta ordem, em nível diário. Entretanto, esse método possui limitações para aplicação da estimativa de evaporação em algumas condições: quando a razão de Bowen é muito “negativa” (próxima de -1 ou ainda menor), o método produz valores espúrios: ou os valores de evaporação são muito grandes porque o termo $1 + Bo$ se aproxima de zero, ou mesmo eles se tornam não-físicos (evaporação negativa, quando $Bo < -1$). Por esse motivo, quando $Bo \leq -0,9$, utiliza-se diretamente a equação de transferência de massa (2.7), em lugar de (2.10).

4. Mesmo com todas as consistências realizadas nos dados de entrada e em D , ainda ocorrem casos de valores extremos em módulo de LE (em geral, quando $T_a > T_0$). Assim, o último passo do modelo consiste em realizar uma censura de valores atípicos para os fluxos de calor latente (LE):

$$Q_1 - \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1) \leq LE \leq Q_3 + \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1) \quad (2.12)$$

onde:

Q_1 , Q_2 e Q_3 são o primeiro, segundo, e terceiro quartis da distribuição empírica de probabilidade dos valores diários de LE para todo o período de dados, adotando-se na escala diária os limites mínimo e máximo estabelecidos na equação 10.

É importante frisar que os valores finais de LE continuam a ser majoritariamente aqueles originalmente estimados com as equações (2.6) e (2.7) e que os diversos passos de censura de dados acima descritos modificam uma porcentagem muito pequena daqueles valores originais.

Cálculo da irradiância líquida

Para a aplicação do SELET utilizou-se valores de R_s e de T_0 medidos (obtidos, respectivamente, de estações meteorológicas e/ou de reanálise; e do produto MODIS). A irradiância líquida é dada por:

$$R_n = R_s (1 - a_0) + \epsilon R_a - \epsilon \sigma T_0^4 \quad (2.13)$$

onde:

R_s é a irradiância solar incidente média diária ($W m^{-2} s^{-1}$);

a_0 é o albedo da superfície;

R_a é a irradiância atmosférica incidente diária ($W m^{-2} s^{-1}$);

ϵ é a absorvidade/emissividade da superfície;

$\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann;

T_0 (K) é a temperatura média da superfície, que precisa ser corrigida (Zhao et al., 2020) em relação à temperatura original em graus Celsius calculada a partir do MODIS (T):

$$T_0 = 1,0894T + 273,15 \quad (2.14)$$

A irradiância atmosférica incidente R_a é calculada por meio de:

$$\epsilon_{ac} = 0.625 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{0.131} \quad (2.15)$$

$$R_{ac} = \epsilon_{ac} \sigma T_a^4 \quad (2.16)$$

$$C = 1 - \frac{n}{N} \quad (2.17)$$

$$R_a = R_{ac} (1 - C^{0.671}) + 0.990 C^{0.671} \sigma T_a^4 \quad (2.18)$$

A equação (2.15) foi proposta por Brutsaert (1975) para a emissividade atmosférica de céu claro ϵ_{ac} , e os coeficientes 0,625 e 0,131 utilizados neste trabalho foram otimizados por Duarte et al. (2006). A irradiância atmosférica com céu claro é calculada por (2.16), e finalmente a irradiância atmosférica incidente é calculada por (2.18) levando em consideração o aumento da irradiância atmosférica incidente devido à nebulosidade C (Duarte et al., 2006). Em (2.15) a (2.18) T_a é dada em K e e_a em Pa.

O número de horas de brilho intenso de sol n , necessário para a estimativa da irradiância atmosférica incidente com céu parcialmente encoberto (2.17 e 2.18) é estimado invertendo-se a equação de Prescott:

$$\frac{n}{N} = \frac{R_s - R_{sea} - a_p}{b_p} \quad (2.19)$$

onde:

R_{sea} é a irradiância solar (média de 24 horas) extra-atmosférica;

N é o número máximo de horas de brilho do sol em horas, com $a_p = 0,25$ e $b_p = 0,50$ (Allen et al., 1998), sujeito à restrição $0 \leq \frac{n}{N} \leq 1$

Os valores de N , R_{sea} e a_0 calculados apresentam variação de acordo com a latitude. As grandezas astronômicas que entram em uma série de cálculos relacionados à energia disponível para a evaporação na superfície são a declinação do sol δ , a distância sol-terra em unidades astronômicas r' e o número máximo de horas de brilho do sol N .

Cálculo dos coeficientes de transferência

A e B são coeficientes de transferência estimados anualmente para cada lago. Isso traz significativas vantagens operacionais: além de ser um método simples de calibração local, os valores de A ou B finais podem ser calculados a cada novo ano de dados.

O cálculo considera a equação de balanço de energia (2.9), substituindo H e LE com as equações de transferência (2.6 e 2.7) em nível diário e com $N_d = 365$ ou 366 dias do ano:

$$\sum_{i=1}^{N_d} R_{ni} - \sum_{i=1}^{N_d} D_i = \sum_{i=1}^{N_d} [H_i + LE_i] \quad (2.20)$$

$$\sum_{i=1}^{N_d} R_{ni} = \sum_{i=1}^{N_d} [\rho c_p (A + Bu_i)(T_{0i} - T_{ai}) + \rho c_p (A + Bu_i) \frac{e_{0i}^* - e_{ai}}{\gamma}] \quad (2.21)$$

Em (2.20), o termo de variação da entalpia armazenada é desprezado para um ano completo (=0). Note que (2.21) é uma única equação, com duas incógnitas A e B: uma restrição adicional precisa ser imposta, considerando-se que as contribuições dos termos envolvendo A e B sejam iguais. Isso nos leva a:

$$A = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{N_d} R_{ni}}{\sum_{i=1}^{N_d} \rho c_p [(T_{0i} - T_{ai}) + \frac{e_{0i}^* - e_{ai}}{\gamma}]} \quad (2.22)$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{N_d} R_{ni}}{\sum_{i=1}^{N_d} \rho c_p u_i [(T_{0i} - T_{ai}) + \frac{e_{0i}^* - e_{ai}}{\gamma}]} \quad (2.23)$$

onde todas as variáveis acima são conhecidas na escala diária, com T_a (temperatura do ar, em K), u (velocidade do vento a 2 m, em $m s^{-1}$) e e_a (pressão de vapor d'água no ar, em Pa) medidos em terra; e T_0 (temperatura da superfície da água, em K) obtida por sensoriamento remoto (MODIS).

Em síntese, a operacionalização do SELET para **evaporação bruta do lago** requer dados do inventário de massas d'água artificiais (geometria, data de implantação, latitude e altitude); dados meteorológicos oriundos de estações meteorológicas em terra ou de produto de reanálise; e dados de temperatura superficial da água, oriundos dos satélites Terra e Aqua do MODIS.

Para a obtenção da altura de **evaporação líquida (em mm = litro/m²)**, a **evaporação bruta é descontada da evapotranspiração real** observada em áreas vizinhas ao reservatório, a partir do produto MOD16A após a correção de viés. As variações de **área do lago ou a área mapeada** fixa são então combinadas às alturas de evaporação para estimar as **vazões de evaporação líquida** consumidas pelos reservatórios.

A definição de cada fonte de dados e o tratamento de inconsistências, vieses e eventuais falhas foi precedida de análise pelas equipes técnicas da ANA e da UFPR, englobando **critérios de consistência, resolução espacial e temporal, disponibilidade e acurácia**. As figuras a seguir ilustram o fluxo metodológico e um exemplo de aplicação do método de estimativa de evaporação líquida em um reservatório hipotético.

As fontes de dados e os tratamentos realizados serão detalhados nos próximos tópicos, agrupados em: inventário e características das massas d'água artificiais; temperatura superficial da água; meteorologia; e evapotranspiração real.

Síntese do método e das fontes de dados para cálculo da Evaporação Líquida

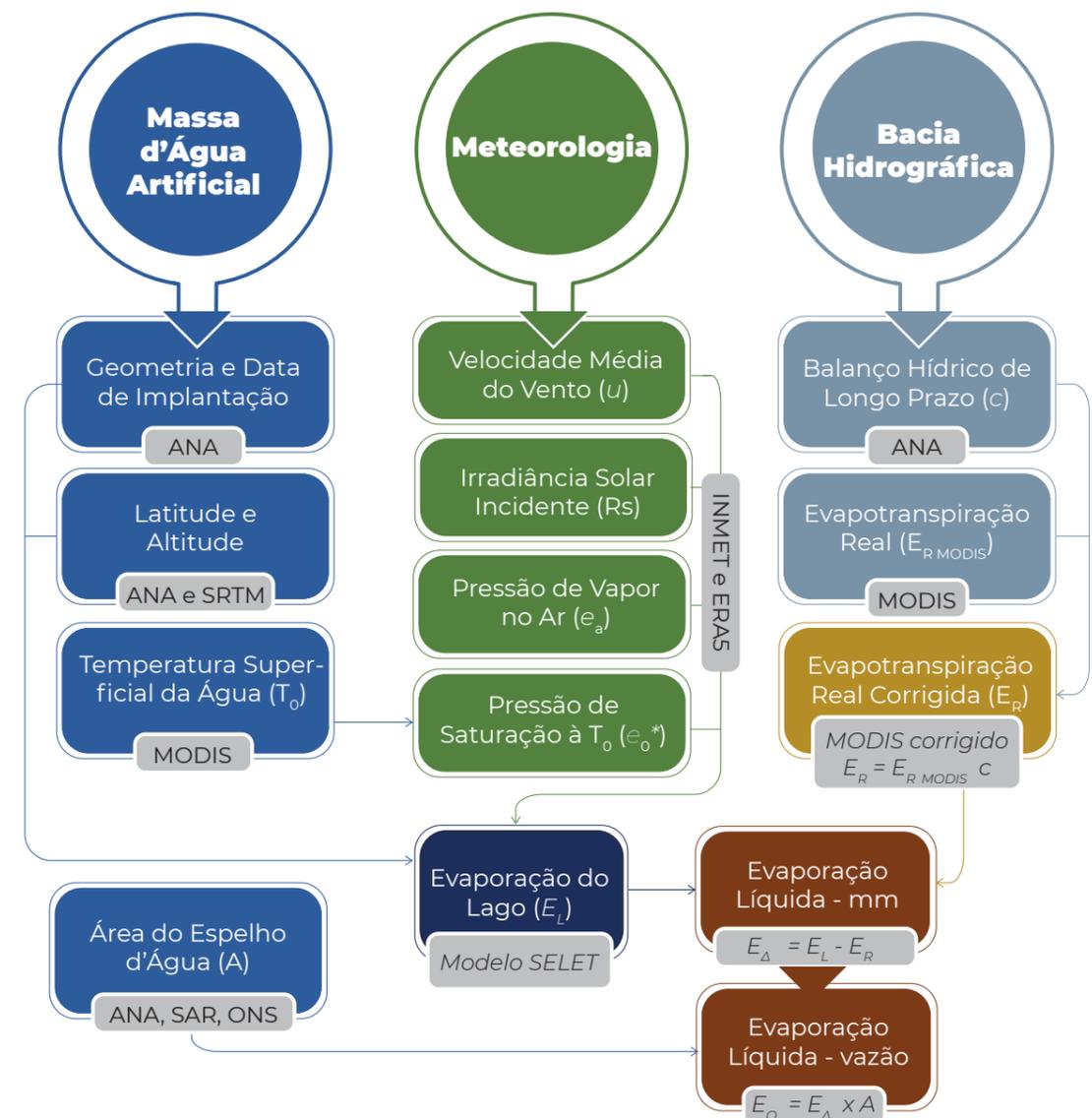
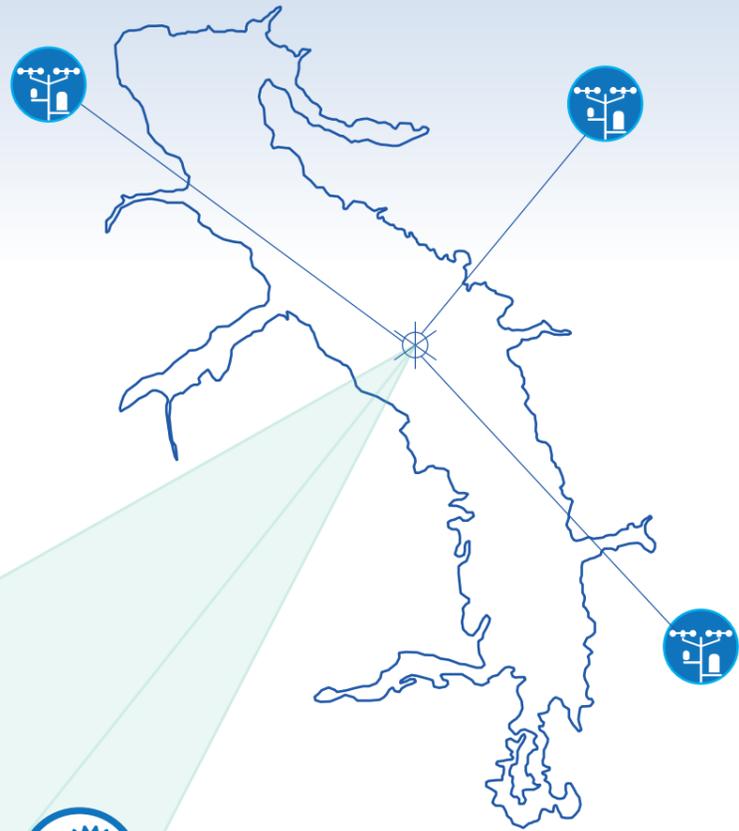


ILUSTRAÇÃO DA ESTIMATIVA DE EVAPORAÇÃO LÍQUIDA

RESERVATÓRIO E ANO HIPOTÉTICOS

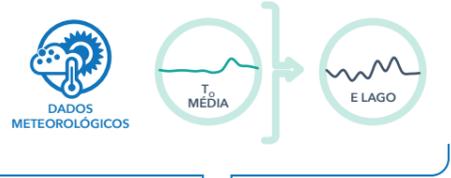
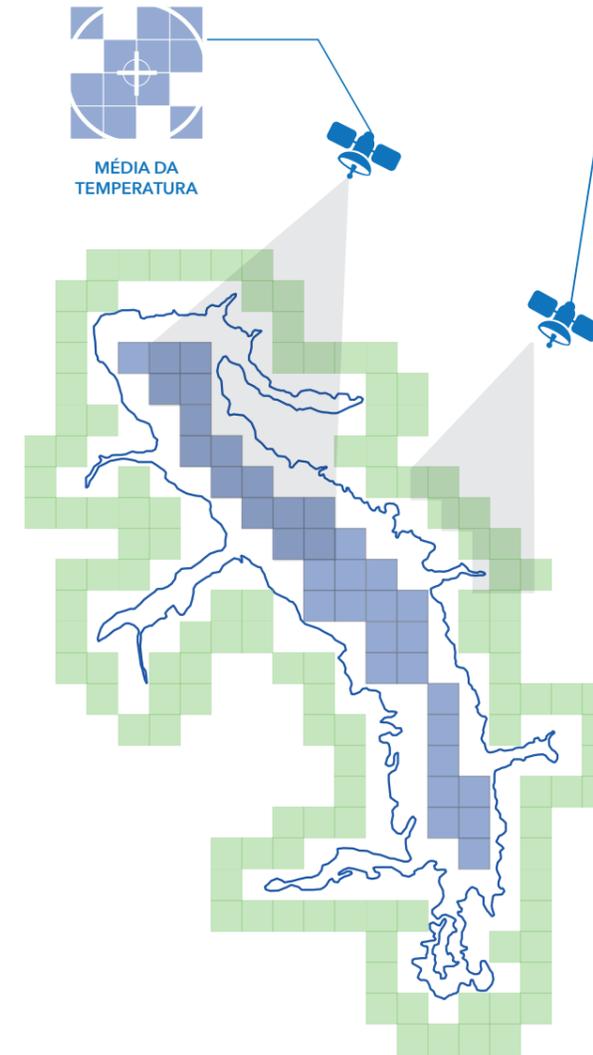
ÁREA MAPEADA: 35 km²



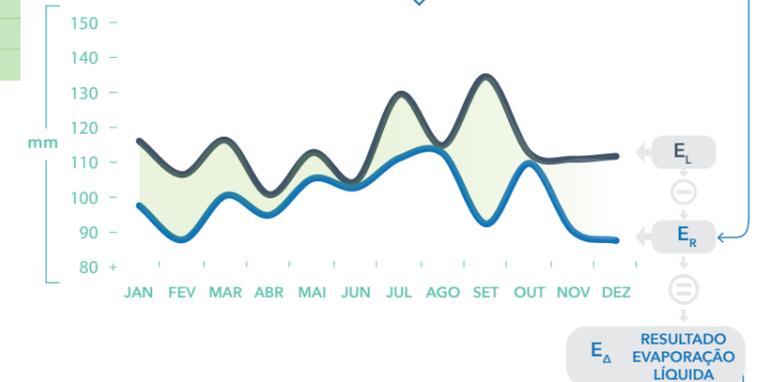
TEMPERATURA DA ÁGUA



EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL



ALTURA

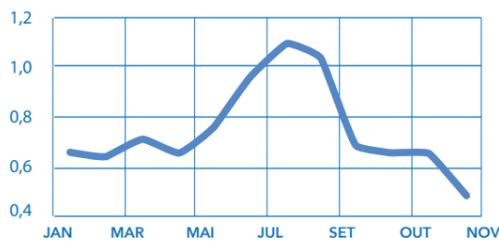


DADOS METEOROLÓGICOS

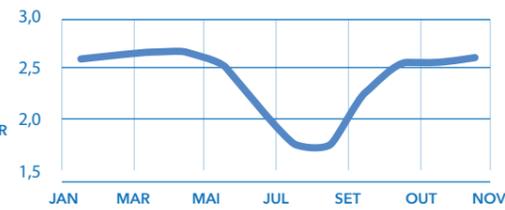
média ponderada pela distância ao reservatório



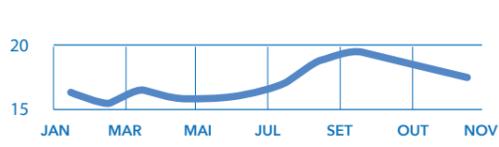
VENTO (m/s)



PRESSÃO DE VAPOR ATUAL DO AR e_a (kPa)



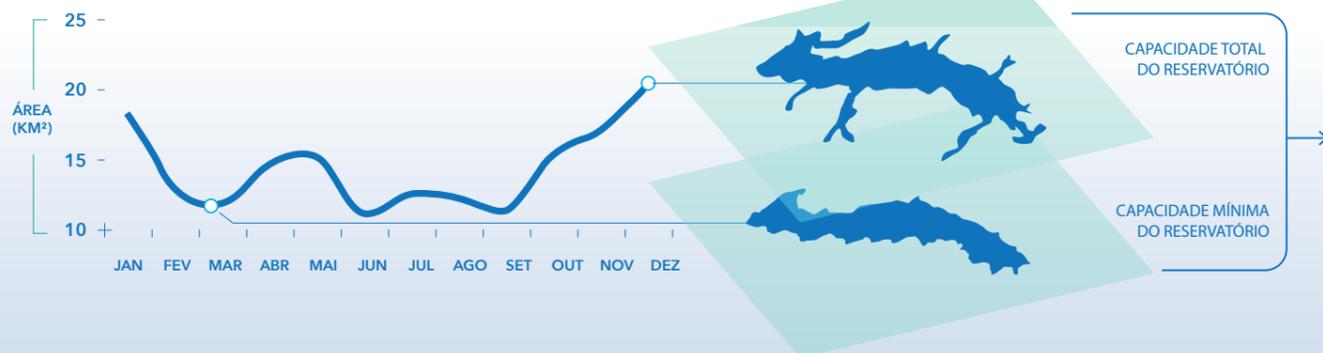
IRRADIÂNCIA SOLAR INCIDENTE R_s (MJ/m²)



TEMPERATURA DO AR T_a (°C)



VARIAÇÃO DE ÁREA OBSERVADA (A)



VAZÃO MENSAL DE EVAPORAÇÃO LÍQUIDA (E_Q)



Bases de Dados

Inventário e características das massas d'água artificiais

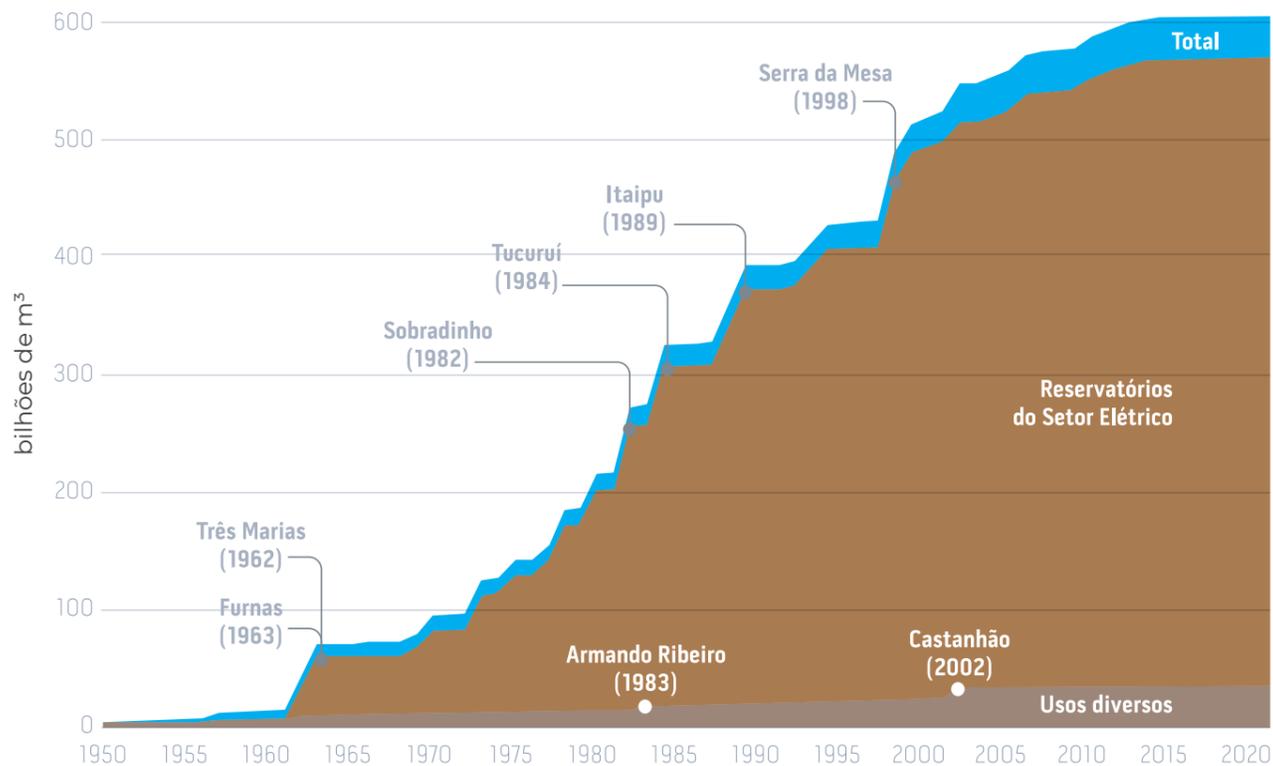
O Brasil possui cerca de **175 mil massas d'água artificiais** inventariadas pela ANA, que ocupam **46 mil km²**, equivalente à área do estado do Espírito Santo. 90% desses reservatórios possuem área superficial inferior a 10 ha (ou 0,1 km²) e apenas 57 reservatórios, cuja área superficial individual é superior a 10.000 ha (ou 100 km²), correspondem a aproximadamente 70% da área total das massas d'água artificiais no País.

As massas artificiais atendem a diversos propósitos. A maior parte da superfície de água, entretanto, está concentrada nos maiores reservatórios de abastecimento urbano e naqueles de usos múltiplos operados pelo setor elétrico. Embora menos expressivas no total nacional, determinadas bacias possuem milhares de pequenos reservatórios que somam uma superfície equivalente à de grandes reservatórios,

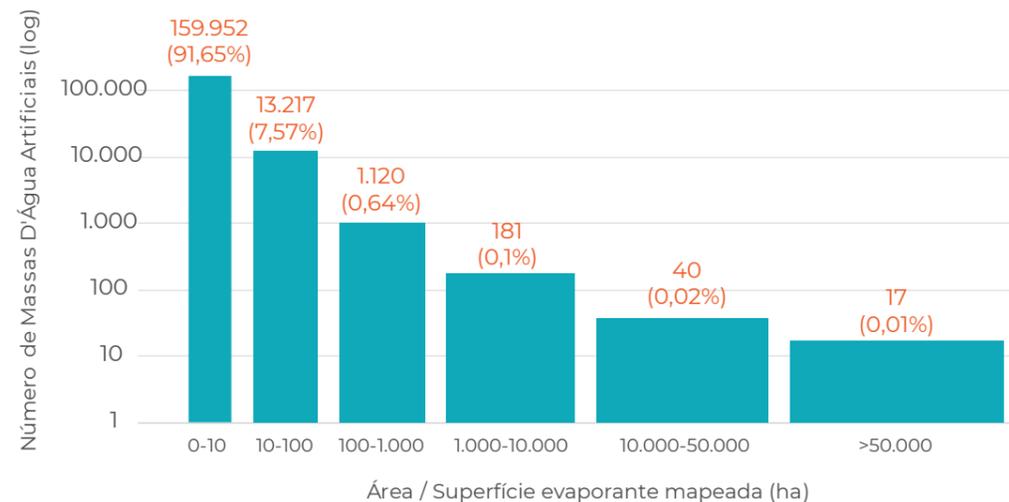
sendo, portanto, importantes para o balanço hídrico local. Os pequenos barramentos atendem principalmente ao consumo humano, à mineração, à indústria, à aquicultura, aos rebanhos e à agricultura irrigada.

A evolução da reservação de água no país foi intensificada a partir de 1950, com destaque, novamente, para a grande representatividade do volume dos reservatórios construídos pelo setor elétrico em relação à capacidade total de armazenamento. Em termos de volumes armazenados, cerca de 3.600 reservatórios do país possuem informação de capacidade total de armazenamento, totalizando 630 bilhões de m³ em 2020. Em termos de volume útil destinado à geração de energia elétrica nos reservatórios integrantes do Sistema Interligado Nacional (SIN), a maior capacidade de armazenamento de água encontra-se nas regiões hidrográficas do Paraná, Tocantins-Araguaia e São Francisco, totalizando mais de 266 bilhões de m³ (ANA, 2020a).

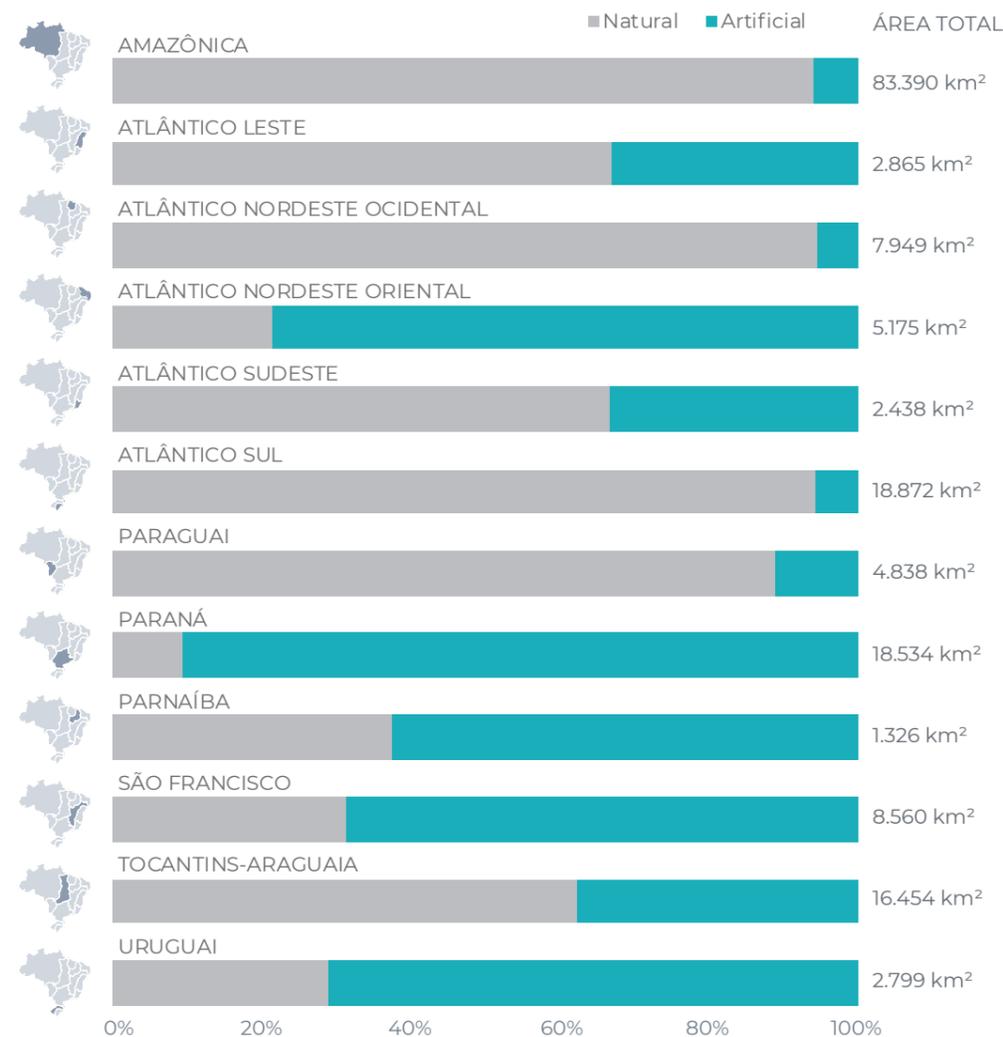
Evolução da capacidade de armazenamento de água do Brasil



Distribuição de frequência das massas d'água artificiais em classes de área



Proporção entre massas d'água naturais e artificiais nas Regiões Hidrográficas



Ao **inventário de massas artificiais** disponibilizado pela ANA, foram agregadas informações adicionais para fins de estimativas de vazões de evaporação líquida, sobre: a **data de início** (informação limitada nas fontes do inventário), a **variação de área** dos reservatórios ao longo do tempo (que reflete a operação e a disponibilidade hídrica) e a **altitude** (para determinação de variáveis do método).

Um dos desafios do inventário de massas d'água refere-se à **data de construção e/ou de enchimento dos reservatórios**, ou seja, da sua data de implantação que, por consequência, ocasiona consumo por evaporação líquida. No inventário atual, apenas 1.483 reservatórios (0,85% do total) possuem essa informação, compilada pela ANA por diversas fontes de informação (ANA, 2020). Por outro lado, por se tratar dos maiores reservatórios, 82% da superfície evaporante mapeada possui essa informação.

A escassez destas informações é limitante para as estimativas de séries longas de evaporação líquida. A tarefa de compilar as datas a partir da documentação histórica é onerosa, sobretudo em uma grande extensão espacial como o Brasil, além de introduzir critérios heterogêneos de obtenção da informação. Além do passivo de massas d'água já existentes, constantemente são construídos novos reservatórios.

Para superar essa limitação, o inventário atual de datas de implantação dos reservatórios foi complementado a partir da análise do produto *Global Surface Water (GSW)*, desenvolvido inicialmente por Pekel et al. (2016), em base mensal, para o período de 1984 a 2015 utilizando o catálogo de imagens Landsat processado no *Google Earth Engine*. O *Joint Research Centre (JRC)* tem disponibilizado atualizações sistemáticas dessa base de dados (<http://global-surface-water.appspot.com/>).

A partir do GSW, foi implementada uma rotina para a varredura dos dados, analisando, mês a mês, a resposta espectral de todas as imagens disponíveis no período de março de 1984 a dezembro de 2018 nos pixels inseridos nos polígonos mapeados dos reservatórios no Brasil. A hipótese principal é que o mês/ano de enchimento pode ser encontrado entre a persistência de indicação de "não água" no tempo,

seguida pela persistência de "água" dentro do polígono mapeado.

Essa implementação automatizada, por outro lado, não é simples, principalmente por variações nos espelhos tanto por motivos físicos (variações reais do nível da água) quanto por problemas relacionados à amostragem das imagens Landsat (cobertura de nuvens ou falhas).

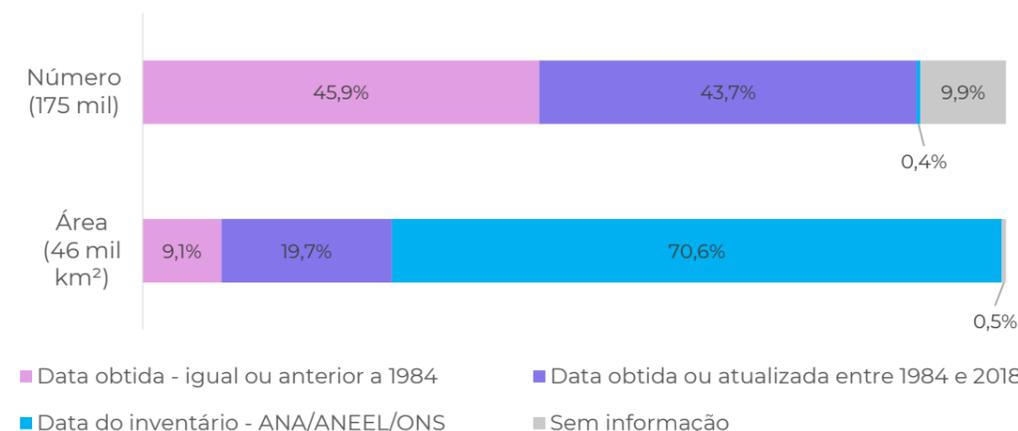
Para análise de consistência e correção dos resultados iniciais, foram utilizados dois **filtros numéricos**. O primeiro foi aplicado na envoltória superior dos dados observando uma janela móvel centrada de dados com intervalo de cinco meses. O segundo é uma regressão local para filtrar variações espúrias remanescentes nos dados e foi implementado pelo algoritmo LOWESS (*Locally Weighted Estimated Scatterplot Smoothing*). O LOWESS é um método não paramétrico que estima curvas e superfícies utilizando combinações de regressões múltiplas (Cleveland, 1979).

Os dados que já constavam nas massas inventariadas foram utilizados para calibrar os parâmetros de processamento, ou seja, para definir critérios objetivos que permitam identificar o enchimento de reservatórios na série do produto GSW.

Como resultado, foi possível obter as datas de enchimento para 155.676 reservatórios que não possuíam essa informação (89% do número e 17,4% da área mapeada) que, somados com os dados que já existiam em inventário, totalizam 90,1% do número e 99,5% da área de reservatórios no Brasil. Adicionalmente, o cruzamento e a análise dos resultados permitiu identificar prováveis erros de datas em 11,5% da superfície inventariada originalmente (de 82%).

Como números finais dessa avaliação, 70,6% da superfície de reservatórios (0,4% do número) permaneceu com datas originais ou atualizadas dos inventários da ANA, da ANEEL e do ONS. A metodologia aplicada permitiu obter ou atualizar as datas de início ou enchimento para 28,9% da superfície e 89,6% do número de reservatórios. Para apenas 0,5% da área cadastrada de lagos não foi possível estimar uma data de implantação.

Atribuição de data de construção e/ou de enchimento dos reservatórios



Os métodos de obtenção da evaporação líquida e de suas componentes (evaporação do lago e evapotranspiração real) resultam em valores por unidade de área (mm ou L/m²), sendo necessário conhecer a **área do lago** para obter o volume total de água consumido.

Para a maior parte dos lagos de menor porte, que totalizam porção menos relevante da área total, a variação de área é inexpressiva ou desconhecida, restando a adoção de áreas mapeadas fixas constantes dos inventários. Já os maiores reservatórios, especialmente os de acumulação, guardam grandes volumes de água e, portanto, apresentam oscilação relevante da área ocupada ao longo do tempo, sendo essencial conhecer o seu **histórico de operação**.

Os reservatórios que integram o Sistema Interligado Nacional – SIN possuem monitoramento diário de cota disponibilizado pelo ONS, que pode então ser convertido em área. Em 2014, a ANA lançou o **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR)** – uma plataforma *web* que permite o acompanhamento da operação dos principais reservatórios do Brasil – além de utilizar os dados do SIN/ONS, o SAR estabeleceu parcerias com outros operadores para disponibilizar dados de reservatórios do Nordeste e Semiárido e daqueles que atendem o Distrito Federal, São Paulo (sistema Cantareira) e Belo Horizonte (sistema Paraopeba).

Com isso, cerca de 450 reservatórios que cobrem 80% da superfície evaporante possuem algum monitoramento de variação da área. Os dados oriundos

do ONS (72% da superfície) são mais abrangentes e consistentes, enquanto nos demais casos há situações heterogêneas (como grandes períodos de falhas nos dados).

Em todos os casos, como o monitoramento é autodeclaratório, foram realizados passos de consistência e de preenchimento de dados como, por exemplo, a exclusão de cotas superiores à máxima ou inferiores à mínima do reservatório, e níveis de tolerância para oscilações bruscas nos dados.

Além destes, outros reservatórios que constam na base do SAR dispõem de dados de cota medidos em escala diária, porém, sem a curva cota-área-volume (CAV) definida. Ou seja, apesar de existir o registro das cotas, não há informação da área correspondente. De forma complementar, diversos métodos são aplicados e validados para a delimitação e descrição da sazonalidade de massas d'água a partir do uso de conjuntos de imagens de satélite de média e alta resolução espacial integrados com bases de inventários e registros históricos, tornando possível uma estimativa da relação cota – área a partir de dados de áreas obtidos indiretamente.

Considerando a existência de 125 reservatórios com pelo menos 36 registros de leituras de cotas na base SAR (áreas entre 0,01 km² e 64 km²), foi implementada uma rotina no *Google Earth Engine* para a extração da série de áreas inundadas do conjunto de imagens do GSW, em resolução mensal (03/1984 - 12/2019). Para efeitos práticos, considerou-se um *buffer* de 5 km no entorno de cada

reservatório, a partir da geometria disponibilizada em ANA (2020a) para extração dos pixels "de água" dentro da área correspondente a cada massa d'água. Dada a existência de diversas falhas e inconsistência nas séries brutas de áreas do GSW (p.ex. percentuais de dados válidos entre 11% a 79% para os 125 reservatórios devido à imagens com elevados percentuais de ausência de dados relacionados à cobertura de nuvens), buscou-se realizar o ajuste de um modelo cota-área a partir dos dados de leitura de cotas da série histórica com apoio da série de áreas extraída do GSW.

Apesar de limitações observadas devido à disponibilidade de pares de leituras de cotas (em escala diária, sendo convertidas para médias mensais) e da informação correspondente à área inundada para o referido mês, foi possível a obtenção das curvas cota-área para 45 reservatórios (150 km²). Após um processo de verificação e validação dos polinômios ajustados, bem como uma análise de consistência das séries de cotas para ajuste dos limites inferiores e superiores de validade dos modelos, foi possível

consolidar uma base de polinômios de 4º grau, ajustados para a descrição da variação das áreas de 26 reservatórios (112 km² de área inundada).

O modelo **SELET** aplicado também requer a **altitude média dos reservatórios** em relação ao nível médio do mar. Para tanto, realizou-se um cruzamento espacial entre o centroide geométrico das feições mapeadas e o modelo digital de elevação (MDE) produzido pelo Shuttle Radar Topography Mission - SRTM (produto SRTMv3, conforme detalhado em Farr et al., 2007). O **SRTM** foi projetado para coletar medidas tridimensionais da superfície do planeta através de técnicas de interferometria com o SIR-C/X-SAR. O produto adotado tem resolução espacial de aproximadamente 30 metros e foi acessado no repositório de dados do Google Earth Engine. Cabe ressaltar que o produto resulta de um esforço colaborativo entre diversas agências e institutos de pesquisas internacionais - a disponibilização é feita pela National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory (NASA JPL).

Temperatura Superficial da Água

A temperatura da superfície da água (T_0) é um dos parâmetros físicos determinantes para boas estimativas de evaporação em lagos. O monitoramento da temperatura é dispendioso e, tratando-se de grandes massas d'água, há elevada probabilidade de subamostragem espaço-temporal.

A utilização de satélites para o monitoramento da temperatura da superfície da água iniciou-se nos oceanos, destacando-se os sensores do Advanced Very High Resolution Radiometer - AVHRR, operado desde 1981 pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e pela NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Mais recentemente, a partir da década de 2000, o imageamento por satélite tem sido utilizado como fonte de dados de temperatura da superfície de massas d'água continentais. A maior parte dos estudos tem utilizado dados de sensores do MODIS e dos satélites Landsat ou uma combinação de diferentes produtos. A acurácia satisfatória das estimativas de T_0 é comprovada tanto para os sensores com maior

resolução espacial (como Landsat e ASTER) (Becker & Daw, 2005; Kay et al., 2005; Vanhellemont, 2020), quanto para sensores com maior resolução temporal (como MODIS e AVHRR) (Bussières et al., 2002; Liu et al., 2015; Sima et al., 2013).

Os produtos mais utilizados (MODIS e Landsat) se contrapõem na medida em que o MODIS oferece dados subdiários, mas com menor resolução espacial. Já os sensores dos satélites Landsat apresentam maior resolução espacial, mas com frequência de visita de 16 dias e alto percentual de falhas em regiões com maior cobertura de nuvens.

Após uma avaliação das fontes de dados disponíveis, os **produtos MOD11A1 e MYD11A1 do MODIS** foram selecionados por conta da extensa **validação** pela comunidade científica e da **regularidade** de dados subdiários (4 passagens: 2 durante o dia e 2 durante a noite) - essencial para a obtenção de séries contínuas e representativas de temperatura e, consequentemente, de evaporação dos lagos.

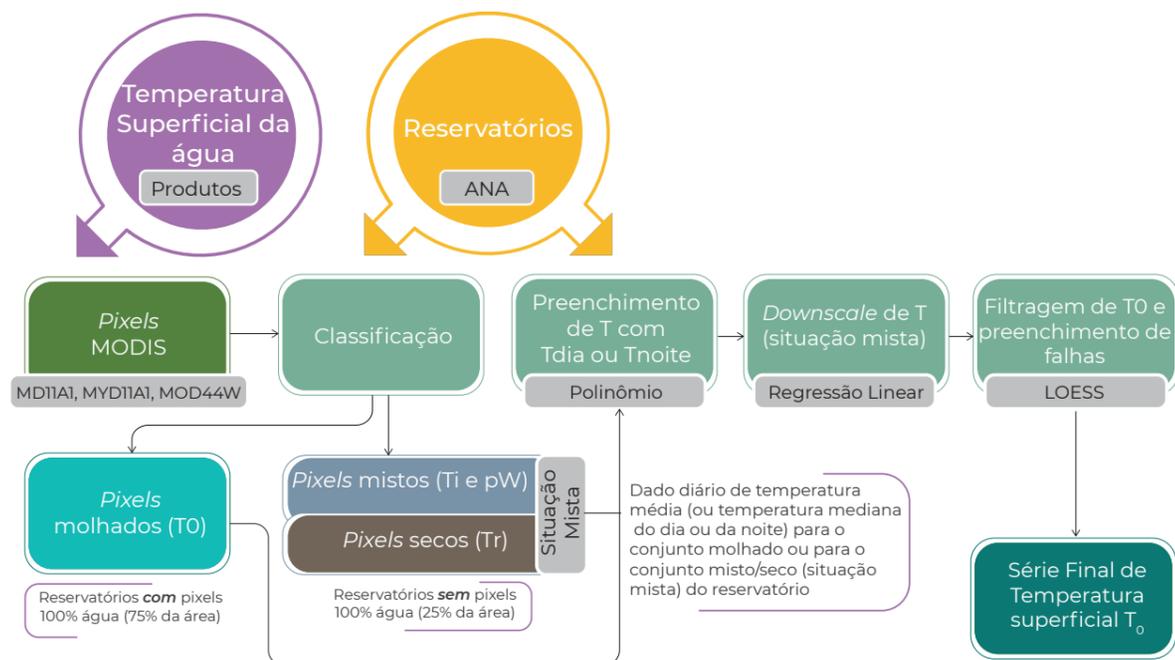


Sensores orbitais utilizados para monitoramento da temperatura da superfície de massas d'água continentais

Satélite	Sensor	Agência	Resolução Espacial (m)	Resolução Temporal (dias)	Operação
Terra/Aqua	MODIS	NASA	1.000	1 a 2	2000 em diante
Terra	ASTER	NASA/JAXA	90	16	2000 em diante
Sentinel-3	SLSTR	ESA	1000	~1	2018 em diante
Envisat	AATSR	ESA	1.000	35	2002-2012
LANDSAT 4	TM	NASA	120	16	1982-1993
LANDSAT 5	TM	NASA	120	16	1984-2013
LANDSAT 7	ETM+	NASA	60	16	1999 em diante
LANDSAT 8	TIRS	NASA	100	16	2013 em diante

Sensores: MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer; SLSTR - Sea and Land Surface Temperature Radiometer; AATSR - Advanced Along Track Scanning Radiometer; TM - Thematic Mapper; ETM+ - Enhanced Thematic Mapper Plus; e TIRS - Thermal Infrared Sensor. Agências: NASA - National Aeronautics and Space Administration; JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency; e ESA - European Space Agency.

Síntese das etapas de trabalho para obtenção da temperatura da água



A qualidade das estimativas de T_0 é diretamente afetada tanto pelo efeito de borda nas massas d'água (Schaeffer et al., 2018) quanto pela presença de diferentes tipos de coberturas da superfície dentro de um mesmo pixel (Martí-Cardona et al., 2019). Para obter dados em nível de detalhe, quando um reservatório não possui um pixel inteiro apenas com água (pixel "molhado"), podem ser aplicadas técnicas de *downscaling* (Yuan et al., 2020; Zhan et al., 2012), que objetivam refinar a resolução espacial de uma informação com boa resolução temporal a partir de variáveis predictoras com melhor resolução espacial.

Para lidar com esses e outros desafios, inicialmente foi realizada a seleção de pixels representativos do MODIS para as geometrias de massas d'água mapeadas. Reservatórios maiores tendem a ter diversos pixels puros de água, enquanto massas menores podem ter apenas pixels mistos (água e terra) representativos. Nesses casos, o valor de T_0 deve ser ajustado em função da relação com os pixels secos do entorno e da proporção de área molhada/de terra em cada pixel misto.

Análises e critérios de preenchimento foram definidos para equacionar falhas/inconsistências, permitindo a obtenção de **séries diárias completas** para

todos os reservatórios. O preenchimento dos dados ocorreu em nível subdiário para quando há falhas nas leituras do dia ou da noite; ou para o nível diário, para quando não houver qualquer leitura no dia.

Preenchimento subdiário e diário

Os valores de T_0 medidos durante a noite (T_{0Noite}) e o dia (T_{0Dia}) podem apresentar diferenças significativas e que não são constantes ao longo do ano. Neste aspecto, a irradiância incidente exerce grande influência na variação sazonal da amplitude entre T_{0Noite} e T_{0Dia} (Liu et al., 2015). Médias diárias, portanto, não podem ser calculadas de forma consistente com leituras apenas do dia ou apenas da noite, o que exigiu o preenchimento de falhas subdiárias.

Uma alternativa seria somente considerar válidas as médias diárias de T_0 nos dias em que se dispõe ao menos de uma leitura do dia e uma da noite. Todavia, esta opção reduziria significativamente os dados utilizáveis. Por outro lado, é possível analisar as tendências entre os valores médios e os valores do dia ou da noite de T_0 , estabelecendo relações diretas (Oesch et al., 2008). Essa opção permite estimar valores médios diários de T_0 consistentes, mesmo quando se dispõe apenas de T_{0Noite} ou T_{0Dia} . Assim, a

partir das dispersões dos pares $\{T_{0Dia}; T_{0média}\}$ e $\{T_{0Noite}; T_{0média}\}$ foram definidos **polinômios de 3º grau para os preenchimentos subdiários** (Eq. 2.24).

Após o preenchimento subdiário ainda houve casos de reservatórios artificiais com falhas ou com outliers na série de dados diários. O **LOESS** (Locally Estimated Scatterplot Smoothing) foi adotado para **remover valores extremos** de temperatura e interpolar **períodos com falhas**. O LOESS é um método de regressão com peso local que calcula valores para cada intervalo k da abscissa ajustando uma função das variáveis independentes localmente e de forma

análoga ao cálculo de uma média móvel para uma série temporal. Este procedimento fornece um ajuste robusto dos dados e previne que valores espúrios influenciem o resultado e evita a interpolação de valores distantes do dado real observado (Cleveland, 1979; Cleveland & Devlin, 1988).

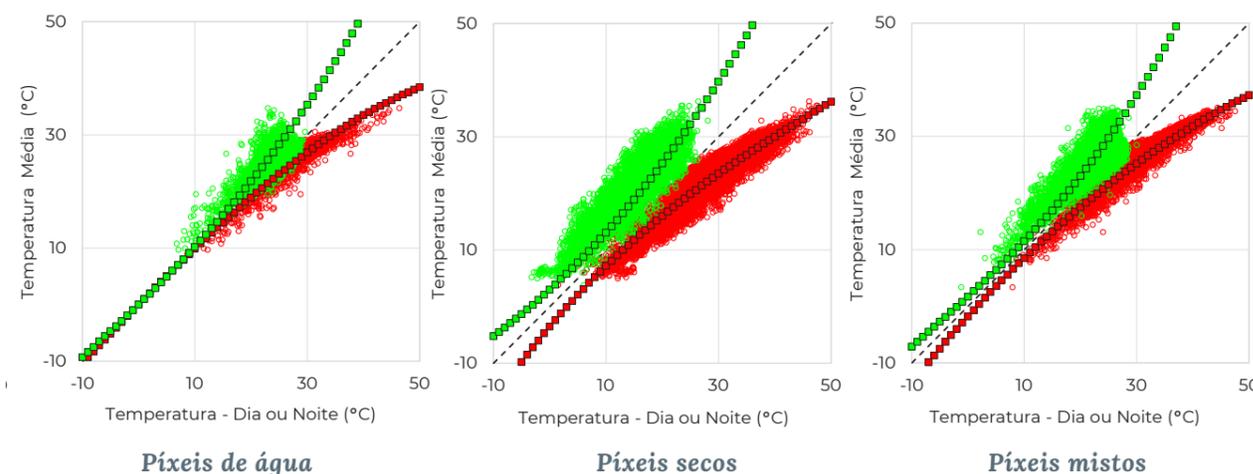
O LOESS foi testado com diversas opções de tamanho de janela móvel de ajuste. Após inspeção de um conjunto grande de dados optou-se pela adoção de uma janela $n = 14$ dias, a qual se mostrou compatível com a variabilidade temporal e os padrões de falhas de leitura nos dados diários.

Coefficientes para preenchimento subdiário de T_0 $T_0 = b + m_1x + m_2x^2 + m_3x^3$ (2.24)

Píxeis	x	b	m_1	m_2	m_3
secos $pW = 0$	T_0 dia	-3,544805824	1,182935414	-0,011879119	8,24204E-05
	T_0 noite	3,000122190	0,911208735	0,009300321	3,84510E-05
mistos $0 < pW < 1$	T_0 dia	-1,772700087	1,102692704	-0,007316181	1,79400E-05
	T_0 noite	1,741292455	0,913896482	0,004226682	1,58848E-04
molhados $pW = 1$	T_0 dia	0,000000000	1,016772902	-0,002599753	-4,76434E-05
	T_0 noite	0,000000000	0,963145494	0,004596711	8,43496E-05

Nota: a) pW é a proporção de água no pixel MODIS; b) Tomando como exemplo o caso de um pixel molhado, para um valor de T_{0Dia} de 40°C a média diária de T_0 será 33,5°C. Para um valor de T_{0Noite} de 30°C a média diária de T_0 será 35,3°C

Relação entre os valores diários de T_0 - média do dia, da noite e diária



Nota: os círculos verdes representam a T_{0Noite} e os vermelhos a T_{0Dia} . Os quadrados verdes representam o polinômio que descreve a relação entre T_0 e T_{0Noite} , enquanto os quadrados vermelhos representam o polinômio que descreve a relação entre T_0 e T_{0Dia} .

Desagregação de píxeis mistos

Grande parte da área ocupada por massas d'água artificiais no Brasil (75%) é representada por 161 reservatórios cujas geometrias englobam, no mínimo, um pixel MODIS totalmente em água (pixel molhado). Para 25% da área, e para a maior parte do número de reservatórios (174.365), as geometrias das massas d'água englobam apenas píxeis mistos (com água e com terra) - quando é aplicado um passo adicional de desagregação dos dados de temperatura de píxeis mistos para a obtenção da T_0 .

Inicialmente, foram testados índices de vegetação como preditores para a desagregação, os quais não se mostraram satisfatórios. Em novos testes, utilizou-se a máscara de superfícies com água do próprio MODIS (produto MOD44W) e procedeu-se uma análise multiescalar da correlação linear da variável preditora com a temperatura da superfície da água. Assim, construiu-se uma matriz relacionando a temperatura da superfície da água nos píxeis molhados (T_0) com as seguintes variáveis preditoras: i) fração da superfície ocupada por água nos píxeis mistos (pW); ii) temperatura média da superfície nos píxeis secos (T_r); e iii) temperatura média da superfície dos píxeis mistos (T_i).

Para este procedimento foram selecionados três reservatórios de cada zona climática brasileira, representando os reservatórios com a menor, a mediana

e a maior ocorrência de píxeis molhados. Após agregação diária e filtragem, obteve-se 6.630 conjuntos simultâneos de valores de T_0 , pW , T_r e T_i . Em sequência foi realizada uma análise de regressão linear múltipla relacionando T_0 com as três variáveis preditoras (pW , T_r e T_i). A figura abaixo apresenta a comparação entre os valores medidos de T_0 pelos produtos MOD11A1 e MYD11A1 com os valores estimados de T_0 pela regressão linear. Apresenta ainda a distribuição espacial das massas d'água utilizadas na análise.

Regressão linear múltipla e coeficientes adotados para estimativa de T_0 em píxeis mistos

$$T_0 = b + j_1 pW + j_2 T_i + j_3 T_r \quad (2.25)$$

$$b = 3,054582416$$

$$j_1 = 0,902078544$$

$$j_2 = 1,125886828$$

$$j_3 = -0,281645158$$

onde:

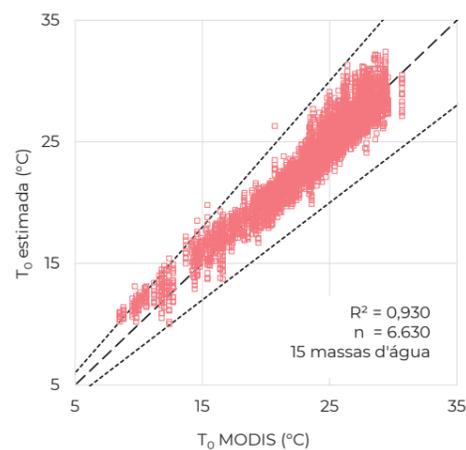
T_0 é a temperatura diária da água;

pW é a proporção de água no pixel MODIS;

T_r é a temperatura de referência do pixel seco; e

T_i é a temperatura do pixel misto.

Correlação de valores de T_0 MODIS com os estimados pela regressão linear e localização dos reservatórios adotados na análise



Validação

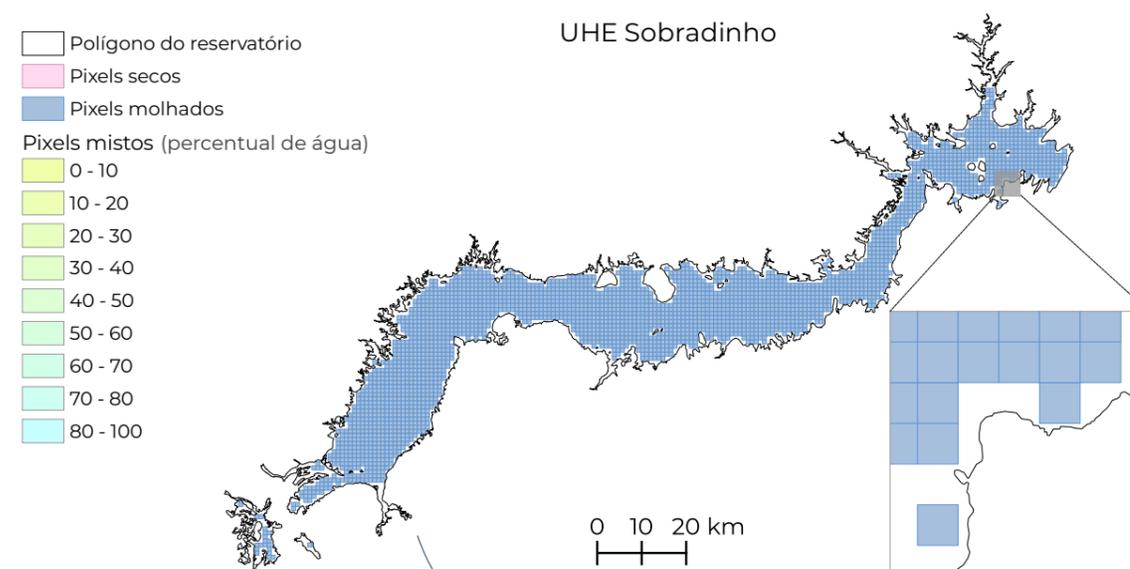
As estimativas obtidas de T_0 foram comparadas com medições *in situ* distribuídas pelo país e foram analisadas com relação à sazonalidade. Foram selecionadas 1.008 medições de temperatura entre 2000 e 2020 constantes nas bases de dados da ANA (Hidro/Conjuntura) coincidentes com 38 píxeis molhados (100% de água) do MODIS.

Destaca-se que há limitações nesse comparativo, especialmente por conta da resolução espacial (o pixel MODIS representa uma média de 1 km², enquanto a medição local é pontual); da resolução temporal

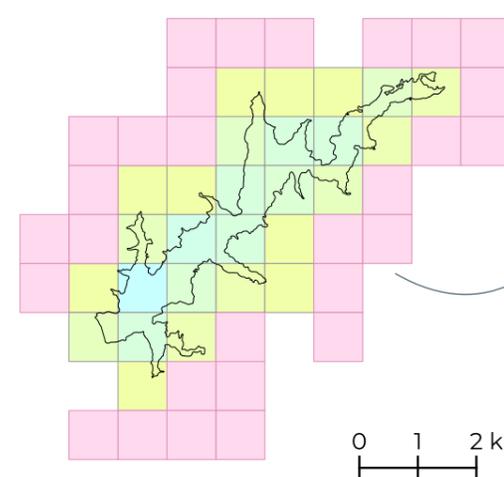
(MODIS com 4 leituras diárias x estação com uma leitura, em geral); e da profundidade (MODIS refere-se a uma camada de 0 a 100 μm da superfície, enquanto as medições não dispõem de padronização - um termômetro mergulhado, por exemplo, não é diretamente comparável com o MODIS).

Apesar das limitações, as estimativas de T_0 provenientes dos produtos MOD11A1 e MYD11A1 apresentaram boa acurácia quando comparadas com as medições *in situ* ($R^2 = 99,2\%$) e representam adequadamente as variações sazonais no Brasil.

Ilustração de reservatório com píxeis molhados e de outro com apenas mistos



Reservatório do Rio Verde



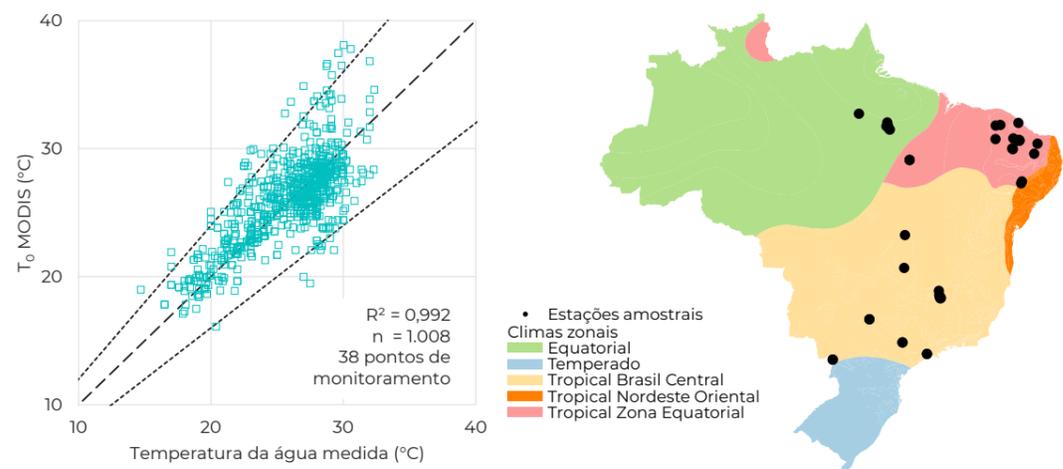
Sobradinho - com área alagada de cerca de 4.200 km², engloba 2.792 píxeis 100% em água. As séries diárias de temperatura representam a média entre as medianas das leituras do dia e da noite.

Entre 2002 e 2019 (6.362 dias), 85,9% das estimativas diárias foram obtidas diretamente, 11,4% necessitaram de preenchimento subdiário (ausência da leitura do dia ou da noite) e 2,7% necessitaram de preenchimento diário (ausência de ambas as leituras, em todos os píxeis).

Rio Verde: embora seja um lago de médio porte (5,6 km²), não possui nenhum pixel com 100% de água. A temperatura é obtida a partir dos 27 píxeis mistos, que possuem diferentes proporções de água, e dos 29 píxeis secos do entorno.

Entre 2002 e 2019 (6.362 dias), 46,9% das estimativas diárias foram obtidas diretamente, 29,5% necessitaram de preenchimento subdiário (ausência da leitura do dia ou da noite) e 23,6% necessitaram de preenchimento diário (ausência de ambas as leituras, em todos os píxeis).

Correlação de valores medidos de temperatura da água com os estimados pelo MODIS e localização dos pontos de monitoramento adotados



Confluência do rio Paranapanema, a jusante da UHE Canoas I, com o rio das Cinzas - entre Santa Mariana (PR) e Cândido Mota (SP)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA

Meteorologia

O método de estimativa de evaporação do lago adotado requer informações de **velocidade do vento** (u), **temperatura do ar** (T_a), **pressão de vapor no ar** (e_a) e **irradiância solar incidente** na superfície (R_s). A rede meteorológica nacional operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET é a principal fonte desses dados.

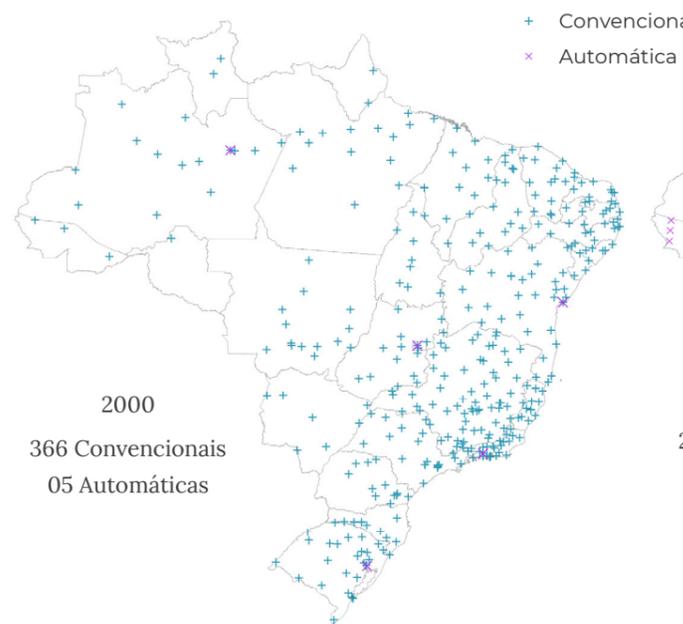
Os dados da rede devem ser cautelosamente analisados para lidar com inconsistências, descontinuidades e falhas nos dados. Deve-se considerar ainda a variação da densidade de estações (no território e ao longo do tempo). Mesmo em regiões com melhor densidade e poucas falhas, a interpolação espacial simples de dados entre estações pode introduzir erros relevantes por não captar características locais, como relevo e altitude.

Em complementação às redes meteorológicas e com objetivo de disponibilizar séries temporais consistentes, os **produtos de reanálises climáticas** têm

gerado interesse cada vez maior ao combinar uma ampla variedade de dados observados em superfície ou detectados remotamente dentro de um modelo numérico dinâmico de base física (Tarek et al., 2020). Com isso, as reanálises fornecem séries consistentes das variáveis climáticas essenciais (*essential climate variables* - ECVs) e buscam garantir a consistência e coerência na representação dos principais ciclos do sistema terrestre (como água e energia) (Hersbach et al., 2020). Por outro lado, esses produtos precisam passar por análises de consistência para eventual correção de viés introduzido pelos modelos de representação do sistema terrestre e de assimilação e previsão do tempo.

Dentre as fontes disponíveis, ou seja, **as estações meteorológicas** (INMET) e os **produtos de reanálise**, buscou-se o máximo aproveitamento de dados consistentes. Inicialmente, foi feita uma avaliação de cobertura espacial e temporal das estações, considerando as variáveis de interesse (u , T_a , e_a e R_s). Pos-

Rede INMET em 2000



2000
366 Convencionais
05 Automáticas

Rede INMET em 2020



2020
201 Convencionais
588 Automáticas

Nota: A rede meteorológica brasileira tem passado por um processo de atualização a partir da desativação de estações convencionais e substituição por equipamentos que realizam a coleta automática. 133 locais de monitoramento já operaram (e 79 ainda operam) com estações convencionais e automáticas que registraram dados de modo simultâneo com diferenças metodológicas nas formas de aquisição, frequência de leitura e equipamentos utilizados.

Características dos produtos de reanálise avaliados

	ERA5	GLDAS 2.1	MERRA-2
Fornecedor	ECMWF	NASA GES DISC	NASA GMAO
Período disponível	1979 - presente	2000 - presente	1980 - presente
Variáveis analisadas	Componentes u' e v (10m) para cálculo da velocidade do vento, e _a obtida a partir da temperatura do ponto de orvalho, temperatura média do ar e irradiância solar incidente	Velocidade do vento (10m) e temperatura média do ar	Componentes u' e v (2m) para cálculo da velocidade do vento
Resolução Temporal	1h	3h	3h
Resolução Espacial	0,25° x 0,25°	0,25° x 0,25°	0,5° x 0,625°
Referência	CCCS, 2017	Beaudoing e Rodell, 2020	Gelaro et al., 2017

Nota: u' é a componente zonal do vento (longitudinal) e v é a componente meridional (latitudinal).

Siglas: ERA5 (CCCS, 2017), fornecido pela European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Copernicus Climate Change Service (CCCS), Global Land Data Assimilation System 2.1 (GLDAS 2.1) (BEAUDOING e RODSELL, 2020), fornecido pela Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) da National Aeronautics and Space Administration (NASA), Modern-ERA Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA-2) (GELARO et al., 2017), fornecido pelo Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) da NASA.

teriormente, os dados consistidos de estações foram utilizados para avaliar a acurácia dos produtos de reanálise (ERA 5, GLDAS 2.1 e MERRA-2), adotando-se base diária no período comum de dados - 2000 a 2018.

Como conclusão das análises, o método adota dados pós-processados das **615 estações automáticas** do INMET, quando há dados consistidos. Para preenchimento de falhas diárias e para o período anterior à operação, criou-se uma **estação virtual no mesmo local da estação automática**, cujos dados são oriundos do **ERA5** corrigidos pelo viés observado entre estação automática e séries brutas do ERA5 no período comum de dados. Com as séries diárias completas por estação entre 1979 e 2019 (automática + virtual), procede-se à interpolação espacial para os locais dos reservatórios. Os itens a seguir detalham as principais análises realizadas.

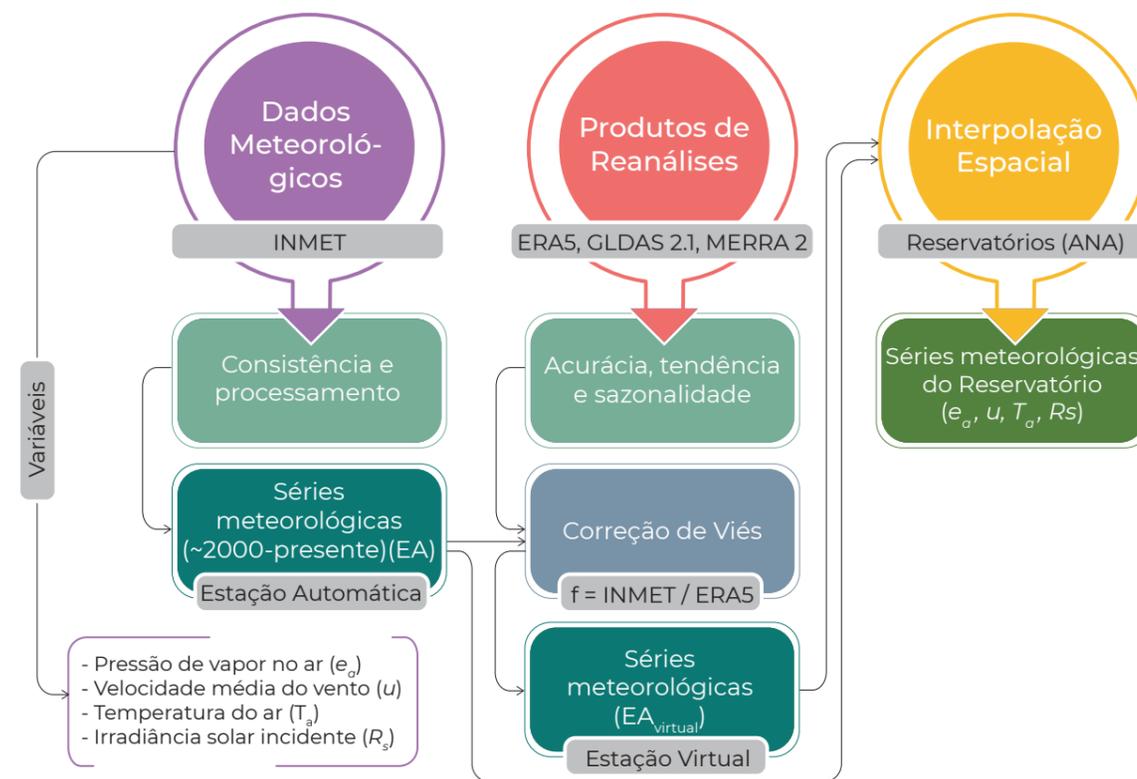
Consistência da rede meteorológica

Os dados da rede INMET são disponibilizados sem consistência (dados brutos). As estações convencionais adquirem dados de variáveis meteorológicas três vezes ao dia (00:00, 12:00 e 18:00 UTC), enquanto as estações automáticas disponibilizam dados integralizados em resolução horária. Para a análise realizada, todos os dados foram convertidos em valores médios diários.

As séries meteorológicas monitoradas em estações automáticas do INMET foram consistidas aplicando limites mínimos e máximos para os dados de velocidade do vento, pressão de vapor no ar, temperatura do ar e irradiância solar incidente, além de outros critérios de consistência implementados para detectar e corrigir erros sistemáticos frequentes identificados no processo de avaliação e análise de consistência das séries.

Como forma de ampliação da disponibilidade temporal de dados nos locais com monitoramento au-

Síntese das etapas de trabalho para obtenção de dados meteorológicos



tomático, as séries foram preenchidas e estendidas a partir da combinação dos dados observados disponíveis e os produtos do ERA5.

A aplicação automática deste conjunto de regras implementadas e o preenchimento de falhas realizado em escala diária elimina grande parte das inconsistências detectadas nas séries (como valores espúrios devido a falha de equipamentos) e contorna muitos problemas decorrentes de falhas de observação de variáveis específicas.

Cabe ressaltar que para o cálculo da pressão de vapor d'água no ar (e_a) para as estações, utilizou-se a equação recomendada em FAO (2012), sendo obtida a partir da temperatura de ponto de orvalho (T_{dew}) em °C, conforme a equação:

$$e_a = e^o(T_{dew}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T_{dew}}{T_{dew} + 237,3} \right] \quad (2.26)$$

Onde:

e_a é a pressão de vapor atual (kPa);

e° é a pressão de saturação de vapor na temperatura do ponto de orvalho (T_{dew}) (kPa).

Para a conversão dos dados observados de velocidade

de do vento a 10 m para 2 m foi adotada a equação proposta em Allen et al. (1998) a partir de um ajuste logarítmico do gradiente de vento em altura e utilizando como fator de correção um coeficiente de rugosidade para uma superfície de grama curta:

$$u_z = u_{10} \frac{4,87}{\ln(67,8z) - 5,42} \quad (2.27)$$

$$u_z = u_{10} \frac{4,87}{\ln(67,8 \times 10) - 5,42} = 0,74795u_{10}$$

onde:

u_z é a velocidade do vento a 2 m da superfície (m s⁻¹);

z é a altura base da medição (z = 10 m).

Como forma de avaliação da similaridade entre os dados das estações meteorológicas automáticas e convencionais, realizou-se uma análise estatística comparativa das séries de dados das variáveis meteorológicas (u, T_a, e_a e R_s) em escala diária para os locais monitorados de maneira síncrona, totalizando 266 estações (133 locais de registros simultâneo em estações automáticas e convencionais), para todo o período comum de dados entre 2000 e 2019. Das 266 estações analisadas, 158 estações, ou seja, 79 locais

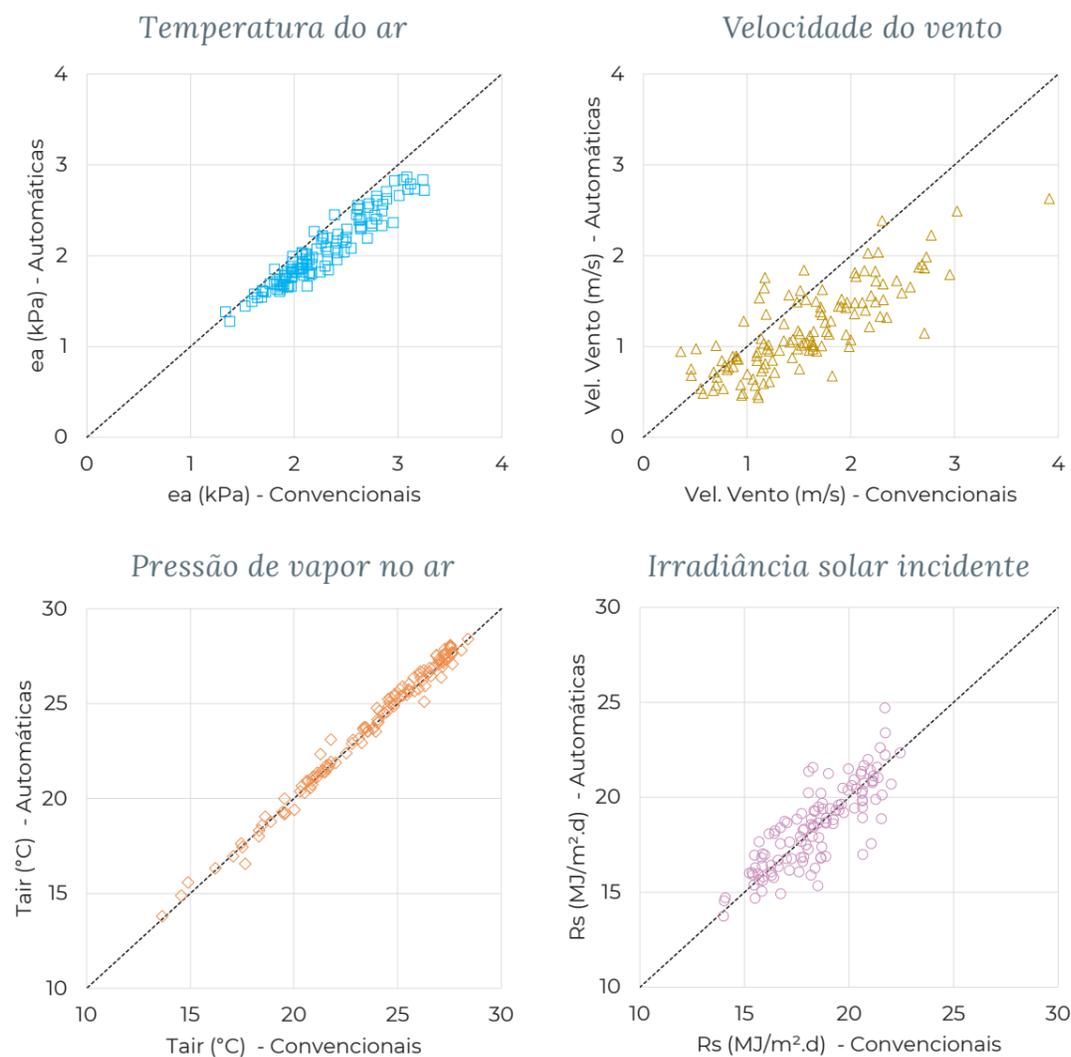
de monitoramento, encontravam-se em operação simultânea até 2019. Utilizou-se para comparação das séries os valores mínimos, médios, máximos, intervalo de medição e desvio-padrão, além dos parâmetros de ajuste obtidos por meio de uma regressão linear entre os pares de estações, visando identificar possíveis tendências, ajustes e/ou discordâncias entre as séries obtidas nas estações convencionais e automáticas.

De maneira geral, as estações convencionais apresentam valores de u e e_a médios superiores aos das estações automáticas. Além disso, há diferenças significativas entre as séries de pressão de vapor d'água

no ar (e_a) obtidas pelas convencionais e automáticas.

Dadas as diferenças observadas entre as séries e devido ao processo paulatino de substituição das estações convencionais pelas estações automáticas, visando uma homogeneidade das séries para estimativas futuras e a coerência em termos de método de coleta, registro e pré-processamento de dados brutos (por exemplo, o método de integralização das médias diárias), optou-se por descartar a utilização da rede convencional para o cálculo da evaporação de lago, mantendo, portanto, **apenas a rede de estações automáticas**. A densidade de estações/dados é compatível com o período analisado (2001-2019).

Médias das séries meteorológicas para estações convencionais e automáticas no mesmo local (266)



Acurácia dos produtos de reanálises

Para análise de acurácia, foram utilizadas as séries disponíveis em 261 estações automáticas com pelo menos 48 meses de dados em escala diária entre 2000 e 2018. A análise foi realizada frente aos principais produtos de reanálise atualmente disponíveis: ERA5, GLDAS 2.1 e MERRA-2. Outros produtos considerados inicialmente (TerraClimate, GWA 3.0, FLDAS, JRA-55, GLS, R1, dentre outros) foram descartados principalmente pela resolução temporal e espacial limitadas; e pela extensão das séries incompatíveis com a aplicação aqui proposta.

A performance dos dados obtidos nos três produtos de reanálise teve o objetivo de indicar se os dados são consistentes com relação aos dados observados a partir dos seguintes critérios de qualidade do ajuste: erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio normalizada (NRMSE), coeficiente de correlação de Pearson (r) e Viés (Bias):

O MAE indica a diferença média absoluta entre os dois conjuntos de dados, sendo que o valor é dado na mesma unidade dos conjuntos avaliados. O NRMSE, isto é, o RMSE normalizado pela diferença entre os valores máximos e mínimos do conjunto de dados observados, é mais apropriado para representação da performance de modelos do que o MAE pois atribui um maior peso para desvios maiores. O valor é sempre positivo e um valor igual a zero indica o ajuste perfeito.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) indica o grau de correlação entre os dois conjuntos de dados avaliando a capacidade do modelo de simular a variância dos dados observados sendo representado por

valores entre -1 e 1, onde 1 indica o ajuste perfeito, sendo que, em geral, para uma relação linear positiva adota-se $r < 0,5$ como ajuste fraco, moderado entre 0,5 e 0,7 e forte para valores de $r > 0,7$.

O Viés (Bias) avalia a tendência que a média dos valores dos produtos de reanálise possuem em relação aos dados observados - zero indica o ajuste ótimo.

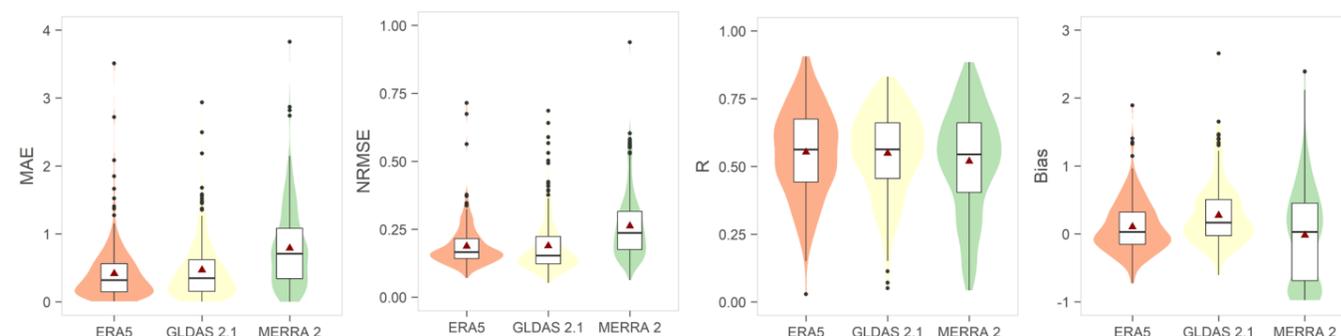
Considerando os valores de velocidade do vento a 2 m (u), o ERA5 apresenta uma melhor performance ao representar as séries observadas com os melhores ajustes dado os valores médios de MAE, NRMSE, R e Viés em comparação ao GLDAS 2.1 e ao MERRA-2, descartando-se o último das análises subsequentes devido ao fraco desempenho.

Considerando a temperatura média do ar (T_{air}), ERA5 e GLDAS 2.1 performaram razoavelmente bem. Para ambos os produtos, os desvios médios ficaram próximos ao zero, sendo positivo para o ERA5 (2%) e negativo para o GLDAS (-3%).

Considerando o desempenho nas primeiras variáveis, disponibilidade de dados e o maior período de cobertura temporal do ERA5 (desde 1979) em relação ao GLDAS (2000), procedeu-se à análise apenas do ERA5 para a pressão de vapor no ar (e_a) e irradiância solar incidente (R_s). Os resultados mostram boa aderência no primeiro caso (e_a), com distribuição do viés próxima a 0; e ajuste moderado no caso de R_s .

Dessa forma, o **ERA5 demonstrou ser o melhor produto** para preenchimento de falhas no local das estações automáticas, assim como para obter uma série

Violin-plot dos índices de qualidade entre dados observados e produtos de reanálises - velocidade do vento



de dados anterior ao início da operação da estação. Por outro lado, para lidar com as limitações observadas e compatibilizar as séries, procedeu-se com a correção linear de viés (Teutschbein & Seibert, 2012) nas séries do ERA5, realizada para cada estação (automática/virtual) e variável.

O método é relativamente simples e prevê a correção dos valores de uma determinada variável a partir das diferenças entre os valores observados e os simulados. As séries simuladas corrigidas terão concordância em termos de viés e médias mensais com as séries observadas, sendo definido um único fator (f) para cada uma das 615 estações automáticas no período de dados em comum com a reanálise, conforme a equação

$$Z_{rc}^*(d) = Z_{rc}(d) \left[\frac{\mu_m(Z_{obs}(d))}{\mu_m(Z_{rc}(d))} \right] \quad (2.28)$$

onde:

Z é a variável meteorológica em análise;

* é a série da variável Z com a correção de viés;

μ_m é a média diária da série observada, em escala diária (d);

rc é a indicação da série do produto de reanálise;

obs é a indicação da série observada.

Os mapas sintetizam a correção aplicada aos dados do ERA5, por variável, em cada estação virtual (que corresponde a uma estação automática).

Interpolação para os reservatórios

Com as séries diárias (1979-2019) completas nos pontos das estações automáticas/virtuais, os valores médios das quatro variáveis foram determinados a partir da menor distância entre as estações e a borda do lago utilizando-se o *Inverse Distance Weighting* (IDW). De maneira simplificada, o IDW é um interpolador espacial determinístico que visa estimar um valor desconhecido em um ponto qualquer (x^*) a partir de valores conhecidos (x_n) e ponderados de acordo com a distância, conforme as equações:

$$x^* = \frac{(w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \dots + w_n x_n)}{(w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n)} \quad e \quad w_i = \frac{1}{d_{ix}^p} \quad (2.29) \quad (2.30)$$

onde:

x^* é o valor de uma determinada variável a ser determinado;

w é o peso;

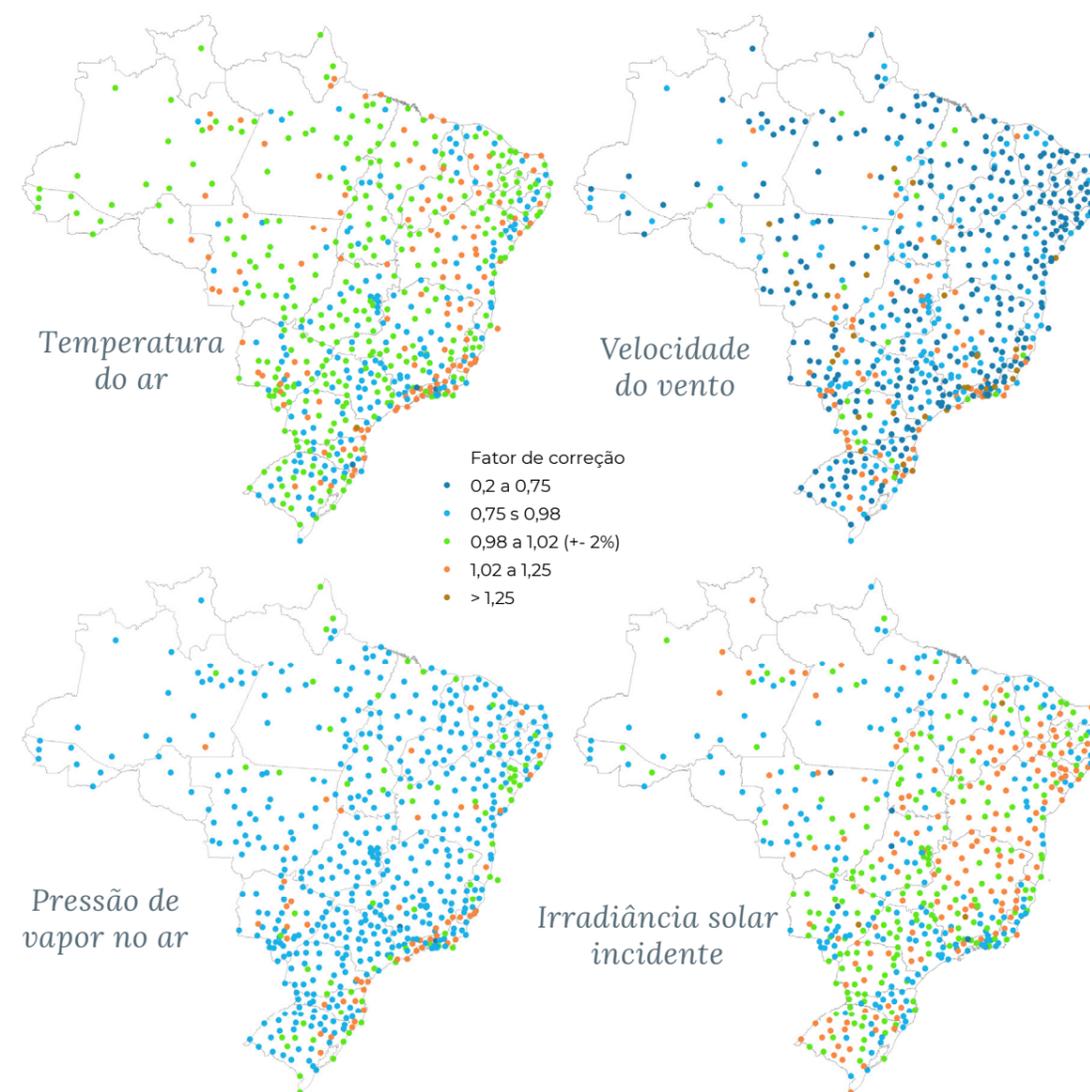
x é o valor conhecido desta variável;

d é a distância métrica entre os pontos considerados;

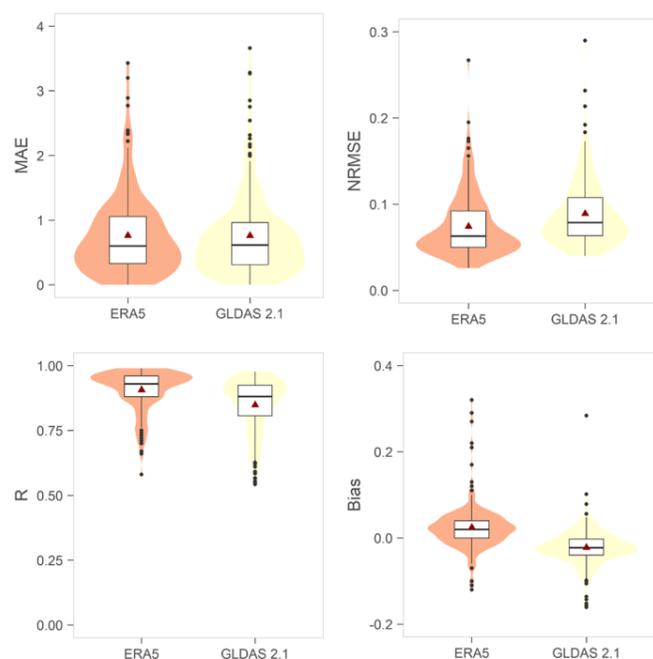
P é a variável que indica a potência adotada (P = 2).

A interpolação espacial é necessária tanto para cobrir lacunas de monitoramento próximo ao reservatório (para 60% da área de reservatórios a estação mais próxima está a mais de 10 km), quanto para minimizar incertezas nos maiores reservatórios – pois mesmo quando há mais de uma estação próxima, essas podem não representar as características médias de toda a superfície evaporante (com centenas a milhares de km²). O IDW aumenta o peso de estações próximas e minimiza o peso das mais distantes no cálculo dos valores médios. A busca é limitada a 100 km quando existem pelo menos duas estações nesse raio. Caso contrário, adota-se um raio de 250 km, o que só se aplica a poucos reservatórios.

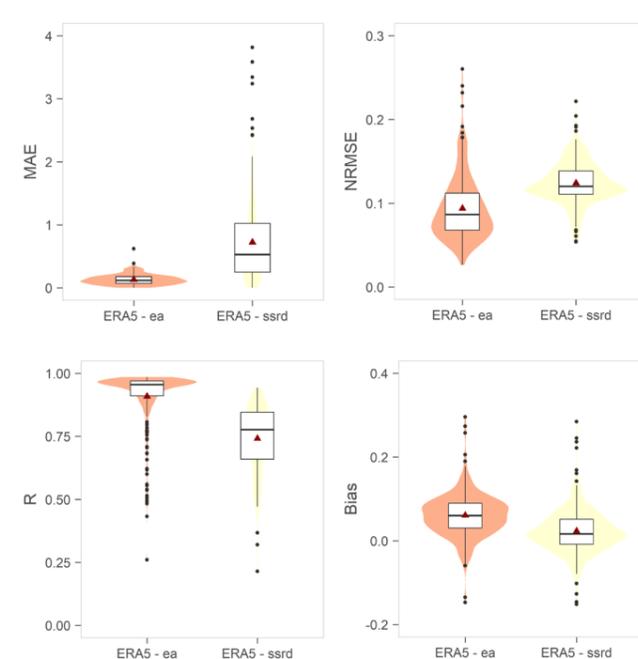
Fatores de correção de viés das séries do ERA5 nas estações virtuais



Violin-plot dos índices de qualidade entre dados observados e produtos de reanálises - temperatura do ar



Violin-plot dos índices de qualidade entre dados observados e ERA5 - pressão de vapor no ar e irradiância solar incidente



Evapotranspiração Real

A evapotranspiração compreende tanto a evaporação da água contida na superfície do solo e da vegetação quanto a transpiração das plantas, ou seja, representa o total de água transferida da superfície terrestre para a atmosfera. Devido ao estado gasoso da água, a evapotranspiração é difícil de ser estimada e até mesmo de ser medida em campo, permanecendo como **um dos grandes desafios em hidrologia**.

Para a estimativa da evaporação líquida, **a evapotranspiração real (E_R) é aquela que ocorreria na área da massa d'água artificial caso ela não existisse**. Assim, é indispensável que a evapotranspiração seja estimada para as mesmas condições locais presentes nas proximidades do reservatório. No Brasil, medições diretas locais desta natureza ainda são raras.

O método atual adotado nos programas SisEvapo/ONS e WREVAP/ANA baseia-se na relação de complementaridade do modelo CRAE (Complementary Relationship Areal Evapotranspiration) (Morton, 1983a), onde a evapotranspiração real é estimada indiretamente pela relação complementar entre a evapotranspiração que ocorreria em condições meteorológicas em que o solo/superfície esteja saturado (ET_{wet}) e a evapotranspiração potencial que ocorreria sobre as condições meteorológicas predominantes se apenas a energia disponível fosse o fator limitante (ET_{pot}). Apesar das incertezas associadas, esse método foi aplicado em condições de ausência de dados, mas não se justifica com a disponibilidade atual de

produtos e técnicas de estimativas de evapotranspiração real.

Nesse contexto, destaca-se a potencialidade do emprego das estimativas de E_R que utilizam **dados de sensores orbitais**, por permitirem a obtenção de séries espacialmente distribuídas. **Foram avaliados quatro produtos de evapotranspiração real** que utilizam dados provenientes de sensores orbitais e que apresentam resultados de forma espacialmente distribuída em grades que abrangem todo o território brasileiro: GLEAM v3.3a, GLEAM v3.3b, SSEBop Global e MODIS (MOD16A2GF).

O **GLEAM** (Global Land Evaporation Amsterdam Model) é a estimativa desenvolvida por Miralles et al. (2011) e Martens et al. (2017). São disponibilizados dois conjuntos de dados. O v3a usa dados de satélite para umidade do solo e umidade da vegetação; dados meteorológicos de irradiância e temperatura são de produtos de reanálise, enquanto a precipitação é um produto híbrido (MSWEP - Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation). O v3b utiliza somente dados de sensores orbitais para a alimentação do modelo. O GLEAM utiliza o método de Priestley e Taylor (1972) no cálculo da Evapotranspiração Potencial (ET_{pot}) e calcula a evapotranspiração real como a soma da transpiração do dossel, evaporação do solo e em corpos hídricos, perda de interceptação e sublimação. Dados são disponibilizados em www.gleam.eu.

O modelo **SSEBop** (Operational Simplified Surface Energy Balance) utiliza uma versão simplificada da equação do balanço de energia para estimativa de E_R (Senay et al., 2013), mantendo as principais premissas descritas nos modelos SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land (Bastiaanssen et al., 1998) e METRIC - Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (Allen et al., 2007). Tanto o SEBAL quanto o METRIC assumem que a diferença de temperatura entre a superfície da terra e o ar (diferença de temperatura próximo à superfície) varia linearmente conforme a temperatura de superfície da terra. Ambos os modelos estabelecem essa relação ancorados no conceito de pixel quente e pixel frio, sendo o quente amostrado em uma superfície de solo nu e seco e o frio em área bem vegetada e úmida. Assim, tais métodos baseiam-se na relação linear entre a diferença de temperatura do ar próxima à superfície e a temperatura da su-

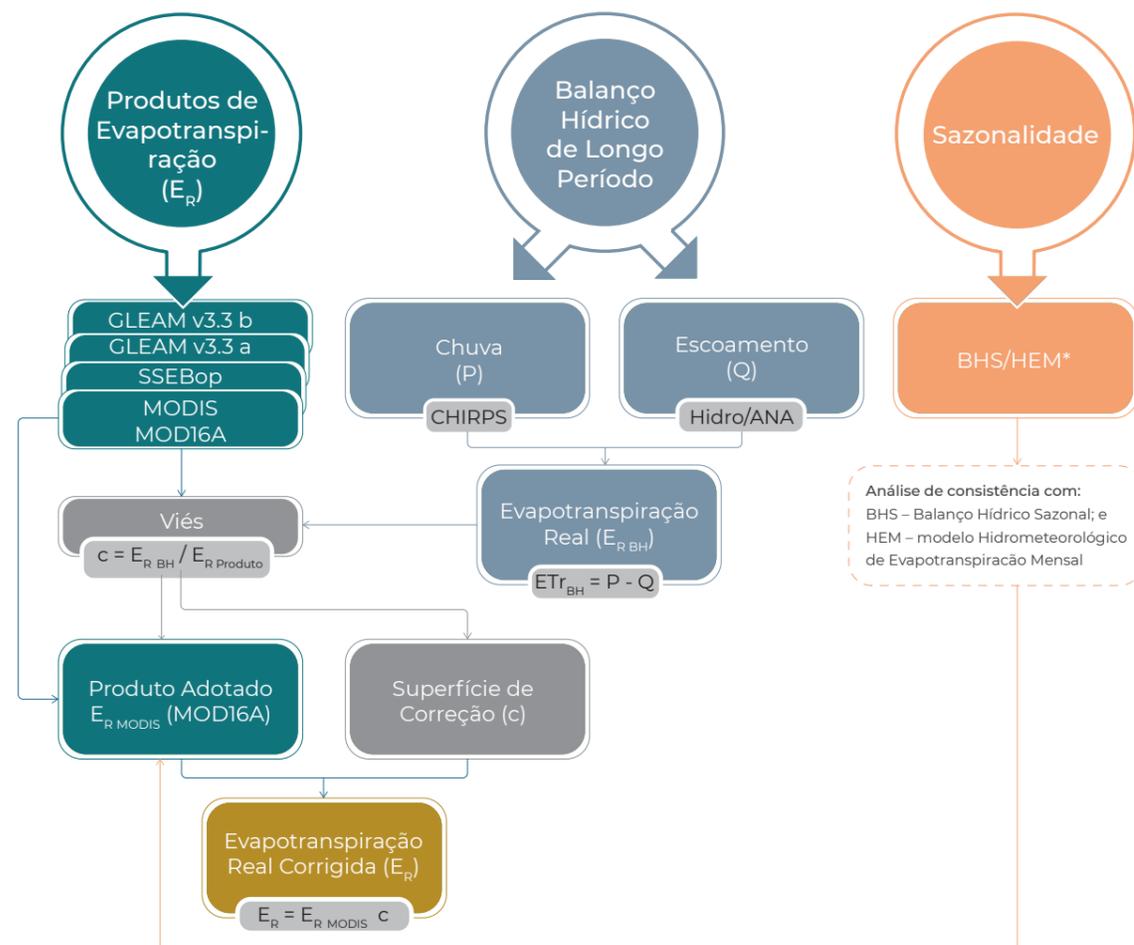
perfície para estimar o fluxo de calor sensível (H), supondo que no pixel quente não há fluxo de calor latente ($E_R = 0$) e no pixel frio o valor de E_R atinge seu máximo (E_R próxima à evapotranspiração potencial). O SSEBop Global analisado utiliza o produto de temperatura superficial do MODIS e pode ser acessado em <https://earlywarning.usgs.gov/ssebop>.

O produto MOD16A do **MODIS** (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) é a estimativa realizada pelo algoritmo de Mu et al. (2011), baseado na equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965; Penman, 1948) e que utiliza entradas de sensoriamento remoto derivadas do MODIS incluindo a classificação de cobertura da terra, índice de área foliar, fração de radiação fotossinteticamente ativa e albedo. Os dados meteorológicos utilizados são a irradiância incidente de ondas curtas, temperatura do ar e umidade específica provenientes do Modern-ERA Retrospec-

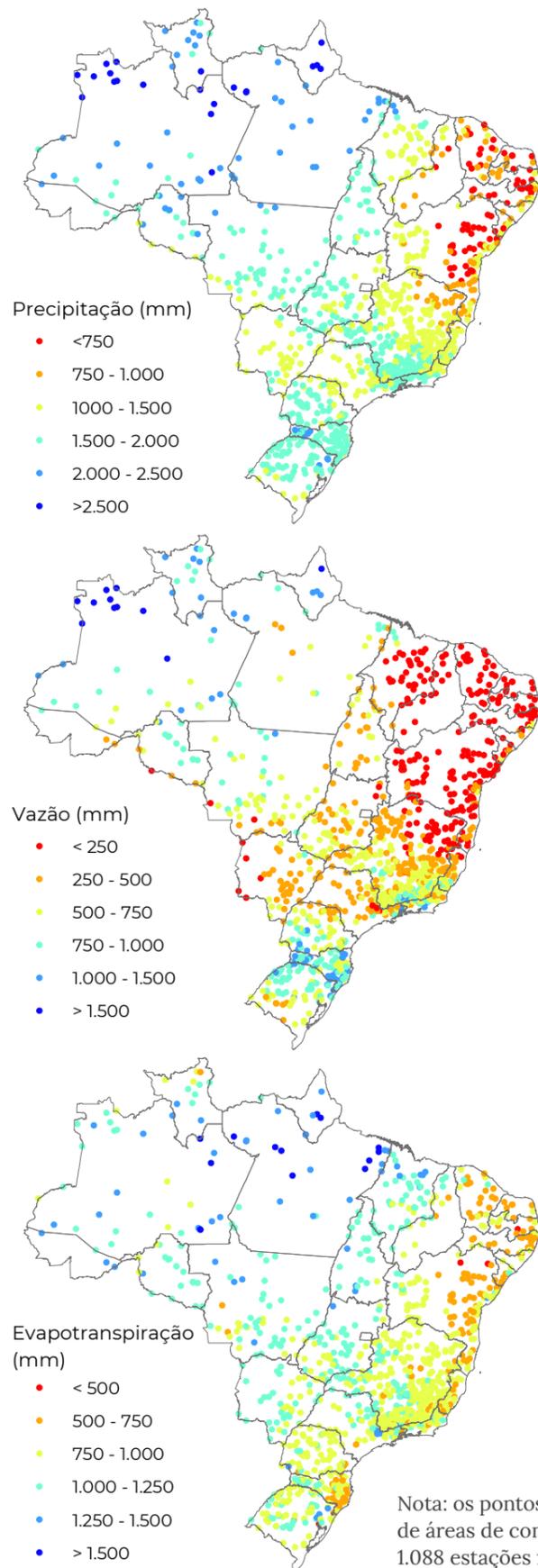
Características dos produtos de evapotranspiração avaliados

PRODUTO	RESOLUÇÃO		DISPONIBILIDADE		ATUALIZAÇÃO
	Espacial	Temporal	Início	Fim	
SSEBop (USGS)	1000 m	decendial	2003	fev/21	12 dias
MODIS (MOD16A2GF)	500 m	8 dias	2000	dez/2019	Anual
GLEAM v3.3 a	25 km	diário	1980	dez/18	Anual
GLEAM v3.3 b	25 km	diário	2003	dez/18	Anual

Síntese das etapas de trabalho para obtenção da evapotranspiração real



Componentes do balanço hídrico de longo período - média anual 2003-2015



Nota: os pontos representam os exutórios de áreas de contribuição hidrográfica de 1.088 estações fluviométricas

tive Analysis for Research and Applications (MERRA). Diferentemente do modelo SSEBop, o MOD16A considera de forma separada a evaporação da superfície do solo e das plantas por meio de balanço de energia distinto. A versão MOD16A2GF é o produto disponibilizado anualmente em que todas as falhas provenientes de erros ou baixa qualidade nos dados de entrada são preenchidas. Dados e documentação estão disponíveis em <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2gfv006/>.

Os quatro produtos foram avaliados quanto à resolução espacial e temporal e quanto à capacidade de reproduzir a evapotranspiração (anual e mensal). As etapas de análise são detalhadas a seguir.

Para análise da evapotranspiração média anual foi adotado o período comum de disponibilidade dos produtos (2003-2015) com a **evapotranspiração real calculada por balanço hídrico em 1.088 áreas de contribuição hidrográfica** ($E_{R_{BH}} = P - Q$), que correspondem aos exutórios de estações fluviométricas com pelo menos três anos consecutivos de dados, sem falhas. Os dados de vazão (Q) são oriundos do Hidroweb/ANA e foram consistidos pela ANA. Os dados de precipitação (P) foram derivados do *Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations - CHIRPS 2.0* (Funk et al., 2015) por apresentar o melhor desempenho dentre 10 produtos de chuva avaliados no Brasil para o Atlas Irrigação (ANA, 2021). Foram utilizadas médias anuais de longo período, permitindo a desconsideração da variação no armazenamento na bacia hidrográfica ($\Delta S = 0$).

Como resultado das análises, os produtos GLEAM apresentaram, de forma geral, tendência de superestimar a evapotranspiração, sobretudo na bacia amazônica e no litoral do Brasil. Além disso, apresentam valores quase homogêneos para grande número de bacias – possivelmente como influência da menor resolução espacial (25 km) e consequente incapacidade de representar variações distribuídas no entorno de reservatórios, individualmente.

Os produtos MODIS e SSEBop Global apresentaram regiões com dispersões importantes nos valores de E_R média anual em relação ao balanço hídrico, mas

se destacaram por apresentar escala espacial (500 m e 1 km, respectivamente) que permite identificar maior variabilidade entre as bacias hidrográficas, representando de forma mais efetiva a heterogeneidade da E_R no entorno de massas d'água. Com correção do viés, ambos os modelos se mostram capazes de retratar adequadamente a magnitude da E_R .

A distribuição mensal da E_R foi analisada pela comparação dos quatro produtos com resultados de 10 bacias aplicando o método do Balanço Hídrico Sazonal (BHS) ajustado pelo modelo Hidrometeorológico de Evapotranspiração Mensal (HEM), ambos desenvolvidos por Dias e Kan (1999).

O BHS (2.31) foi utilizado para a estimativa inicial de E_R ao longo do período entre recessões nas séries diárias de vazão. Essa estimativa foi então distribuída de forma mensal e ajustada, com apoio de dados meteorológicos, no modelo HEM (2.32), para obter a série mensal de E_R .

$$\bar{E}_{R_i} = \bar{P} - \bar{Q} - (Q_{fTr} - Q_{iTr}) / \Delta t \quad (2.31)$$

onde:

Tr é a constante de recessão;

Q_i e Q_f são as vazões inicial e final do período Δt .

O HEM é altamente dependente da disponibilidade e qualidade dos dados meteorológicos. Portanto, a equação (2.33) foi aplicada apenas como alternativa

quando os dados de déficit de pressão de vapor e irradiância líquida estavam indisponíveis. Para permitir uma comparação entre a distribuição sazonal da E_R dos produtos e a estimada pelo HEM sem o efeito do viés entre as diferentes séries, realizou-se a correção dos valores de E_R pela média de $(P - Q)$.

$$\bar{E}_{R_i} = c_0 + c_1 (\bar{P} - \bar{Q}) + c_2 (\bar{e}_s - \bar{e}_a) + c_3 (\bar{R}_l) \quad (2.32)$$

$$\bar{E}_{R_i} = c_0 + c_1 (\bar{P} - \bar{Q}) + c_2 (\bar{R}_s) \quad (2.33)$$

onde:

e_s é a pressão de vapor do ar saturado;

e_a é a pressão de vapor do ar;

R_l é a irradiância líquida;

R_s é a irradiância solar;

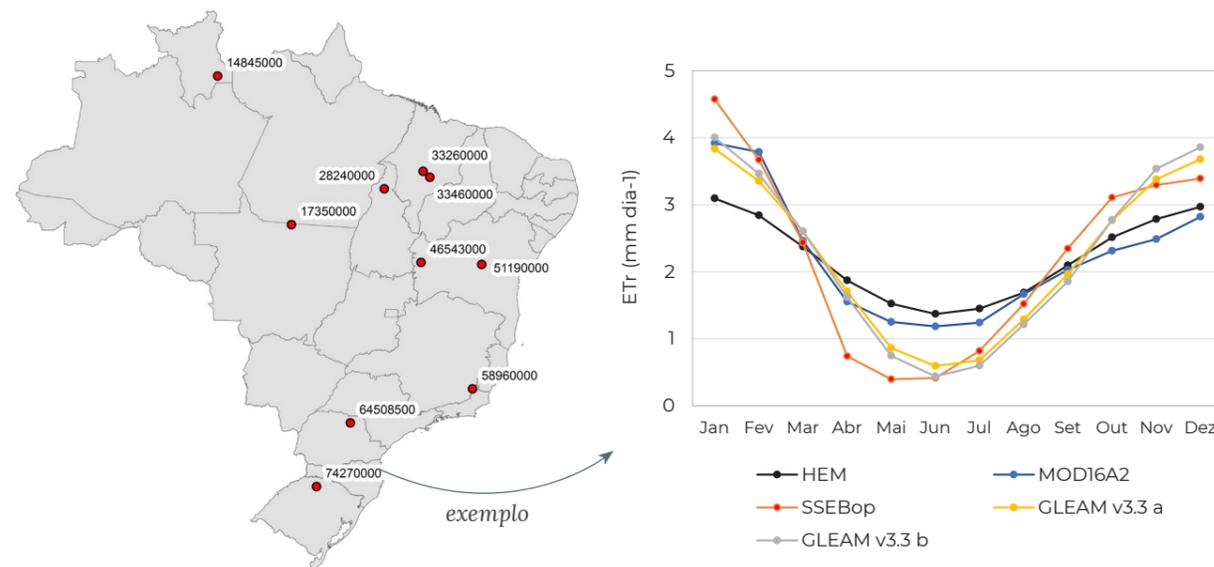
c_0, c_1, c_2 e c_3 são os coeficientes determinados pela regressão linear; e

a barra ($\bar{\quad}$) representa a média mensal das variáveis.

Todos os valores de P, Q e E_R utilizados na avaliação sazonal são apresentados em mm dia⁻¹, incluindo as médias mensais que são equivalentes aos valores diários, ou seja, o total de E_R do mês dividido pelo número de dias.

De forma geral, os quatro produtos apresentaram distribuição sazonal semelhante entre si e seguem a tendência geral da evapotranspiração do balanço hídrico estimada pelo HEM. O SSEBop Global apresentou menor sazonalidade em algumas bacias,

Avaliação sazonal da E_R com o HEM - estações fluviométricas selecionadas



discordando do HEM e dos demais modelos. De fato, esse tipo de modelo tem dificuldade de lidar com as estimativas em períodos de restrição de água no solo (seca contínua ou seca sazonal). O MODIS apresentou boa concordância com a sazonalidade obtida por balanço hídrico em todos os casos.

Com base nas análises de magnitude (E_r média anual) e sazonalidade (distribuição mensal) concluiu-se que **o produto do MODIS apresentou melhor desempenho em relação aos demais para reproduzir a evapotranspiração real no entorno dos reservatórios**, sendo o melhor indicador da E_r na ausência do lago.

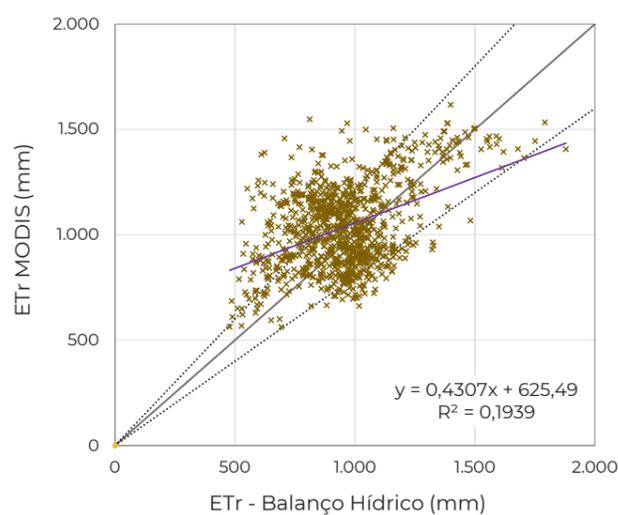
Cabe destacar que o produto MOD16A é formulado com base na equação de Penman-Monteith para cada componente principal da evapotranspiração: a evaporação da precipitação interceptada pela vegetação, a transpiração da vegetação e a evaporação da superfície do solo – o resultado final corresponde à soma dessas componentes em cada pixel. No processo de alocação de energia disponível por tipo de superfície, é identificada a fração coberta por vegetação e a presença de condições de umidade em que

a superfície do solo ou da vegetação esteja coberta de água. Com esses elementos, o algoritmo representa a complexidade dos processos de transferência da água da terra para a atmosfera melhor que os demais produtos analisados, considerando a heterogeneidade espacial e a variabilidade temporal.

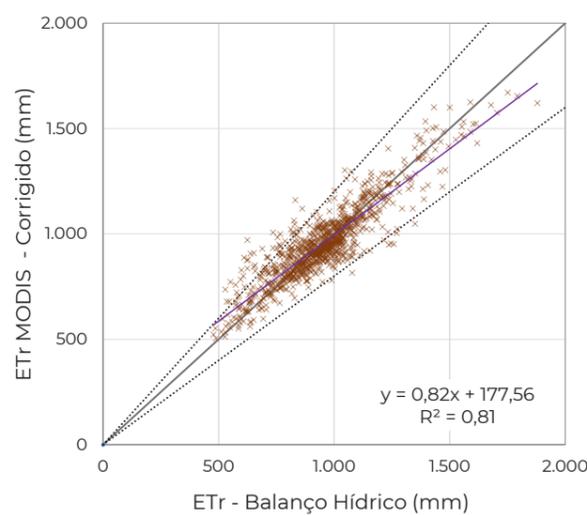
Os resultados também indicaram a necessidade de aplicar uma **superfície de correção de viés** da E_r proveniente do MODIS. A correção é derivada do balanço hídrico de longo período ($P - Q$) nas áreas incrementais às estações fluviométricas. Ou seja, em qualquer escala temporal, a evapotranspiração real final corresponde à evapotranspiração oriunda do produto MOD16A2GF multiplicada pela superfície de correção (c).

A correção de viés (c) foi empregada a fim de garantir a compatibilidade entre os valores de evapotranspiração utilizados para as massas d'água e as demais variáveis do balanço hídrico. A criação da superfície de correção foi realizada por *krigagem*, o que permitiu o ajuste aos dados sem criar picos isolados, caracterizando a tendência regional do viés.

Evapotranspiração estimada por balanço hídrico e pelo produto MODIS MOD16A2GF - antes (a) e depois (b) da correção de viés - em 1.088 estações

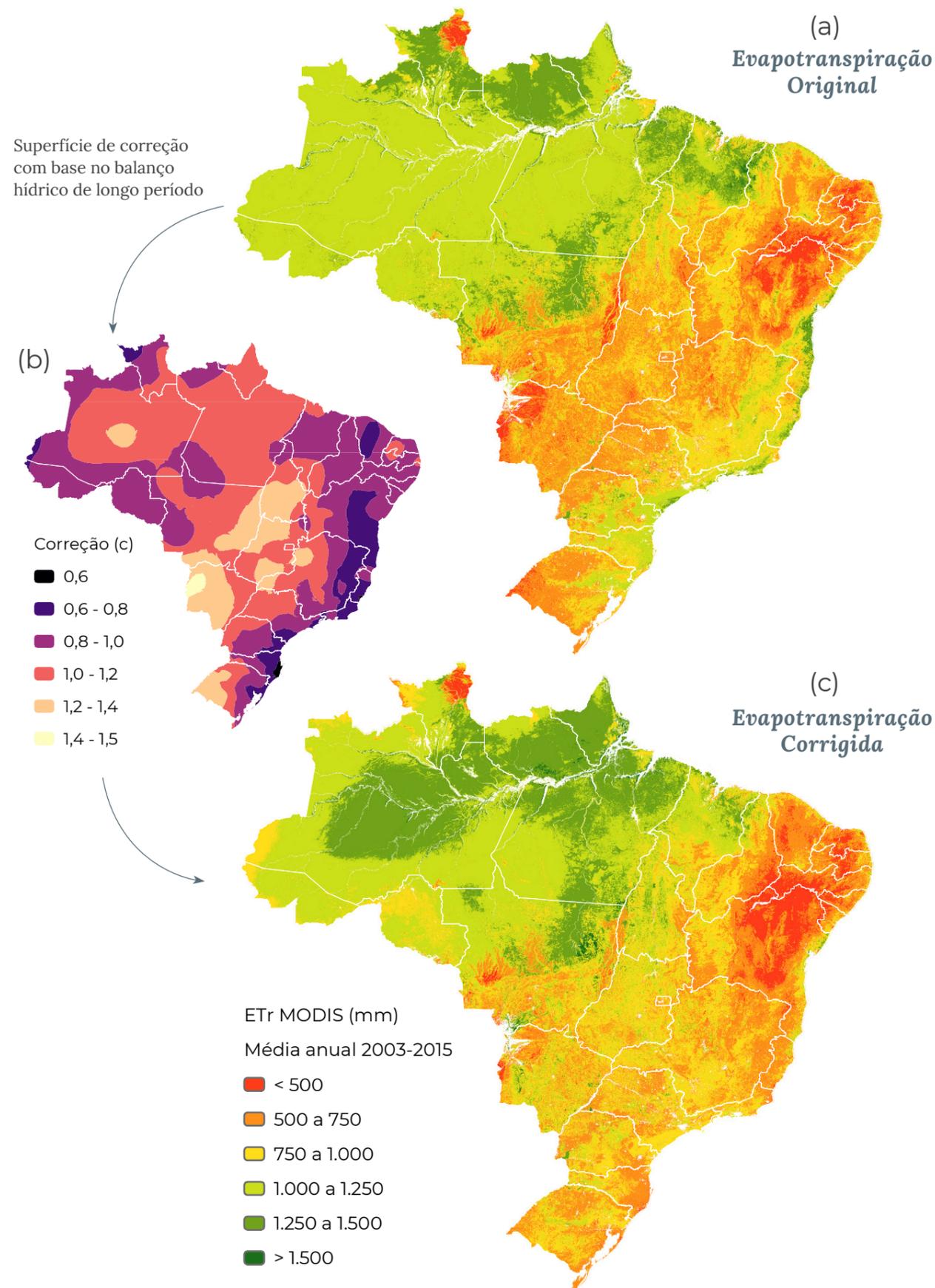


(a)



(b)

Evapotranspiração média anual estimada pelo produto MODIS MOD16A2GF - antes (a) e depois (c) da correção de viés (b)



(a)

Evapotranspiração Original

(b)

Superfície de correção com base no balanço hídrico de longo período

- Correção (c)
- 0,6
 - 0,6 - 0,8
 - 0,8 - 1,0
 - 1,0 - 1,2
 - 1,2 - 1,4
 - 1,4 - 1,5

(c)

Evapotranspiração Corrigida

- ETr MODIS (mm)
Média anual 2003-2015
- < 500
 - 500 a 750
 - 750 a 1.000
 - 1.000 a 1.250
 - 1.250 a 1.500
 - > 1.500



3 EVAPORAÇÃO LÍQUIDA NO BRASIL

Barragem da Usina Hidrelétrica Jaguará, no rio Grande, na divisa entre Rifaina (SP) e Sacramento (MG).
Raylton Alves / Banco de imagens ANA

Introdução

Inicialmente, cabe destacar que embora o Brasil conte atualmente com cerca de 175 mil reservatórios artificiais inventariados pela ANA (2020a), a superfície de água está concentrada em um número pequeno de reservatórios de maior porte. Os **30 maiores** lagos brasileiros (maiores que 300 km²) concentram **58% da área** (26,5 mil km²), e **os 10 maiores 38%** (17,3 mil km²).

Neste capítulo são adotados alguns recortes para a organização dos resultados. O **Grupo A** refere-se às massas d'água dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (**SIN**), com os maiores reservatórios e outros de menor porte interligados ao sistema operado pelo ONS (**157 lagos que totalizam 72% da área média**). Ou seja, os reservatórios inventariados não interligados ao SIN totalizam 28% da área.

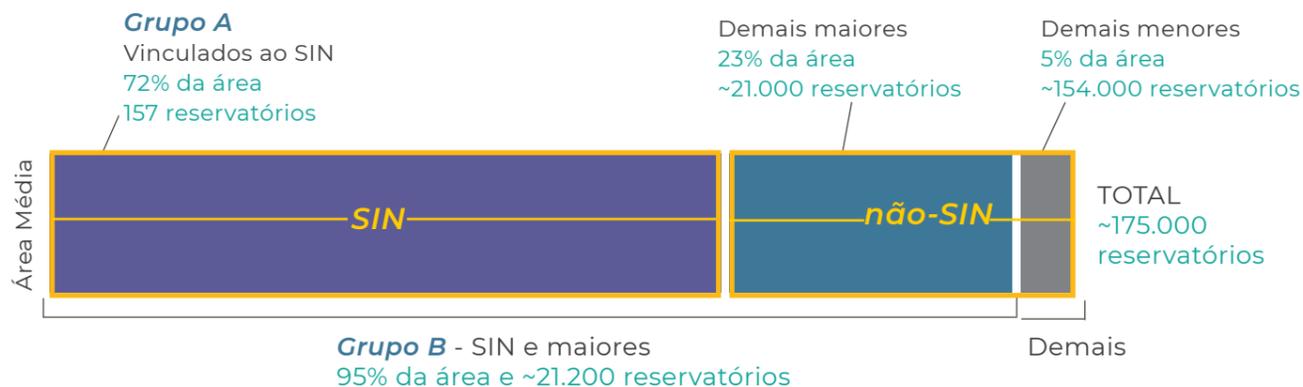
O **Grupo B** de análise soma ao Grupo A cerca de 21 mil reservatórios que, em conjunto, totalizam **95% da superfície média evaporante** – o que permite melhor análise e visualização dos resultados em ilustrações. Resultados totais, anuais e mensais, para o Brasil ou em recortes regionais, estarão sempre considerando 100% da superfície e todos os reservatórios inventariados.

O recorte temporal das análises vai de **2001 a 2019** – período com disponibilidade de medidas de temperatura do lago por produtos de sensoriamento remoto. Estimativas anteriores a 2001, necessárias, por exemplo, para os processos de reconstituição de vazões naturais, poderão ser obtidas a partir do processamento das séries mais recentes, que estarão detalhadas para os principais reservatórios do Brasil no portal do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – **SNIRH**.

O capítulo está organizado em dois blocos principais de análise – o primeiro sobre os resultados específicos (alturas) de evaporação líquida e de suas componentes (evaporação do lago e evapotranspiração real esperada no local). Os dados estão expressos em milímetros (1 mm corresponde a um litro por m²), médios anuais ou mensais. No segundo bloco, que aborda as vazões de evaporação líquida, são agregadas as informações sobre as áreas ocupadas e sua variação, com resultados expressos em m³/s com (1 m³ = 1.000 litros), também em escala média mensal ou anual.

Cabe ressaltar que percentuais ou relações de área referem-se àquelas médias ou mapeadas nos inventários, mas para a estimativa de vazão de evaporação líquida são adotadas as variações médias mensais observadas para a maior parte da superfície, conforme abordado no Capítulo 2.

Agrupamentos de análise dos resultados de evaporação líquida



Alturas de evaporação líquida

Os reservatórios integrantes do **Grupo A** (SIN) possuem um longo histórico de estudos hidrológicos e uma base de dados comparativamente mais consolidada que o conjunto dos demais reservatórios do País, sendo que **séries de evaporação líquida são de uso rotineiro no planejamento e gestão desses reservatórios**. Considerando esse histórico e também a distribuição espacial representativa da diversidade climática brasileira, os resultados obtidos são apresentados inicialmente para esse conjunto de reservatórios.

Devido às dimensões continentais e consequente diversidade climática do Brasil, os valores de evaporação de lago e de evapotranspiração real apresentam um comportamento parcialmente explicado pela variação de **latitude**. A evaporação de lago e a evapotranspiração real tendem a apresentar valores mais elevados próximos ao equador, refletindo basicamente a maior **quantidade de energia** disponível para ocorrência desses processos, que diminui em direção às latitudes mais baixas ou mais altas.

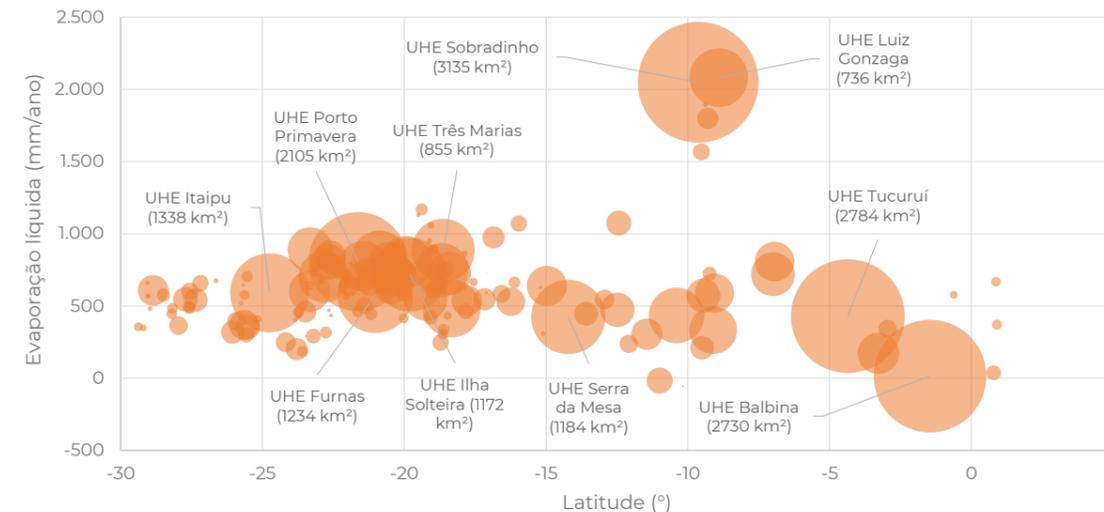
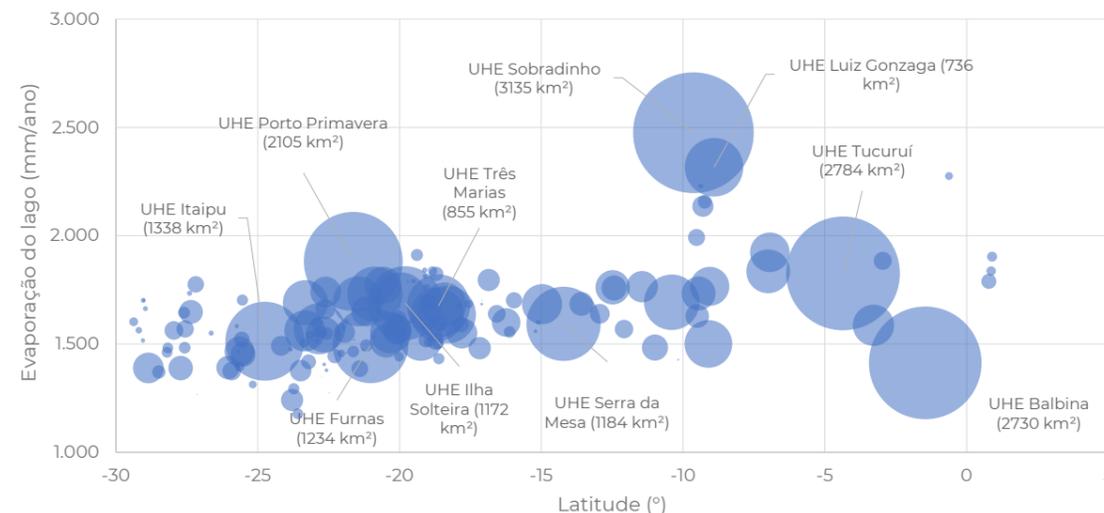
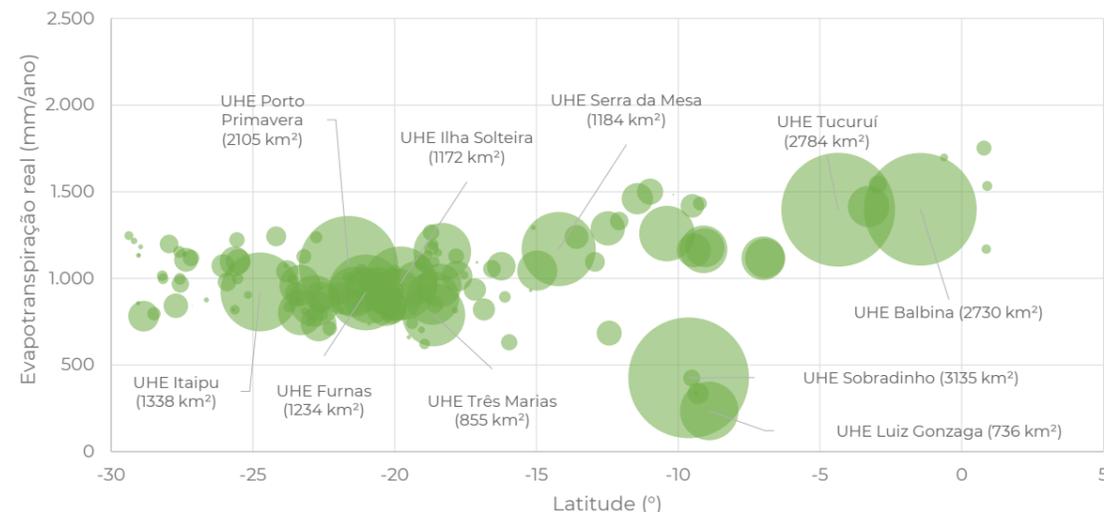
No entanto, nota-se em determinadas latitudes uma amplitude expressiva nos valores obtidos, refletindo a diversidade climática encontrada no País. Destaca-se nesse aspecto o Semiárido (~10° de latitude sul) com valores de evaporação de lago superiores a 2.000 mm/ano, de evapotranspiração real inferiores

a 500 mm/ano, consequentemente apresentando valores elevados de evaporação líquida.

A diversidade climática brasileira também é refletida nos distintos padrões sazonais (valores médios mensais) de evaporação de lago. Nesse aspecto, merece destaque a grande amplitude interanual dos valores mensais, podendo em alguns casos a variação para um mesmo mês ser superior a 100 mm ao longo do histórico recente (2001-2019). Essa amplitude dos valores históricos para um mesmo mês pode ser inclusive superior à própria sazonalidade mensal intranual, **reforçando a importância de estimativas baseadas nas séries históricas de dados observados no lugar de valores médios mensais históricos**.

A sazonalidade da evaporação líquida é bem mais acentuada que a da própria evaporação de lago. Esse comportamento de maior variabilidade temporal é esperado, pois a evaporação líquida é afetada igualmente pela evapotranspiração real, que depende, além das condições atmosféricas a exemplo da evaporação do lago, também e principalmente das condições de disponibilidade hídrica local. Ou seja, a evaporação líquida reflete, além das condições ambientais que controlam o processo de evaporação, também a dinâmica do regime pluviométrico e da capacidade de retenção de água no solo.

Valor médio anual das componentes e da evaporação líquida nos reservatórios do SIN - 2001-2019



Nota: as esferas variam proporcionalmente à área média do reservatório - os 10 maiores estão destacados. Os dados referem-se ao período 2001-2019, a partir da existência do lago (a média refletirá um período menor caso o lago tenha sido formado após 2001)

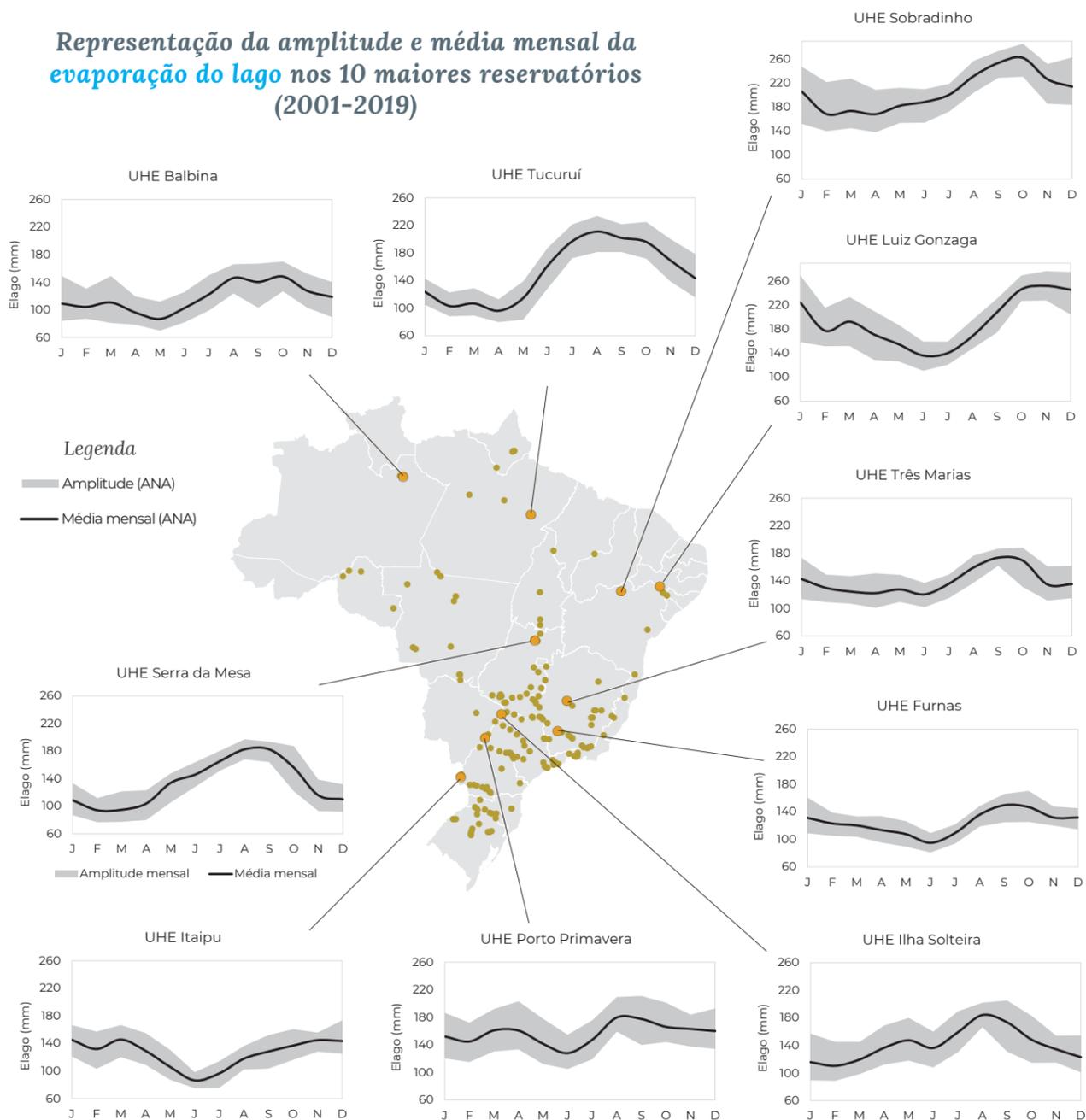
Em comparação aos **valores adotados atualmente pelo setor elétrico**, os resultados de evaporação líquida encontrados apresentam, em termos de totais médios anuais, **ordem de grandeza similar para alguns reservatórios e maiores discrepâncias em outros**. O paralelo entre os resultados é ilustrativo, dadas as diferenças metodológicas e de período de dados entre as fontes.

Para um conjunto maior de reservatórios, os resultados atuais apresentam magnitude superior em termos médios anuais, com valores adotados pelo setor elétrico concentrados na faixa entre 200 e 600 mm/ano, enquanto para este mesmo conjunto de lagos os valores concentram-se entre 300 e 1.000 mm/ano no presente estudo. Lagos na bacia do rio Paraná destacam-se nesse quesito, notadamente os maiores (Porto Primavera, Itaipu, Furnas, Ilha Solteira),

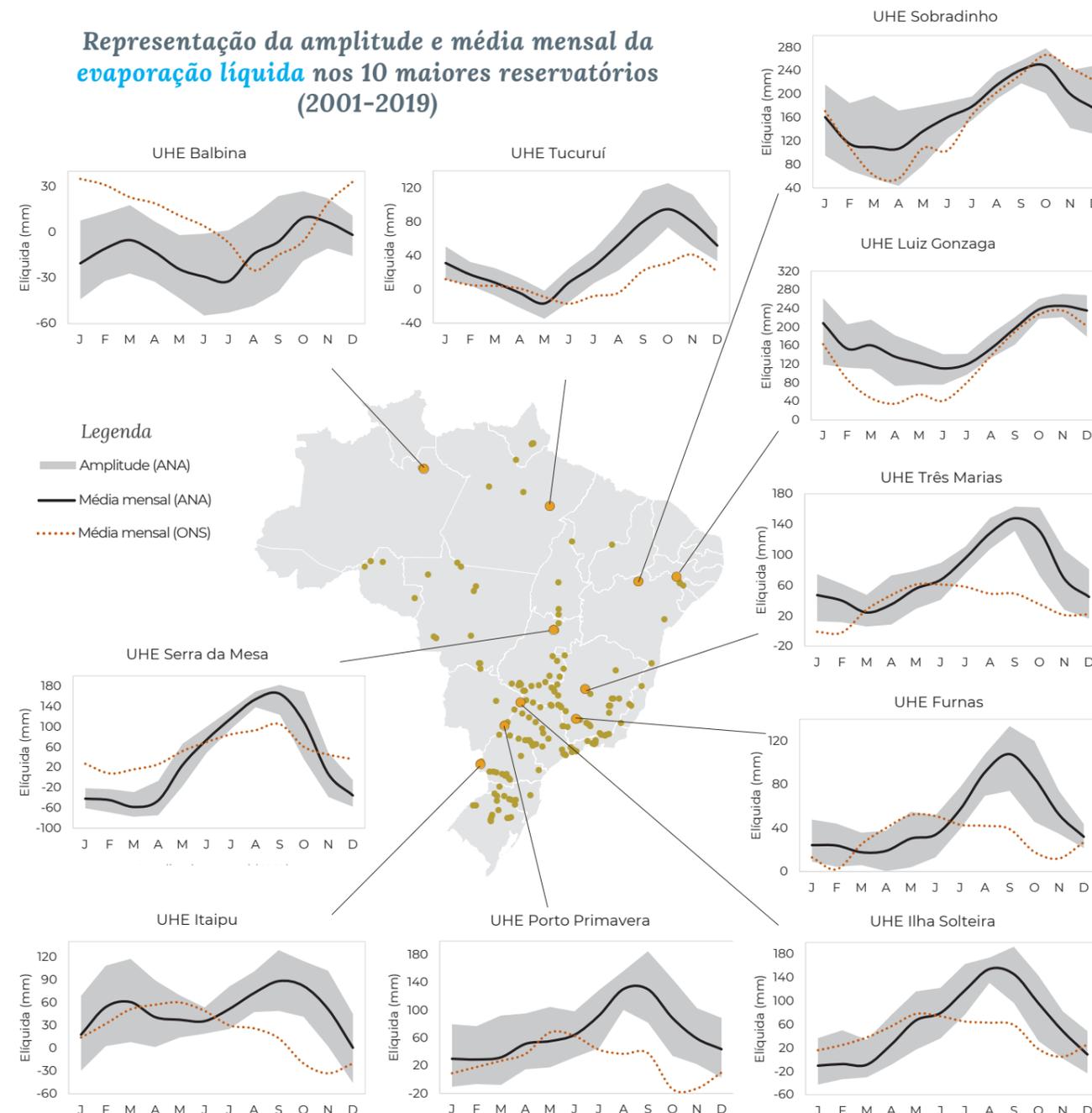
com valores médios estimados pela ANA sistematicamente superiores. Dentre os fatores, a metodologia atual retrata melhor tanto a sazonalidade (com maiores consumos no período de estiagem no Cerrado) quanto os aspectos locais em relação às componentes regionais (que possuem maior peso nos métodos anteriores).

Os reservatórios de Santo Antônio e Jirau apresentaram os comparativos mais discrepantes, com diferença de cerca de 1.200 mm/ano entre a estimativa atual e a adotada pelo setor elétrico. Neste caso específico, destaca-se que os resultados atuais - com evaporação do lago de cerca de 1.700 mm/ano e evapotranspiração real em torno de 1.100 mm/ano, resultando em evaporação líquida da ordem de 600 mm/ano - são consistentes regionalmente para um grande conjunto de lagos avaliados.

Representação da amplitude e média mensal da evaporação do lago nos 10 maiores reservatórios (2001-2019)



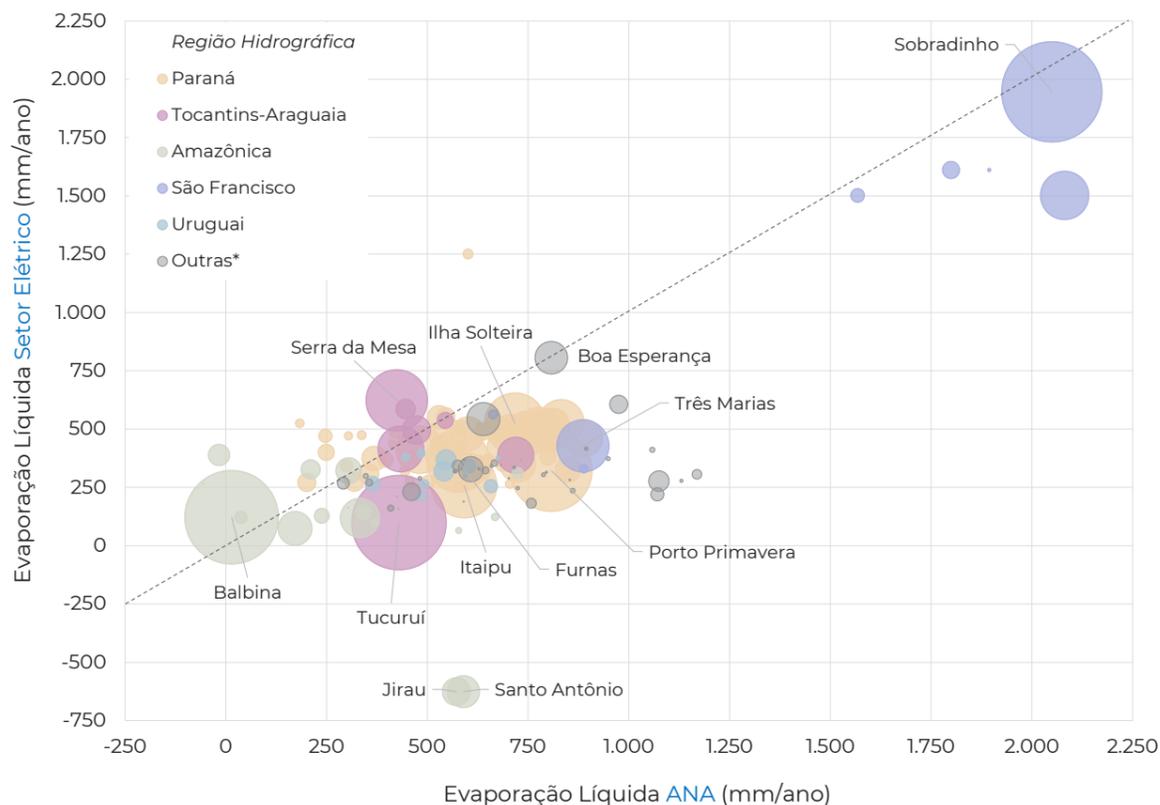
Representação da amplitude e média mensal da evaporação líquida nos 10 maiores reservatórios (2001-2019)



Regiões hidrográficas



Comparativo de resultados de evaporação líquida (média anual 2001-2019) com valores adotados pelo setor elétrico - Grupo A (SIN)



Nota: as esferas variam proporcionalmente à área média dos reservatórios.

Com relação à sazonalidade, os resultados apresentam diferenças ainda mais importantes entre os estudos, tendo comportamentos distintos ao longo do ano para a maioria dos reservatórios avaliados, demonstrando diferenças conceitualmente relevantes entre o método desenvolvido e os utilizados pelo setor elétrico para a maioria dos reservatórios do SIN. Por outro lado, o comportamento sazonal da evaporação líquida obtido é compatível em reservatórios onde o ONS relata limitações do SisEvapo e utiliza método alternativo para estimativa da evaporação líquida, com dados de tanque para estimativa de evaporação do lago e balanço hídrico para evapotranspiração real, como no caso de Sobradinho.

No Grupo B (21.200 reservatórios e 95% da superfície evaporante), agrupado por Regiões Hidrográficas - RH, os resultados de evaporação de lago (média anual 2001-2019) mostram que o Atlântico Nordeste Ocidental (2.057 ± 166 mm, $n= 272$ reservatórios), o Atlântico Nordeste Oriental (1.906 ± 120 mm, $n= 7.825$) e o Parnaíba (1.883 ± 132 mm, $n= 830$) possuíram as maiores lâminas evaporadas. Em contraste, as menores lâminas médias evaporadas estão em reservatórios sob influência de clima temperado, ou seja, nas regiões hidrográficas Paraná (1.455 ± 130 mm, $n= 2.680$ reservatórios), Atlântico Sul (1.299 mm ± 71 , $n= 1.788$) e Uruguai (1.321 ± 74 mm, $n= 3.194$).

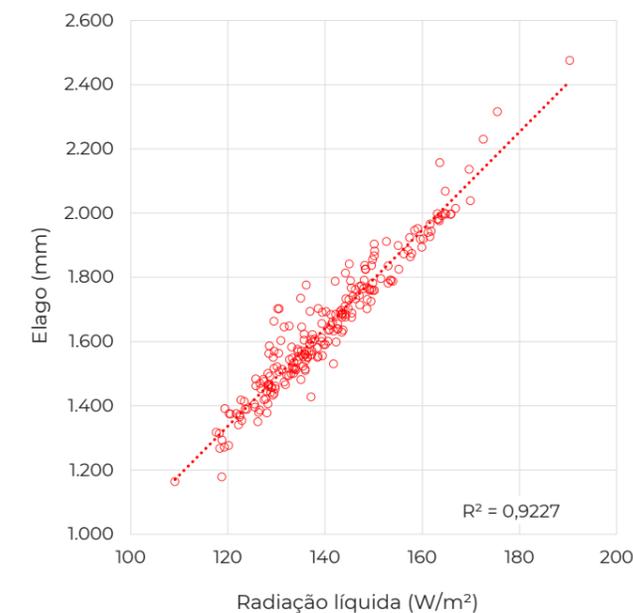
Valores máximos de altura de evaporação de lago encontram-se nas RHs Atlântico Nordeste Ocidental e Oriental (da ordem de 2.800 mm/ano). Para as RHs Amazônica, São Francisco, Atlântico Leste, Tocantins-Araguaia, Parnaíba, Atlântico Leste e Paraná os maiores valores estimados são da ordem de 2.000 a 2.500 mm. Por outro lado, as RHs Uruguai, Paraná e Atlântico Sul possuem reservatórios com valores máximos inferiores a 1.000 mm/ano.

As maiores amplitudes intrarregionais de evaporação do lago ocorrem nas RHs Atlântico Nordeste Oriental e Amazônica. Na primeira, a média anual está compreendida no intervalo entre 1.375 e 2.957 mm, enquanto na RH Amazônica a amplitude entre mínimo e máximo varia entre 1.162 e 2.576 mm.

Estes resultados evidenciam um controle local no processo de evaporação de lago, além das próprias características climáticas e meteorológicas regionais. Pelas características do método proposto, a evaporação de lago total anual é decorrente do balanço de energia, sendo afetada pelas variáveis e parâmetros locais, notadamente na estimativa da irradiância líquida utilizada no processo de evaporação. Portanto, a distribuição espacial dos valores médios anuais de evaporação de lago reflete aproximadamente a heterogeneidade espacial da irradiância líquida, a qual apresenta, por um lado, uma certa homogeneidade espacial dada pela irradiância global; e, por outro lado, incorpora a heterogeneidade das características climáticas locais que afetam o balanço de irradiância de um local específico.

De maneira geral, os resultados de evapotranspiração real - E_r apresentam um comportamento complementar à evaporação de lago, com valores baixos de E_r onde a E_{lago} é alta. Por exemplo, esta premissa é válida para as RHs Parnaíba (802 ± 265 mm, $n= 830$), Atlântico Leste (743 ± 273 mm), São Francisco (672 ± 235 mm, $n= 1.699$) e Atlântico Nordeste Oriental

Correlação evaporação do lago e irradiância líquida - média anual 2001-2019 - Grupo A (SIN)



(653 ± 142 mm). Ainda em termos das características regionais da E_R média anual, as RHs Atlântico Nordeste Ocidental (1.193 ± 194 mm), Amazônica (1.159 ± 232 mm) e Tocantins-Araguaia (1.099 ± 177 mm) apresentaram as maiores alturas médias para o período analisado.

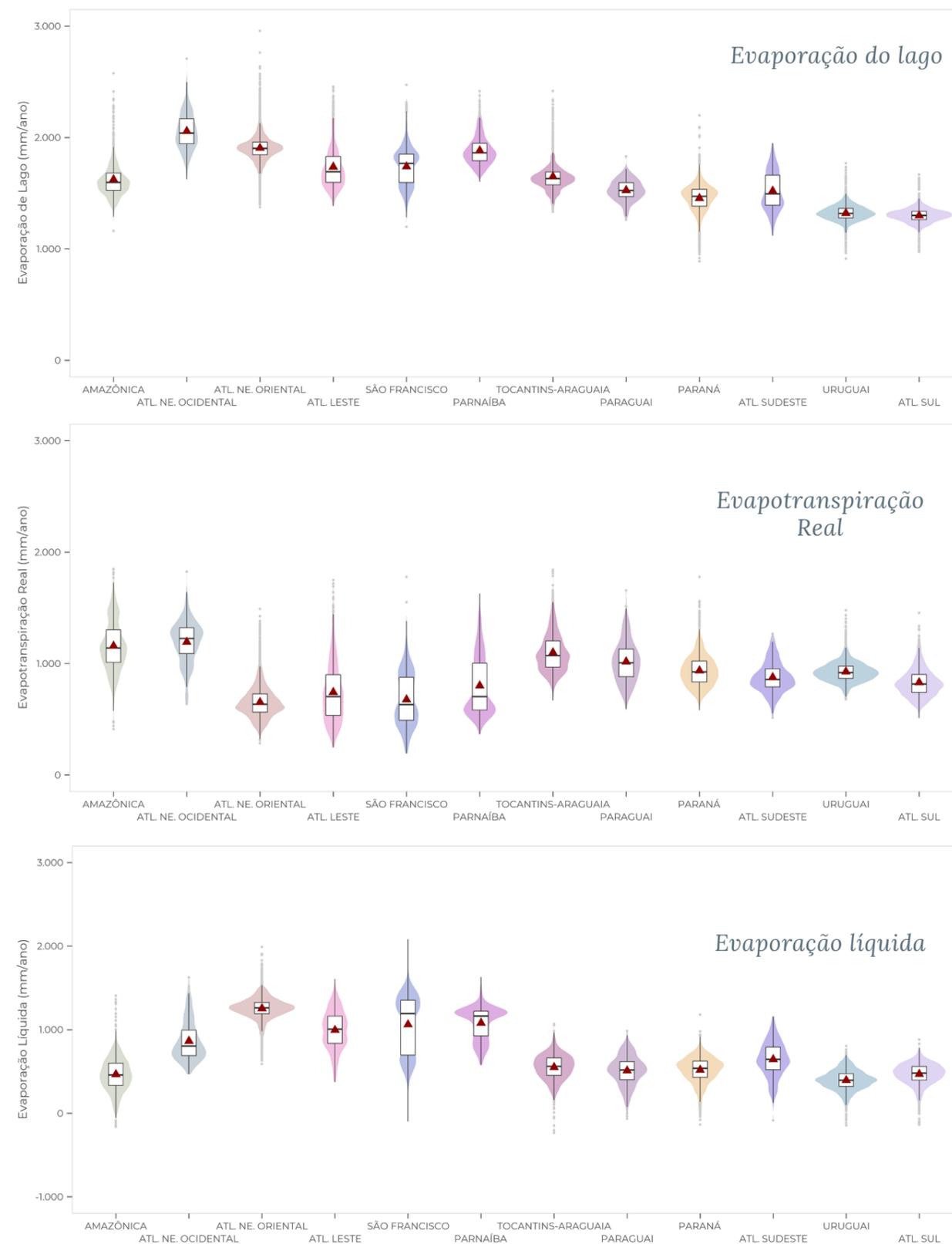
A variabilidade climática regional em termos da irradiância e da diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície da água e o ar - associadas a efeitos locais relacionados à vegetação e ao solo - influem para uma ampla variabilidade da evapotranspiração. Os maiores intervalos (mínimo - máximo) de E_R média anual, em torno de 1.500 mm, foram observados nos lagos das RHs São Francisco (193 mm - 1.778 mm), Atlântico Leste (246 mm - 1.749 mm) e Amazônica (412 mm - 1.850 mm). Por outro lado, as RHs Uruguai e Atlântico Sudeste apresentaram as menores amplitudes em termos de mínimas e máximas (< 800 mm/ano).

Os menores valores mínimos de evapotranspiração são observados nas RHs Atlântico Nordeste Oriental (286 mm), Atlântico Leste (245 mm) e São Francisco (193 mm), com largas extensões no Semiárido onde o processo é limitado pela deficiência hídrica. Já os valores máximos foram obtidos para reservatórios nas regiões Amazônica (1.850 mm), Tocantins-Araguaia (1.842 mm) e Atlântico Nordeste Ocidental (1.825 mm).

Dado que a **evaporação líquida** é a diferença entre a evaporação do lago e a evapotranspiração que ocorre naturalmente no seu entorno, os seus resultados podem ser compreendidos como complementares à discussão colocada anteriormente. Há um componente regional explícito na distribuição espacial das lâminas de evaporação líquida no Brasil. Por exemplo, os maiores valores estão concentrados no Nordeste, sobretudo nas regiões do submédio e do baixo rio São Francisco e em sua porção litorânea. Em contraste, na região Sul do país, observam-se os menores valores de evaporação líquida, notadamente na porção sudoeste da RH Uruguai e na RH Atlântico Sul. Adicionalmente, os reservatórios da região Amazônica também são caracterizados por uma baixa evaporação líquida em termos regionais.

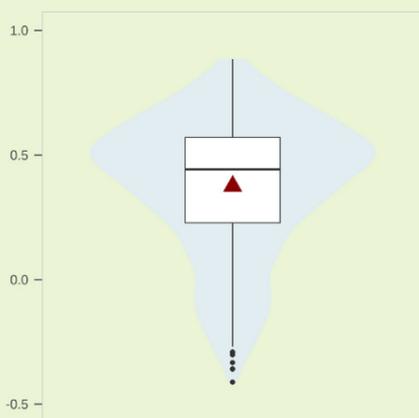
Em termos das lâminas anuais de evaporação líquida, **três RHs possuem valores médios superiores a 1.000 mm**, a saber: Atlântico Nordeste Oriental (1.253 ± 132 mm), Parnaíba (1.081 ± 196 mm) e São Francisco (1.062 ± 353 mm), coincidindo com as menores evapotranspirações médias anuais. As menores evaporações líquidas médias no país, inferiores a 550 mm, foram observadas nas RHs Atlântico Sul, Paraná, Paraguai, Amazônica e Uruguai.

Violin-plot das componentes e da evaporação líquida média anual (2003-2019) por região hidrográfica - Grupo B*



Nota: o Grupo B de análise corresponde a cerca de 22 mil reservatórios que respondem por 95% da superfície de reservatórios artificiais no Brasil

Violin plots

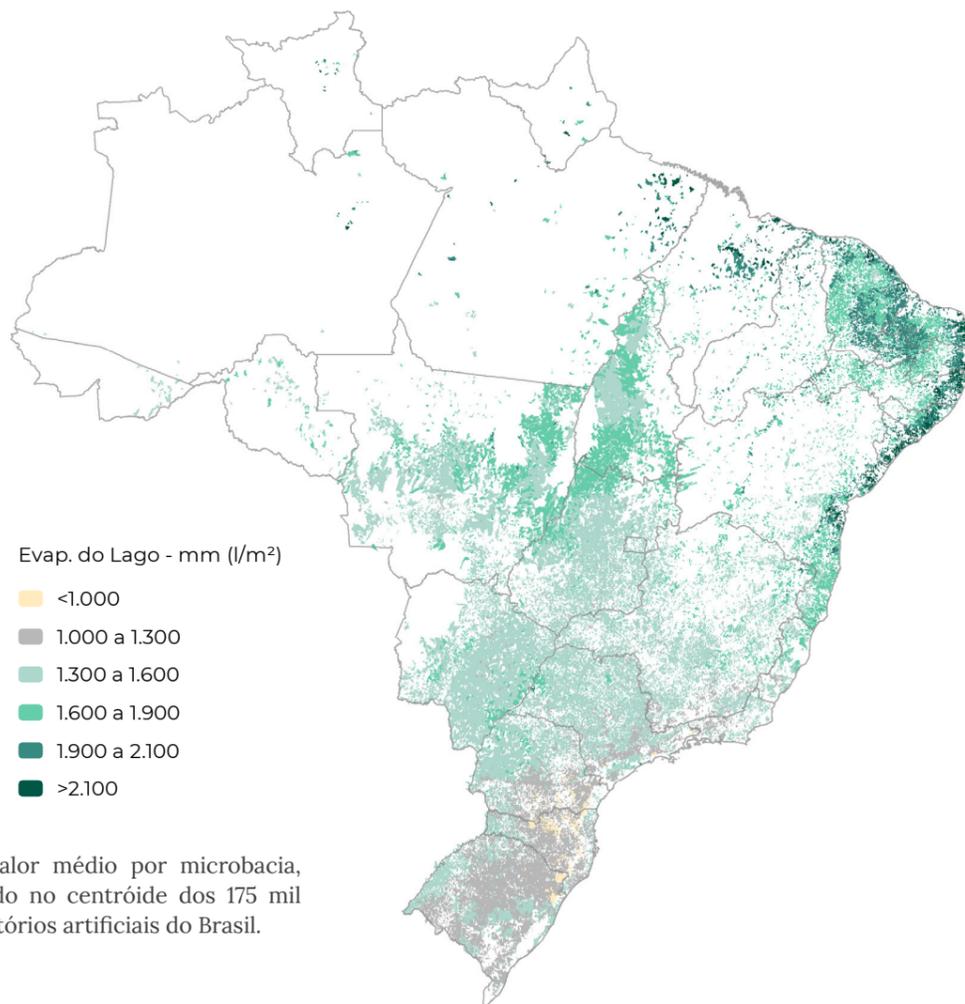


Os violin plots são uma forma de plotar dados numéricos que, de maneira simplificada, combinam um gráfico do tipo *box plot*, que permite compreender a variabilidade dos dados, junto com a função de densidade de probabilidade, que permite compreender a forma de distribuição dos dados. São úteis quando se pretende realizar uma comparação da distribuição dos dados entre diversos grupos a partir da análise das caudas e dos picos da distribuição, além da forma geral da curva estimada.

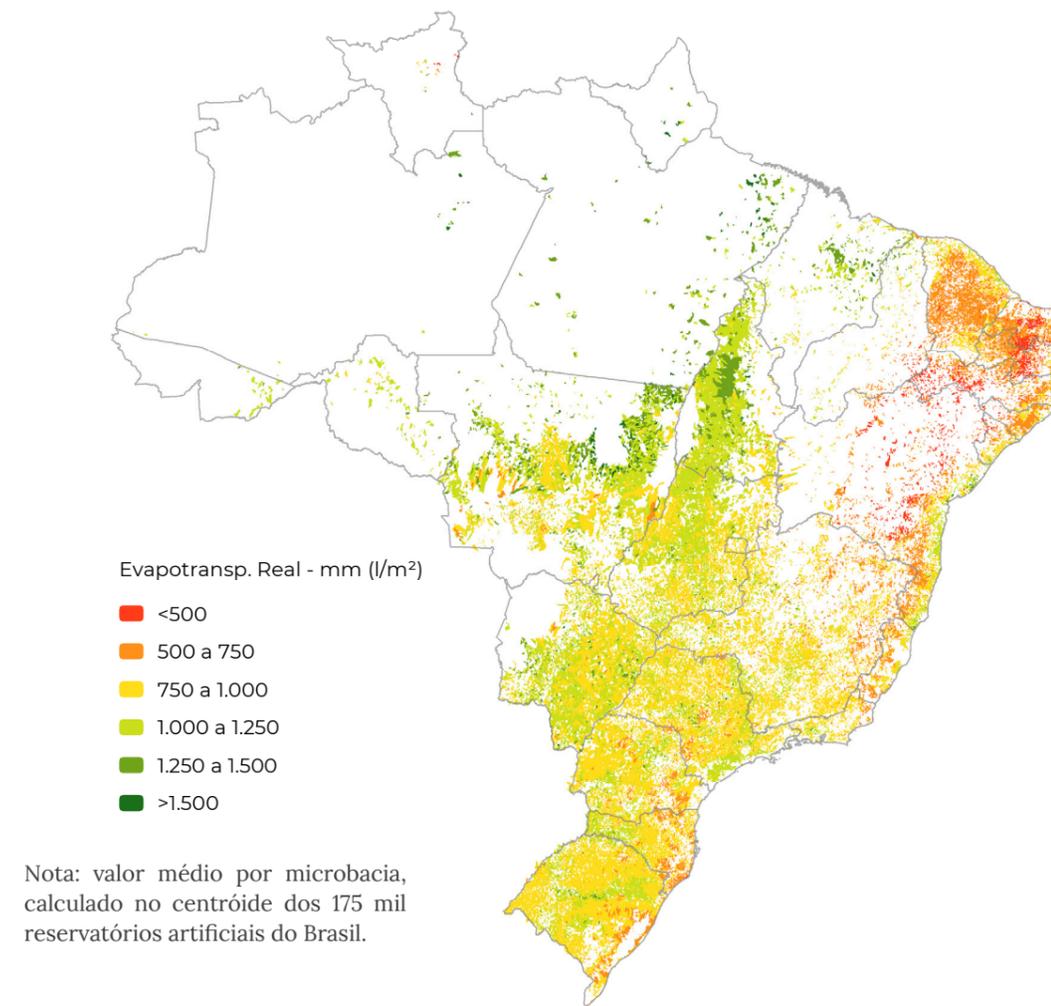
Assim como os *box plots*, os *violin plots* incluem a média dos dados (triângulo vermelho) e a caixa apresentando a mediana do conjunto de dados, os quartis (1º e 3º) e seus limites inferiores e superiores. Adicionalmente, com a visualização dos pontos de dados em cada região do intervalo numérico da variável em análise a partir da largura de cada curva. A área formada em torno do *box plot* representa a distribuição dos dados. Em intervalos numéricos com as maiores áreas, existe uma grande concentração de dados, por sua vez em locais de menor área existe uma menor concentração.



Evaporação do lago média anual (2001-2019)



Evapotranspiração real média anual (2001-2019)



Cabe destacar que para todas as RHs, considerando o conjunto de reservatórios analisados, a variabilidade da evaporação líquida foi superior a 1.000 mm entre valores mínimos e máximos. Além de condições regionais e da grande extensão territorial das RHs, há uma série de aspectos locais que influenciam a evaporação do lago e a evapotranspiração real, o que justifica essa amplitude.

Em termos de limites superiores de evaporação líquida, São Francisco e Atlântico Nordeste Oriental alcançam valores da ordem de 2.000 mm/ano. Na sequência, Parnaíba, Atlântico Leste e Nordeste Ocidental possuem evaporações líquidas da ordem de 1.600 mm/ano, superiores às observadas nas RHs

Amazônica (1.407 mm), Paraná (1.180 mm), Atlântico Sudeste (1.158 mm) e Tocantins-Araguaia (1.069 mm). As demais RHs possuem reservatórios com as maiores evaporações líquidas inferiores a 1.000 mm/ano, com destaque para a RH Uruguai (máximo de 805 mm/ano).

Valores negativos de evaporação líquida são esperados quando $E_r > E_L$. No total, 42 reservatórios (< 0,5% do total de reservatórios do Grupo B), em quase todas as RHs, enquadram-se nesta situação.

A distribuição espacial dos valores médios totais anuais de evaporação líquida apresenta aderência às **características regionais** ambientais em geral e cli-

máticas em particular. Via de regra, valores mais elevados de evaporação líquida ocorrem de forma concentrada em regiões com alta evaporação de lago e valores reduzidos de evapotranspiração real. Por outro lado, valores reduzidos de evaporação líquida decorrem de uma maior variedade de situações ambientais, onde as características locais resultam em valores próximos entre a evaporação da superfície líquida e a evapotranspiração da bacia.

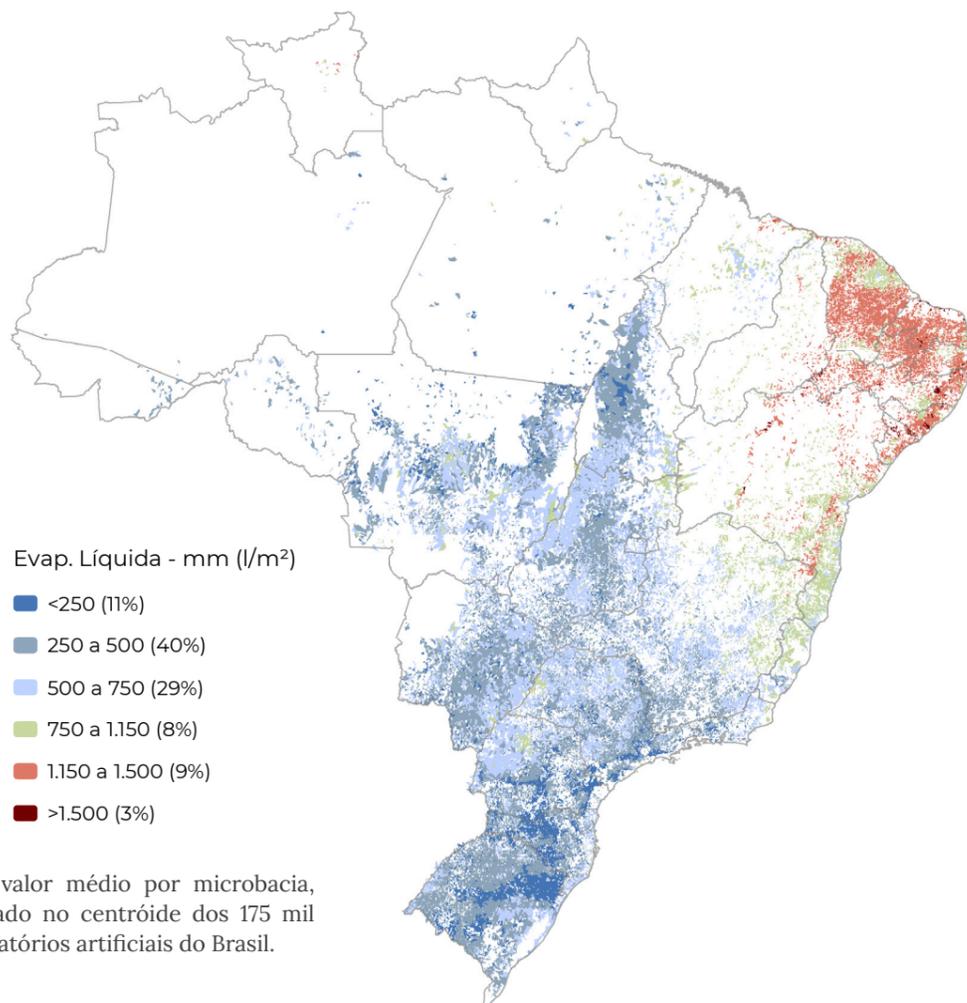
Valores extremos de evaporação líquida ocorrem em muitas regiões também em função de **situações ambientais locais específicas**. Valores mais altos estão restritos a elevada evaporação de lago e localizados

em condições particulares de ausência de vegetação no entorno (limitação climática ou antrópica), que resulta em valores extremamente baixos de evapotranspiração real. No sentido oposto, situações locais de evaporação líquida negativa decorrem basicamente de valores elevados de evapotranspiração real no entorno desses lagos, em função da presença de vegetação exuberante e condições favoráveis de umidade no solo. Cabe destacar que o método de estimativa de evapotranspiração real também possui forte vinculação com condições locais, especialmente da dinâmica da resposta espectral do entorno do reservatório.





Evaporação líquida média anual (2001-2019)



Vazões de evaporação líquida

A vazão de evaporação líquida (m³/s) resulta da multiplicação da lâmina ou altura de evaporação líquida (mm) pela área da superfície evaporante (área do lago - km²), considerando-se a devida conversão de unidades e intervalo de tempo considerado. Destaca-se que, assim como a altura de evaporação, a área da superfície do lago também pode variar no tempo, dependendo do regime de operação do reservatório.

Climas observados de seca mais severa que as médias históricas tendem a aumentar a capacidade da atmosfera de retirar água dos lagos, além de diminuir a evapotranspiração real (aumento da restrição hídrica no solo) - um saldo que tende a aumentar as taxas de evaporação líquida. Por outro lado, os reservatórios de acumulação podem ter o seu volume significativamente deplecionados em relação ao regime normal de operação, pelos mesmos efeitos negativos do clima seco sobre a oferta de água e sobre os demais usos na bacia hidrográfica (aumento da necessidade de irrigação, por exemplo).

A vazão média de evaporação líquida em 2019 no Brasil foi de 885 m³/s em uma superfície média de 39,95 mil km². A vazão equivale a 885 mil litros a cada segundo e a um volume anual consumido de 27,9 trilhões de litros.

Em 2019, 114 reservatórios apresentaram evaporação líquida superior a 500 litros por segundo (0,5 m³/s) e somaram vazão média anual de 666 m³/s (75% do total nacional) - 32 deles não estão interligados ao SIN; 73 reservatórios (12 não interligados ao SIN) possuem valores acima de 1 m³/s e totalizam vazão de 637 m³/s (72% do total).

Os 14 reservatórios com vazões acima de 10 m³/s em 2019, destacados no mapa e no infográfico a seguir, foram responsáveis por 51% do total de vazão consumida via evaporação líquida e 38% da área. As cinco maiores vazões concentraram 32% do uso nacional - são eles: Sobradinho (167,1 m³/s) e Luiz Gonzaga (45,3 m³/s) na RH São Francisco; Porto Primavera (48,8 m³/s) e Ilha Solteira (26 m³/s) na RH Paraná; e Tucuruí (27,1 m³/s) na RH Tocantins-Araguaia.

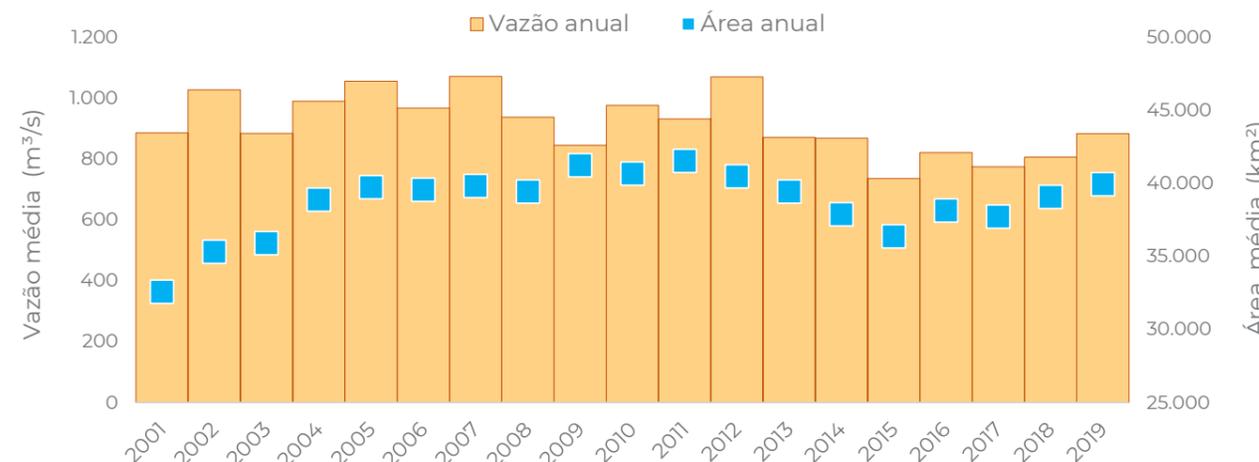
Considerando a consolidação dos resultados para a base de reservatórios inventariada, os reservatórios do Sistema Interligado Nacional - SIN totalizaram em 2019 uma vazão média anual proporcional à área média que ocupam (72%). Esse saldo varia anualmente de acordo com a área efetivamente ocupada e as alturas de evaporação/evapotranspiração.

Em termos regionais, destacam-se as regiões hidrográficas Paraná e São Francisco (com valores de 303

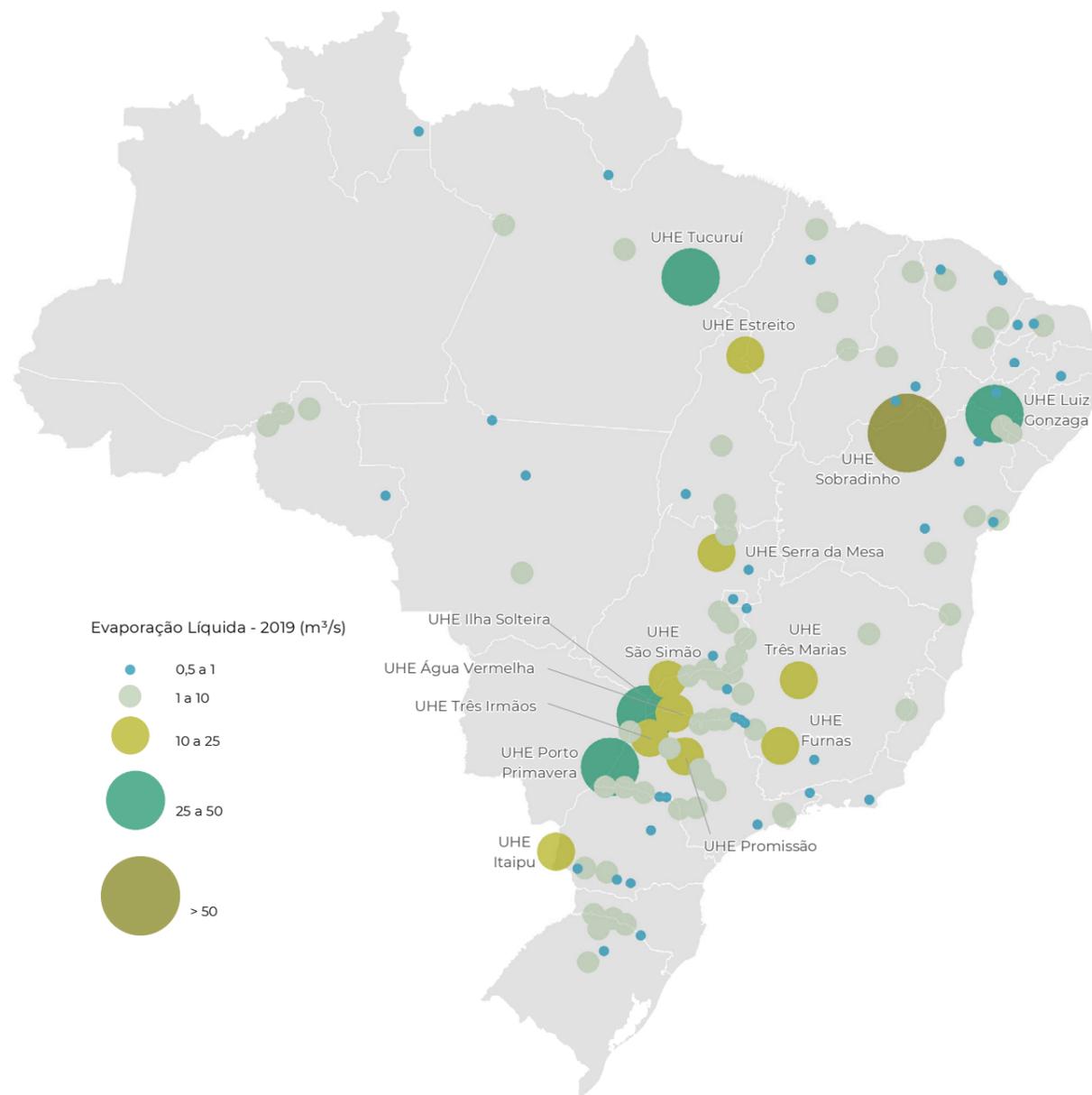


Reservatórios e usina sucroenergética em Jaboticabal (SP)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA

Vazão média anual de evaporação líquida de reservatórios - Brasil



**Maiores vazões de evaporação líquida em 2019
(maior que 0,5 m³/s)**



Nota: os 114 reservatórios em destaque no mapa concentram 75% da vazão de evaporação líquida no Brasil, em 2019. Os 14 maiores consumidores (51% da vazão) encontram-se com o nome em destaque.

e 266 m³/s, em 2019, respectivamente), seguidas das RHs Atlântico Nordeste Oriental e Tocantins-Araguaia (102 e 74 m³/s, respectivamente). Essas quatro regiões são responsáveis por 84% da evaporação líquida e 73% da superfície de reservatórios do País.

As regiões hidrográficas Parnaíba, Atlântico Leste e Uruguai apresentaram totais entre 21 e 29 m³/s em 2019. O uso continua sendo relevante, podendo superar na região ou em suas sub-bacias os valores de usos setoriais da água (indústria, irrigação, abastecimento rural, dentre outros).

Os resultados reforçam a importância da consideração das vazões evaporadas no processo de gestão setorial e de recursos hídricos, dada a magnitude na escala da bacia hidrográfica e seus reflexos no balanço entre disponibilidades e demandas hídricas.

No período 2001-2019, as maiores vazões anuais de evaporação líquida no Brasil, superiores a 1.000 m³/s foram verificadas em 2002 (1.028 m³/s), 2005 (1.056 m³/s), 2007 (1.072 m³/s) e 2012 (1.070 m³/s). Já as vazões específicas oscilaram entre 20 e 29 litros por segundo por km² de superfície (média anual), com média de 24 L/s.km² e com os menores valores

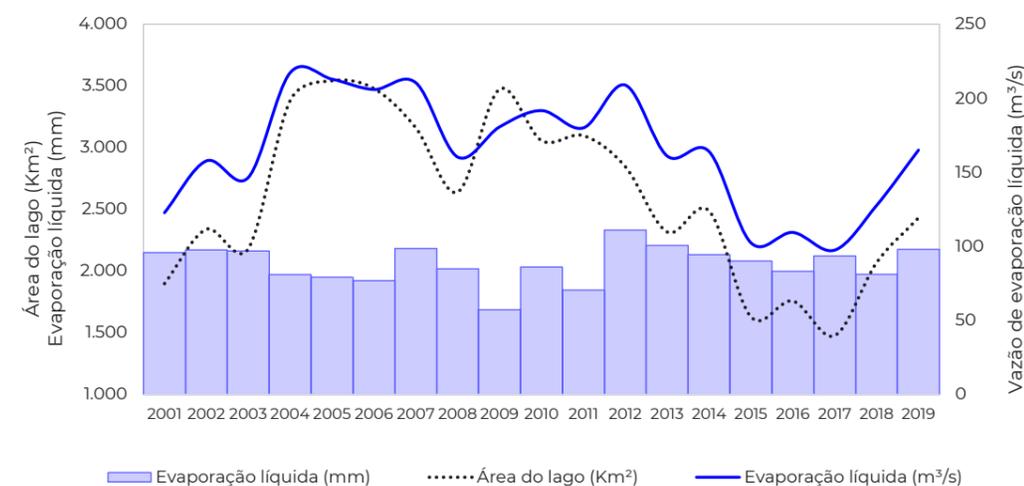
observados em 2009 e 2015 (20 L/s.km²) e o maior em 2002 (29 L/s.km²).

É interessante notar que a evaporação líquida apresenta amplitudes sazonais expressivas e seu comportamento é altamente influenciado pelas condições hidrometeorológicas intra e interanuais. As maiores evaporações líquidas mensais tendem a ocorrer no auge do período mais seco onde concentra-se boa parcela da superfície de reservatórios no Brasil (agosto a outubro). Em 2019, agosto, setembro e outubro registraram evaporações líquidas em um patamar próximo ao dobro da vazão média anual (885 m³/s), com médias mensais entre 1.600 e 1.970 m³/s. Em abril de 2019, por outro lado, a média mensal de evaporação líquida foi negativa no Brasil.

Como indicador, o balanço mensal entre as componentes da evaporação líquida resultou, em 2019, em uma taxa média de apenas 4 L/s.km² entre janeiro e maio, que salta para 40 L/s.km² entre julho e outubro (10 vezes maior).

Um conjunto grande e importante de reservatórios apresenta tendência de valores negativos entre dezembro ou janeiro e março (a depender das condi-

Área média e evaporação líquida média (altura e vazão) para o lago de Sobradinho - 2001-2019

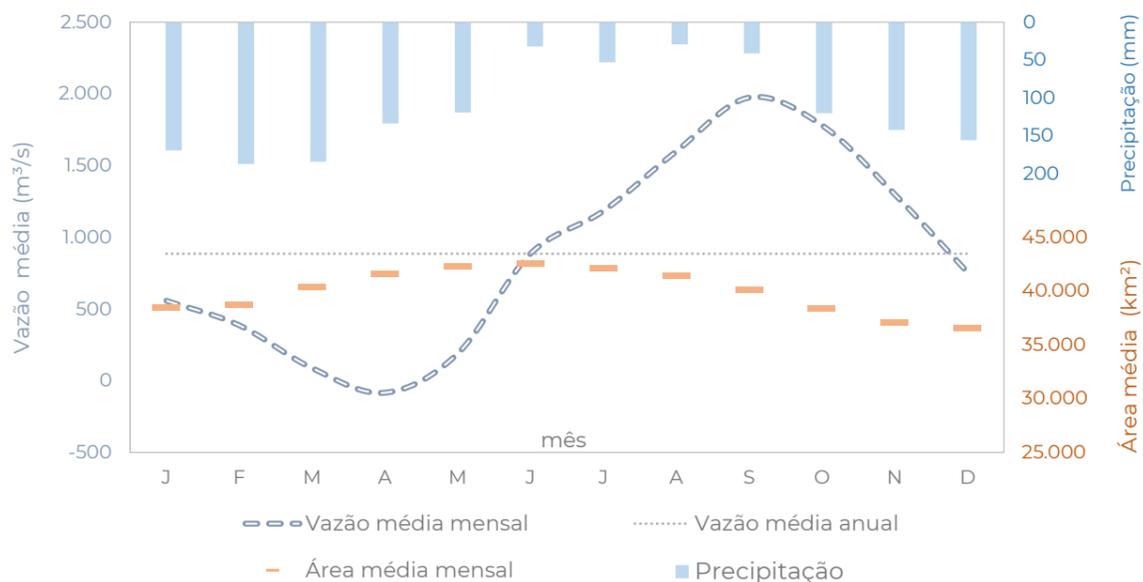


A ilustração mostra a dinâmica para o reservatório de Sobradinho em termos médios anuais. Nota-se a vazão de evaporação líquida com comportamento muito próximo à variação da área, mas respondendo também às variações de altura de evaporação líquida entre os anos considerados. A cada 12 mm de altura de evaporação total anual, considerando-se a mesma área superficial do lago de Sobradinho, há um acréscimo de vazão de evaporação líquida de 1 m³/s, por exemplo.



Média mensal em 2019

Precipitação, evaporação líquida e área de reservatórios



ções observadas em um ano específico em relação às médias).

Valores negativos nesses meses ocorrem especialmente em reservatórios no bioma Amazônia - onde há equilíbrio constante entre a evaporação do lago e a evapotranspiração real do entorno, com maiores diferenças em alguns meses, podendo ocorrer até mesmo evaporação líquida negativa na média anual em determinados anos e reservatórios.

Também ocorrem valores negativos no bioma Cerrado nesses meses de chuvas concentradas, quando a umidade do solo exerce pouca ou nenhuma restrição à evapotranspiração, com essa superando com frequência a evaporação do lago. No período seco, concentrado entre julho e outubro, a relação se inverte significativamente, com baixas evapotranspirações reais e altas taxas de evaporação do lago. Com isso, as vazões positivas do período seco superam as negativas do período úmido, não havendo ocorrência de valores negativos médios anuais.

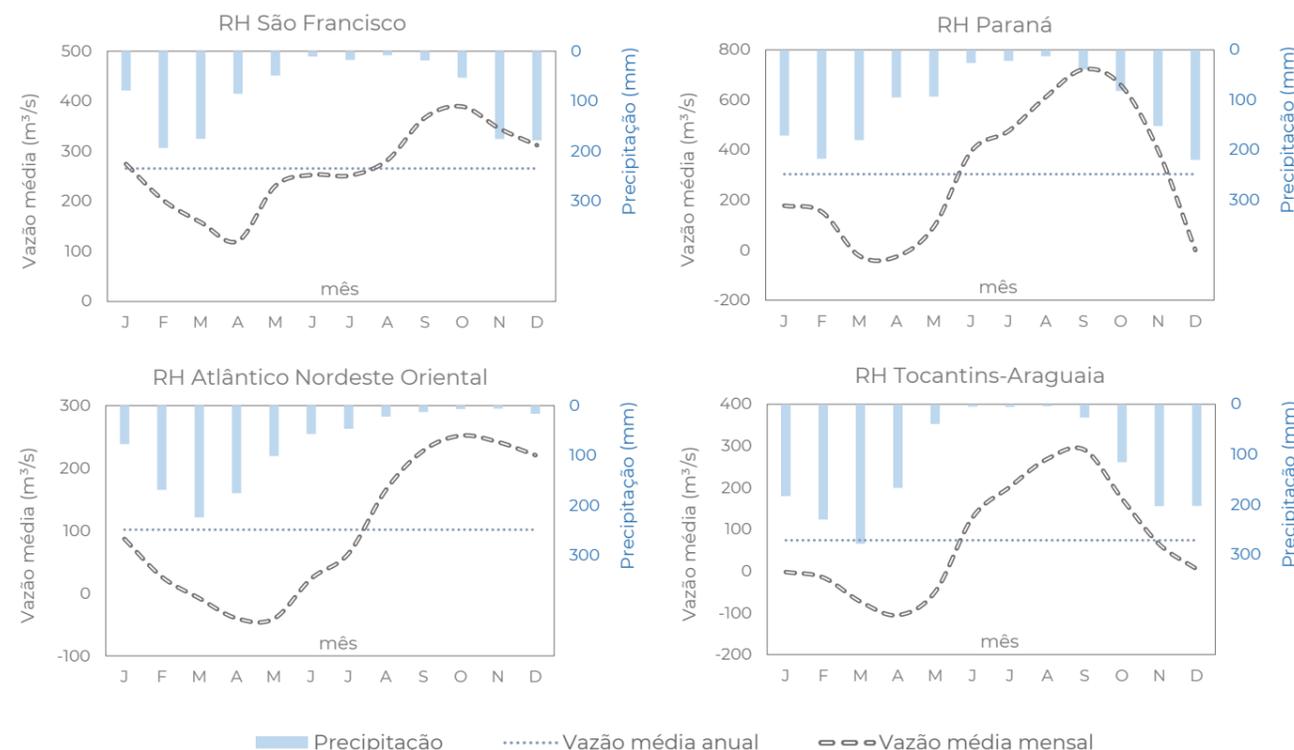
Portanto, embora seja comum verificar evaporações líquidas negativas em determinados meses do ano para muitos reservatórios (podendo superar o número de positivos), apenas cerca de 2 mil reservatórios (1,1% do total) apresentam evaporação líquida

média anual negativa no período 2001-2019. Esses casos concentram-se na região Amazônica e em pequenos reservatórios cercados de florestas ou silvicultura, ou seja, em condições locais específicas de alta evapotranspiração.

Como exemplo adicional, podemos destacar as cinco menores vazões de evaporação líquida em abril de 2019, que oscilaram entre -10 e -22 m³/s (média mensal) - Tucuruí, Lajeado, Serra da Mesa, Balbina e Peixe Angical. Tucuruí e Balbina, que estão na Amazônia, apresentaram taxas de evaporação líquida da ordem de -0,5 mm/dia para abril de 2019, ocasionando vazões negativas altas pela grande área ocupada. Lajeado, Serra da Mesa, Balbina e Peixe Angical - localizados no Cerrado entre o norte de Goiás e Tocantins - apresentaram taxas da ordem de -2,5 mm/dia em abril de 2019, mas em meses secos essas taxas se alteram para valores positivos entre 5 e 6 mm/dia.

Os resultados reforçam que a sazonalidade intranual da vazão é menos controlada por oscilações de área e **mais controlada pelas condições atmosféricas e de energia** disponível para a evaporação, assim como da **precipitação** (e a consequente umidade do solo) **como importante limitador da evapotranspiração real**.

Precipitação e evaporação líquida nas Regiões Hidrográficas



Nota: quatro das doze regiões hidrográficas (em destaque na figura) representam cerca de 85% da vazão de evaporação líquida nacional. As RHs Paraná e São Francisco representam 64% da vazão total.

Unidades de Gestão de Recursos Hídricos - UGRHs

As 12 regiões hidrográficas (RHs) foram estabelecidas pela Resolução CNRH nº 32, de 15 de outubro de 2003, representando o maior nível de agregação de bacias no território brasileiro. Com o avanço da gestão e da implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, surge a necessidade de se trabalhar com novos recortes, compatíveis, por exemplo, com as dimensões territoriais e com a presença ou às demandas por gestão (Comitê de Bacia, Plano de Recursos Hídricos, mobilização social etc.).

Nesse contexto, foram estabelecidas 64 Unidades de Gestão de Recursos Hídricos - UGRHs, sendo 47 de domínio da União e 17 de domínio dos Estados. Essas unidades representam uma evolução de unidades similares estabelecidas anteriormente e serão a base para o Plano Nacional de Recursos Hídricos - PNRH 2022-2040.

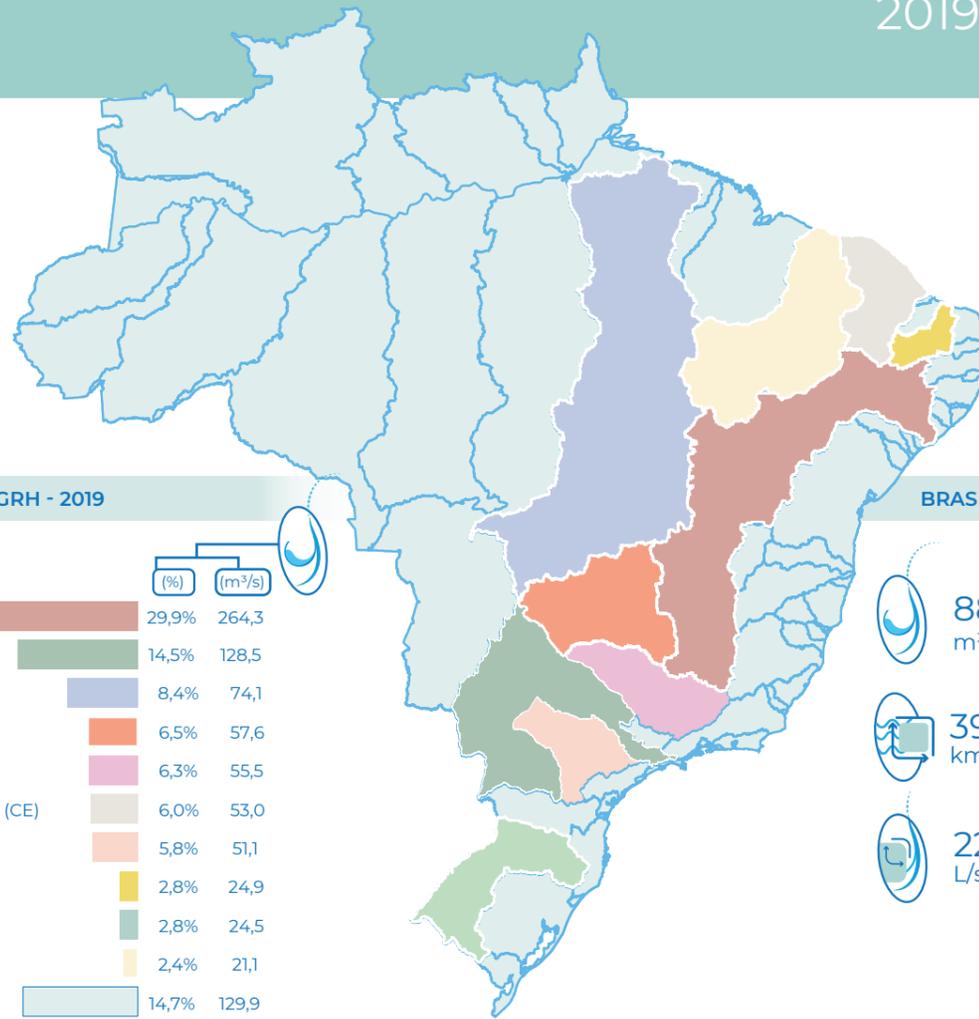
As RHs Parnaíba, Uruguai, Tocantins-Araguaia e Paraguai mantêm-se com os mesmos limites como UGRHs, enquanto as demais são subdivididas. A RH São Francisco se mantém exceto pelo destaque da bacia do Verde-Grande. A RH Paraná é dividida nas UGRHs Parnaíba, Grande, PCJ, Paranapanema, Iguaçu e Paraná (essa formada pelas demais bacias afluentes estaduais como a do Tietê).



Para mais informações, acesse: <https://metadados.snirh.gov.br/>

Evaporação Líquida de reservatórios no Brasil 2019

Nota: embora o consumo seja estimado para cerca de 175.000 reservatórios no Brasil, os 14 lagos em destaque no infográfico apresentaram as maiores evaporações líquidas em 2019, totalizando 51% do consumo nacional.



RANKING - UGRH - 2019

UGRH	(%)	(m³/s)
São Francisco	29,9%	264,3
Paraná	14,5%	128,5
Tocantins-Araguaia	8,4%	74,1
Paranaíba	6,5%	57,6
Grande	6,3%	55,5
Bacias Litorâneas Estaduais (CE)	6,0%	53,0
Parapanema	5,8%	51,1
Piancó-Piranhas-Açu	2,8%	24,9
Uruguai	2,8%	24,5
Parnaíba	2,4%	21,1
Demais 54 UGRHs	14,7%	129,9

BRASIL - 2019



RANKING - MAIORES VAZÕES - MÉDIA ANUAL 2019

1 SOBRADINHO | BA



2 PORTO PRIMAVERA | MS - SP



3 LUIZ GONZAGA | BA - PE



4 TUCURUÍ | PA



5 ILHA SOLTEIRA | GO - MS - MG - SP



6 TRÊS MARIAS | MG



7 ITAIPU | MS - PR



8 TRÊS IRMÃOS | SP



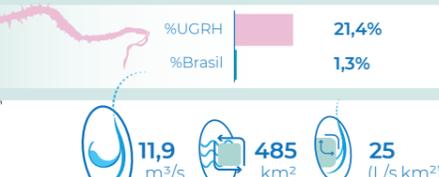
9 FURNAS | MG



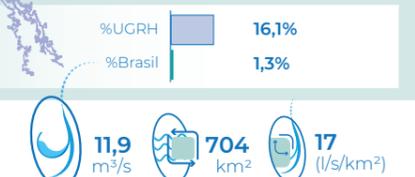
10 ESTREITO | MA - TO



11 ÁGUA VERMELHA | MG - SP



12 SERRA DA MESA | GO



13 PROMISSÃO | SP



14 SÃO SIMÃO | GO - MG



LEGENDA





Síntese

As literaturas nacional e internacional convergem para a definição da evaporação dos reservatórios artificiais como um **uso consuntivo múltiplo da água**. Afinal, a água armazenada em um reservatório é parcialmente consumida, tornando-se **indisponível para outros usos/usuários naquela localidade e temporalidade**. Raciocínio análogo aplica-se a **usos setoriais** como a irrigação (a maior parte do consumo ocorre via evapotranspiração das culturas) ou à indústria (parte relevante do consumo ocorre pela evaporação nos sistemas de resfriamento).

Agências governamentais e organismos internacionais como a UNESCO (2021) (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*), a FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) e a EEA (*European Environmental Agency*) reconhecem esse uso e destacam cada vez mais a sua importância em seus relatórios e iniciativas, como no padrão dos **Sistemas Internacionais de Contas Econômicas e Ambientais**, estabelecido por Nações Unidas, Banco Mundial, Comissão Europeia, Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico e Fundo Monetário Internacional. Cabe destacar ainda a norma da *International Organization for Standardization* - ISO número 14.046:2014, que trata da avaliação da pegada hídrica de produtos diversos, e considera que a mudança na evaporação causada por mudança de uso da terra é considerada consumo da água.

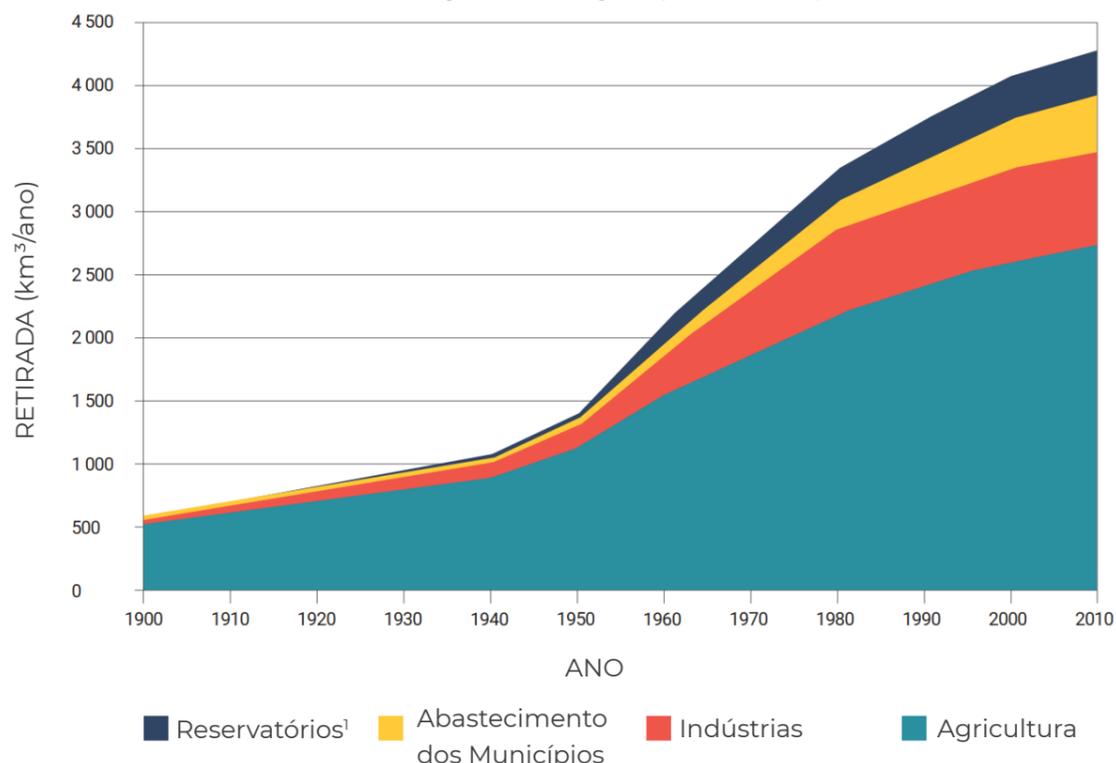
Cientistas e organismos internacionais concentram-se em dois principais desafios relacionados ao consumo por evaporação líquida de reservatórios: **I) os métodos de estimativa do consumo de água**; e **II) a atribuição do consumo por evaporação líquida a setores específicos**.

O primeiro desafio foi extensamente explorado pela ANA e pela UFPR nesse estudo, o que permitiu estabelecer uma metodologia robusta, valendo-se de produtos de sensoriamento remoto, dados medidos em terra e ferramentas computacionais avançadas, capaz de retratar a variabilidade espaço-temporal da evaporação líquida no extenso e diverso território brasileiro.

Dentre trabalhos recentes com abordagens de consumo de água pela evaporação de reservatórios, pode-se destacar aqueles: com uso de bases de diversos países (Hogeboom et al., 2018); com foco nos maiores reservatórios da China (Liu et al., 2015; Xie et al., 2019) e dos Estados Unidos da América (Lee et al., 2018; Grubert, 2016); e em reservatórios únicos ou pequenos conjuntos de reservatórios (Bakken et al., 2016; Coelho et al., 2017). Na maioria dos estudos publicados, por simplificação ou limitações metodológicas, a evaporação bruta do reservatório é utilizada como o consumo de água (sem descontar a evapotranspiração real que ocorreria naturalmente no local). Em estudos mais recentes a evaporação líquida aparece como o método mais adequado para estimativa do consumo de água em reservatórios.

4 EVAPORAÇÃO LÍQUIDA E USOS CONSUNTIVOS SETORIAIS

Retirada global de água (1900-2010)



¹Nota: evaporação de lagos artificiais.

Fonte: adaptado de UN-UNESCO (2021).

Considerando o **uso consuntivo múltiplo por evaporação líquida** de reservatórios e os **usos consuntivos setoriais da água**, a demanda de água no Brasil alcançou o patamar de 2.946 m³/s em 2019 (equivalente a 92,9 trilhões de litros no ano), dos quais 30% são por evaporação líquida e 70% são atribuídos aos usos setoriais da água.

Dentre os demais usos da água, a agricultura irrigada, o abastecimento urbano e a indústria são os principais usos setoriais da água no Brasil e no mundo. Já a evaporação líquida de reservatórios é mais relevante no Brasil em relação à média global, especialmente devido à grande rede de reservatórios construídos com o propósito primário de geração de energia hidrelétrica, enquanto muitos países possuem matrizes com maior participação de geração não renovável (termelétrica e nuclear).

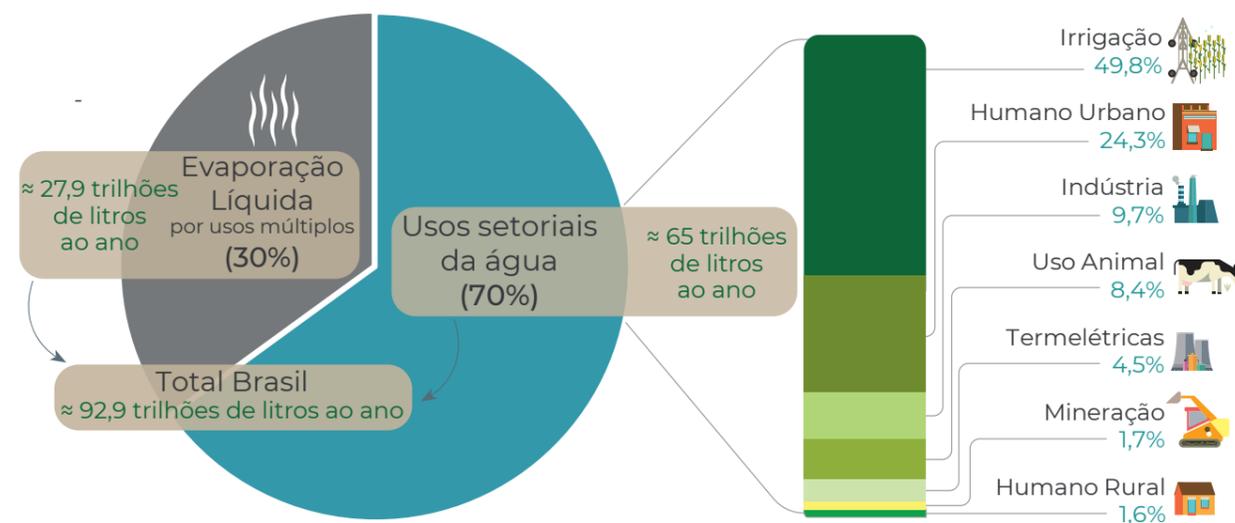
Resta claro que, diferente de outros usos consuntivos que podem ser atribuídos a setores econômicos específicos (como a irrigação e a indústria), **a evaporação líquida de reservatórios é um uso múltiplo**. Mesmo reservatórios artificiais construídos e ope-

rados por um setor específico da economia, como os de geração de energia, em geral beneficiam múltiplos usuários tanto no local do reservatório quanto em trechos influenciados pela sua operação na bacia hidrográfica. Os **usuários beneficiados** podem ser tantos os **consuntivos**, como uma indústria, quanto os **não consuntivos**, como a navegação, o turismo e o lazer. O controle de cheias, a diluição de efluentes e a própria geração de energia em cascata no sistema interligado (extrapolando a bacia) são outros usos importantes beneficiados por reservatórios.

Assim, atribuir o consumo por evaporação líquida permanece como um desafio na fronteira do conhecimento técnico-científico. Em algumas situações, a atribuição precisa do consumo por evaporação aos setores é intangível – especialmente para grandes reservatórios multiusuários que regularizam extensos trechos de rios a jusante e colaboram com a geração de energia em cascata para um sistema interligado que extrapola os limites da bacia.

Na literatura recente (abordada no Box a seguir), por simplificação ou limitação metodológica, diversos

Retirada de água no Brasil - 2019



trabalhos associam todo o consumo de água ao operador ou responsável pela construção do barramento, superestimando e penalizando a pegada hídrica de determinados setores, especialmente o de geração de energia.

Critérios mais equitativos de atribuição do consumo incluem a proporção da evaporação líquida à vazão retirada pelos setores/usuários (Bakken et al., 2016), o que muitas vezes esbarra em desafios de monitoramento do uso efetivo de água e de definição da área de influência do reservatório (o lago e todos os trechos beneficiados). Outros estudos buscaram ponderar a evaporação líquida de acordo com o benefício econômico aferido pelos setores (como em Lee et al., 2018; e Liu et al., 2015); ou de acordo com a prioridade no uso da água e o número total de usuários de cada reservatório (como em Xie et al., 2019).

A atribuição do consumo de água por evaporação líquida aos usuários que captam água do reservatório ou que dele se beneficiam é um procedimento ainda pouco utilizado e carece de métodos consistentes e padronizados.

O presente estudo não se debruçou sobre a atribuição de consumo, entendendo a evaporação líquida como um uso múltiplo da água e concentrando-se nos métodos, bases de dados e ferramentas mais adequadas para retratar esse uso no Brasil. **Estudos e**

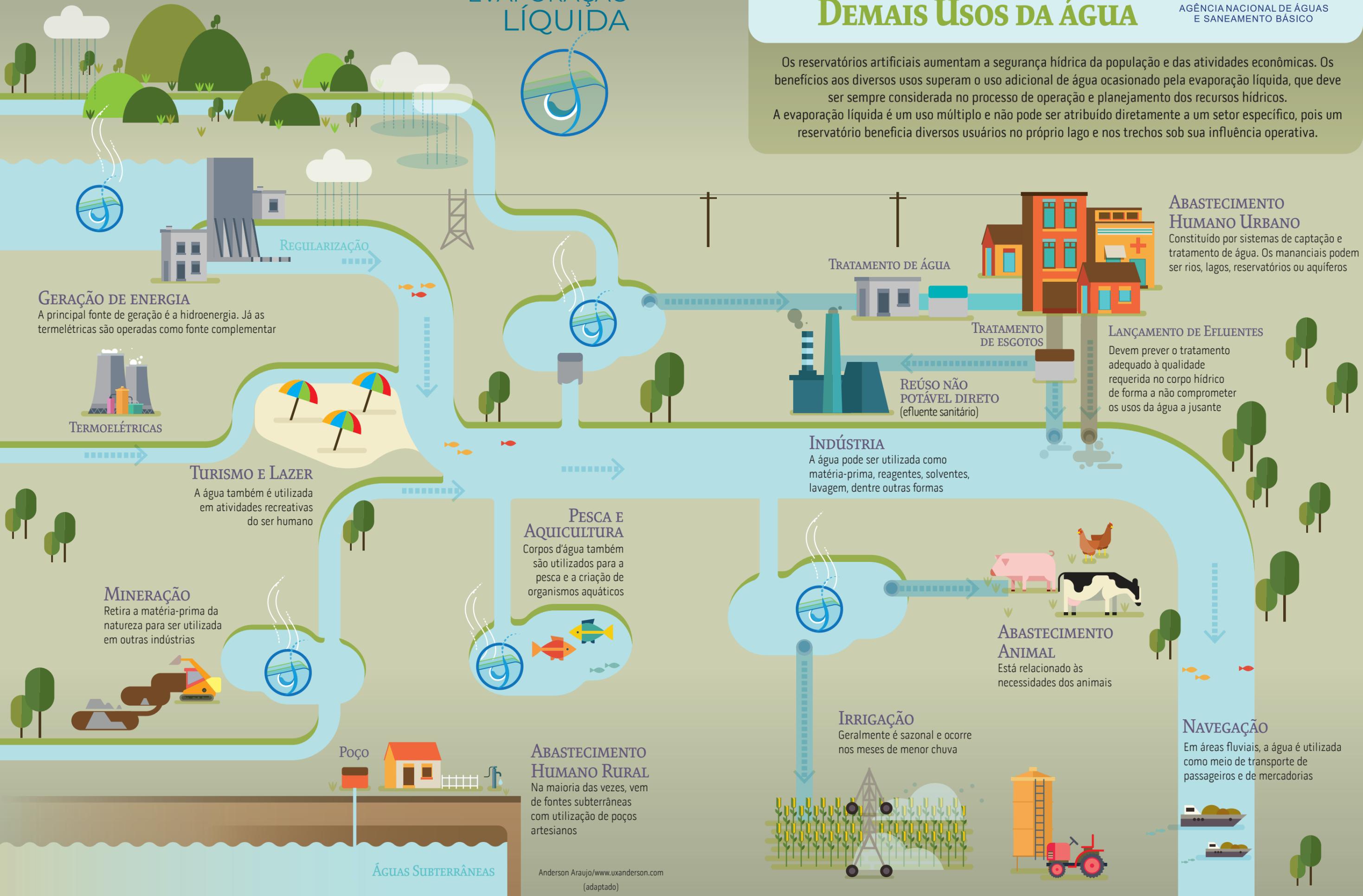
projetos de pesquisa futuros poderão se debruçar sobre o desafio de atribuição e benefícios aos diversos setores.

Informações quantitativas de evaporação e/ou evapotranspiração, que constituem importante fase do ciclo hidrológico, são utilizadas na resolução de numerosos problemas que envolvem o manejo d'água (ONS, 2004). Conforme destacado pelo ONS em seu relatório sobre **Evaporações Líquidas em Usinas Hidrelétricas**, os dados de evaporação são utilizados de duas formas principais nos estudos de planejamento da operação e da expansão energética: na simulação de **operação de reservatórios** e na obtenção das séries de **vazões naturais** nos locais de aproveitamentos hidrelétricos. O montante perdido ou consumido se traduz de forma linear em perda energética nas usinas hidrelétricas (ONS, 2004).

A magnitude do volume consumido por evaporação líquida e a perspectiva aberta no presente estudo de sua estimativa **não apenas para os empreendimentos interligados ao SIN**, mas para **toda a superfície de reservatórios em uma bacia hidrográfica**, abre um vasto campo para o aprimoramento do **balanço hídrico superficial** (relação oferta - demanda hídrica) e dos mecanismos de **alocação de água**, notadamente no Semiárido. Isso beneficiará a gestão e o planejamento dos recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável dos setores usuários.

EVAPORAÇÃO LÍQUIDA

Os reservatórios artificiais aumentam a segurança hídrica da população e das atividades econômicas. Os benefícios aos diversos usos superam o uso adicional de água ocasionado pela evaporação líquida, que deve ser sempre considerada no processo de operação e planejamento dos recursos hídricos. A evaporação líquida é um uso múltiplo e não pode ser atribuído diretamente a um setor específico, pois um reservatório beneficia diversos usuários no próprio lago e nos trechos sob sua influência operativa.



Evaporação de reservatórios no meio técnico-científico

Publicações científicas

Em Bakken et al. (2016) o consumo de água dos reservatórios foi estimado pela evaporação total do reservatório na fase de operação. Uma das principais limitações metodológicas destacadas é a ausência de orientações precisas sobre a atribuição do consumo de água em reservatórios multiusuários. Os autores propõem um método de atribuição do consumo proporcional ao volume de água demandado por cada setor usuário do reservatório e destacam que a definição da abrangência espacial do sistema e a consequente determinação das atividades beneficiadas pelo reservatório é determinante na qualidade dos resultados. Em muitos casos o reservatório regulariza a vazão e assegura a disponibilidade de água ao longo do ano proporcionando vazão regularizada para áreas a muitos quilômetros a jusante da barragem. Nesses casos apenas parte do uso da água se dá pela retirada direta do reservatório. Assim, os limites espaciais de identificação de usuários e atribuição do consumo de água, devem considerar o reservatório e todas as áreas a jusante que dele se beneficiam.

Em estudo sobre o uso da água em usinas hidrelétricas, Grubert (2016) afirma que o consumo de água é associado às perdas por evaporação e a percolação. Considera-se, portanto, que a evaporação líquida é a forma mais apropriada de se estimar o uso da água pelos reservatórios. Para apoiar essa afirmação a autora cita a norma da International Organization for Standardization (ISO) número 14.046:2014, que trata da avaliação da pegada hídrica de produtos diversos, e considera que a mudança na evaporação causada por mudança de uso da terra é considerada consumo da água. Nesse sentido considera que, embora a evaporação real seja importante para análises regionais de balanço hídrico, a evaporação líquida reflete de forma mais adequada a apropriação da água pelos usos relacionados aos reservatórios. O trabalho estimou a evaporação líquida para reservatórios com uso predominante para a atividade hidrelétrica e atribuiu todo o uso consuntivo considerando o uso principal do reservatório.

Lee et al. (2018) avaliaram o consumo de água na ge-

ração de energia hidrelétrica e termelétrica nos Estados Unidos. Definem o consumo da água, em termos gerais, como a quantidade de água que se torna indisponível para outros usos da água em uma mesma região. No caso do uso da água em hidrelétricas, os autores ponderam que a vazão de água que passa pelas turbinas não é considerada consumo porque pode ser utilizada a jusante enquanto a água dos reservatórios, armazenada com a função de gerar energia, é parcialmente consumida pela evaporação e continua disponível para outros usos na mesma região. Para a estimativa do consumo de água dos reservatórios os autores adotaram a evaporação líquida e em reservatórios com múltiplos usos atribuíram o volume consumido utilizando como critérios de ponderação o benefício econômico de cada setor usuário do reservatório.

Liu et al., (2015) estimaram o consumo da água em 875 reservatórios na China, sendo 209 com uso relacionado à geração hidrelétrica. Conceituam o consumo da água como a parcela da água usada que evapora ou é incorporada em produtos e consideram que para reservatórios o consumo é dado pela evaporação bruta. Os autores reconheceram a necessidade de atribuir o consumo da água para múltiplos setores e utilizam o benefício econômico dos usuários de cada reservatório como critério para divisão do consumo dos reservatórios.

Estudo também realizado na China por Xie et al. (2019) abordou o consumo de água por 300 usinas hidrelétricas. Os autores afirmam que na geração de energia hidrelétrica o consumo da água ocorre pela evaporação do reservatório e é definido pela evaporação líquida. A alocação do consumo para usuários de reservatórios multiusuário foi realizada com base na ordem de prioridade e no número total de usuários de cada reservatório.

Com uma abordagem ligeiramente diferente e focada no setor elétrico, Bakken et al (2017) apresenta uma revisão e avaliação de resultados obtidos na literatura internacional. Os autores afirmam que o consumo da água pelo setor hidrelétrico pode ser calculado pelos volumes de evaporação anual divididos pela geração de energia anual. Por outro lado, partindo de uma visão mais ampla da função do reservatório, Hogeboom et al., (2018) realizaram um estudo para estimar a pegada hídrica de 2.235

reservatórios artificiais de todo o mundo e atribuir o consumo de água aos setores beneficiados pelos reservatórios. Consideram a evaporação bruta como o uso consuntivo do reservatório e utilizam o valor econômico como fator de ponderação para divisão do consumo entre usuários.

No Brasil, Coelho et al., (2017) estimaram o consumo de água de dois reservatórios do estado do Tocantins (Tucuruí e Lajeado). Os autores utilizaram, de forma comparativa, a evaporação bruta, líquida e o balanço hídrico como forma de aproximação ao consumo efetivo de água. Concluem que a evaporação líquida é mais adequada para caracterizar o consumo de água da atividade dependente do reservatório por caracterizar o efeito específico da alteração da disponibilidade hídrica. Os autores associam todo o consumo de água à geração de energia, que é a função principal dos reservatórios analisados, mas reconhecem que a alocação do consumo para os demais usuários dos reservatórios seria necessária para melhor caracterizar o uso da água em reservatórios que possuem multiusuários.

Agências governamentais e internacionais

Os trabalhos desenvolvidos por órgãos internacionais apresentam em geral escala global, regional ou de países. Enquanto órgãos como a **FAO** e o **IPCC** tendem a abordar problemas globais, há instituições que focam em problemas de planejamento de recursos hídricos de países específicos, tal como o **NREL** (*National Renewable Energy Laboratory* - U.S. *Department of Energy Laboratory*).

Essas instituições consideram que em geral existe consumo da água pelos reservatórios e destacam o fato de haver múltiplos usuários associados a essas estruturas. No entanto, citam que a disponibilidade de dados sobre reservatórios é frequentemente um fator limitante na aplicação dos métodos, afetando a confiabilidade dos resultados.

A FAO mantém um programa com informações globais sobre água e agricultura. Este sistema foi denominado **AQUASTAT** (FAO, 2019) e compila, analisa e distribui informações setoriais destinadas ao desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada. Dentre as informações organizadas e disponibiliza-

das pelo AQUASTAT está a base mundial georreferenciada de barragens. O inventário conta com a localização, altura, capacidade, área e finalidade para mais de 14 mil reservatórios no mundo.

No AQUASTAT, o consumo da água por massas d'água artificiais é destacado considerando que nos reservatórios artificiais a evaporação da água é maior do que na superfície natural que havia no local. Essa diferença ocasiona o uso consuntivo. Nesse contexto, a FAO realizou a estimativa de evaporação para todos os reservatórios presentes na base mundial de barragens do AQUASTAT. Kohli & Frenken (2015) destacam que o estudo é um primeiro esforço de estimar o uso consuntivo de reservatórios artificiais em nível global. O método utilizado considerou diversas estimativas secundárias de dados dos reservatórios, pois nem todos dispunham das informações necessárias para o cálculo da evaporação. Os autores apontam que essa indisponibilidade de dados básicos dos reservatórios, como a área da massa d'água, resultam em incertezas nos valores de evaporação estimados. Portanto, o trabalho representou uma aproximação da ordem de magnitude do consumo por evaporação.

O **IPCC** lançou em 2011 um relatório especial intitulado *Renewable Energy Sources and Climate Mitigation*. O documento listou potenciais fontes de energia alternativas ao uso de combustíveis fósseis e comparou os impactos de cada tecnologia. O documento destaca que mesmo os reservatórios que são operados por usinas hidrelétricas frequentemente estão relacionados a múltiplos usuários da água e, assim, beneficiam o abastecimento humano, a irrigação, o controle de cheias e secas e a navegação, além do seu propósito de geração de energia.

A comparação dos dados disponíveis analisados pelo IPCC (2011) indica que o consumo de água por evaporação em reservatórios hidrelétricos supera as taxas de outras tecnologias como energia nuclear e termelétricas (carvão, gás e biomassa). Por outro lado, ressalta que os dados de consumo de água na geração da energia hidrelétrica são provenientes de poucos estudos e que foram estimados a partir da evaporação bruta.

O **NREL** analisou comparativamente o consumo de água por evaporação na geração de energia por usu-

nas termelétricas e hidrelétricas nos EUA. O principal consumo de água de termelétricas ocorre por evaporação no processo de resfriamento e esse setor é muito mais expressivo nos EUA do que no Brasil. No caso das usinas hidrelétricas, o volume de água que gera energia passando pelas turbinas não é considerado consumo, enquanto o aumento da área superficial do reservatório, quando comparado com a condição natural anterior, resulta na evaporação adicional da água da superfície. Portanto, a evaporação em reservatórios hidrelétricos é considerada uso consuntivo (Torcellini et al., 2003). Os autores estimaram a diferença entre a evaporação na condição natural dos rios e na condição atual para dois grandes reservatórios: Hoover e Glen Canyon. Os resultados demonstraram que a evaporação estimada para a condição natural, com os rios, representaria apenas 3,2% da evaporação estimada para a condição atual com reservatórios.

Torcellini et al. (2003) destacam que a regularização de vazão propiciada pelos reservatórios de hidrelétricas permitiu, dentre outros, o desenvolvimento e a ampliação da rede de usinas termelétricas que demandam vazão constante para resfriamento, evidenciando o **benefício difuso dos reservatórios**. No entanto, o trabalho não se propôs a alocar o consumo da água entre os usuários dos reservatórios, ressaltando a dificuldade metodológica dessa estimativa.

A importância do desenvolvimento de metodologias para contabilização de recursos hídricos na interface entre economia e meio ambiente levou a diversos organismos internacionais (*United Nations Statistics Division - UNSD, Food and Agriculture Organization, International Water Management Institute*, dentre outros) e órgãos governamentais de gestão de recursos hídricos a desenvolverem modelos conceituais padronizados de referência e aplicação na lógica dos **Sistemas de Contas Nacionais (SCN)**. O SCN apresenta informações sobre a geração, a distribuição e o uso da renda no País e permite uma avaliação global das atividades econômicas.

No Brasil, o IBGE é o responsável pela publicação dos resultados dentro do padrão internacional estabelecido por Nações Unidas, Banco Mundial, Comissão Europeia, Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico e Fundo Monetário

Internacional, formalizado na publicação intitulada *System of National Accounts*.

Recentemente, a ANA, o IBGE e a Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente (SRHQ/MMA) apresentaram as séries históricas das **Contas Econômicas Ambientais da Água (CEAA) no Brasil**, cobrindo o período de 2013 a 2015 (ANA, 2019b) e de 2013 a 2017 (ANA & IBGE, 2020). As Contas da Água reiteram a relevância e atualidade desta agenda no contexto de gestão de recursos hídricos dada a interface entre economia e meio ambiente.

O **Sistema de Contas Econômicas e Ambientais é um sistema satélite do SCN**, onde a partir de metodologias padronizadas busca-se contabilizar os recursos naturais (i.e. água, floresta, ecossistemas) e associá-los às atividades econômicas em uma estrutura única que permita a análise integrada de dados ambientais e econômicos. Especificamente para as Contas de Água, diversos são os modelos e métodos disponibilizados por organismos internacionais que podem ser aplicados, dentre os quais se destacam o *System of Environmental Economic Accounting for Water (SEEA-Water)* (UN, 2012) – modelo utilizado para a elaboração das Contas da Água do Brasil – e o *Water Accounting Plus (WA+)* (do *International Water Management Institute - IWMI*).

As definições de reservatórios artificiais adotadas no **SEEA-Water** (UN, 2012) e **WA+** (Karimi et al., 2013) consideram a proposta da **World Commission on Dams - WCD** (2000), onde define-se como qualquer área que possua alguma forma de armazenamento de água, regulação ou controle de nível da água, tenha sido construída pelo ser humano e seja destinada a um determinado uso que, em geral, é oriundo de uma atividade econômica (i.e. irrigação, abastecimento, geração de energia, contenção de cheias, entre outros).

Por convenção, a **UNSD** (2012) recomenda que reservatórios artificiais e canais artificiais podem ser considerados como parte de recursos hídricos interiores (i.e. meio ambiente) ao invés de ter sua dinâmica contabilizada como um ativo econômico. Por outro lado, a própria UNSD (2012) indica que reservatórios artificiais representam um caso particular dentro da lógica de modelos como o SEEA-Water

(UN, 2012) em função da contabilização do uso da água estar na interface entre a economia e o meio ambiente. A princípio, os fluxos de entrada e saída de água de reservatórios são contabilizados como estoques naturais, porém, cita-se que a água armazenada nos reservatórios artificiais é resultado de uma demanda produtiva, isto é, a partir do momento em que o barramento é construído, tem-se início um processo de operação e gestão com o objetivo de regulação de sua dinâmica para um determinado uso. A partir do entendimento básico adotado no **SEEA-Water** (UN, 2012), compreende-se ainda que a água passa a ser contabilizada como parte da economia a partir da sua abstração do meio ambiente.

A respeito desta complexidade conceitual sobre a definição do uso da água em reservatórios artificiais e processos hidrológicos associados, Nagy et al., (2009) publicaram as principais conclusões obtidas no *14th Meeting of the London Group on Environmental Accounting* (2009). Esse grupo de discussão reúne especialistas de agências nacionais de estatística e organizações internacionais para o compartilhamento de experiências no desenvolvimento e implementação de Contas Ambientais.

Como resultado das discussões sobre a contabilização dos usos de água em reservatórios artificiais, o documento técnico intitulado *Water in artificial reservoir - a produced asset?* afirma que as alterações no ciclo hidrológico causadas pelos reservatórios e a sua contabilização como parte "natural" da interação entre recursos hídricos interiores e a atmosfera pode levar a distorções com relação à situação real e podem ter implicações significativas na gestão de recursos hídricos, como por exemplo: alocação de água, cálculo de indicadores associados a produtividade hídrica e consumo efetivo de água na operação de reservatórios (Nagy et al., 2009).

Nesta perspectiva, os processos associados ao enchimento e gestão de reservatórios artificiais deveriam ser considerados como processos produtivos, não sendo considerados como parte do meio ambiente. Os autores ainda especificam que, dentro da lógica dos Sistemas de Contas Ambientais, os fluxos estabelecidos entre os reservatórios artificiais e outros recursos naturais (p.ex. precipitação incidente) devem ser contabilizados como fluxos entre o meio

ambiente e a economia. A perda de água dos reservatórios via processos evaporativos ou retiradas deveria ser contabilizada como um fluxo da economia para o meio ambiente (Nagy et al., 2009). Perspectiva semelhante é recomendada em **WCD** (2000), devido ao seu significativo volume, comparando com as retiradas para diversos usos de água, a evaporação líquida também pode ser considerada como um uso consuntivo de água.

A *Water Accounting Plus (WA+)* possui como objetivo fornecer informações espaciais sobre o uso de água em bacias hidrográficas. Configura-se como uma metodologia para contabilização de fluxos e estoques de água na paisagem a partir de produtos de sensoriamento remoto, onde a evaporação líquida de reservatórios é contabilizada como parte das retiradas totais de água do meio ambiente, seguindo a lógica de retiradas dos diversos setores usuários (Karimi et al., 2013).

De maneira geral, as metodologias para contabilização dos recursos naturais de um país, como nas Contas de Água, constituem uma ferramenta com potencial para melhorar o gerenciamento dos recursos hídricos, fornecendo informações básicas e definições padronizadas para a derivação de muitos indicadores relacionados à água e um banco de dados estruturado para informações econômicas e hidrológicas.

Dentro da perspectiva do conjunto de indicadores recomendados para estimativa a partir das metodologias de Contas da Água abordadas acima e da forma de contabilização dos processos relacionados à operação de reservatórios artificiais, a **European Environmental Agency - EEA** (2013) indica que a evaporação líquida de reservatórios naturais deve ser contabilizada como uso da água. Assim, considerando a relação com o uso de água, estes volumes devem ser contabilizados para o cálculo de indicadores associados ao estresse hídrico e à avaliação da pressão da economia sobre os recursos hídricos, como por exemplo o *Water Exploitation Index (WEI)* que indica uma forma de monitoramento do uso da água como percentual do total de recursos hídricos renováveis (i.e., águas superficiais e subterrâneas) em um determinado tempo e espaço.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ilha no lago da UHE Chavantes - rio Paranapanema -
entre Carlópolis (PR) e Fartura (SP)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA

A água armazenada em um reservatório é parcialmente consumida pela evaporação, tornando-se indisponível para outros usos/usuários no mesmo local e tempo. Dada pela diferença entre a evaporação real e a evapotranspiração que ocorreria naturalmente no mesmo local, a **evaporação líquida constitui-se em importante uso consuntivo múltiplo da água**. É uma informação crucial para o planejamento e a gestão da água – tanto no âmbito do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) quanto nos setores da economia onde a água é insumo essencial.

O controle de demandas hídricas, a operação da infraestrutura existente e o planejamento da infraestrutura complementar (verde e cinza) requerem **estimativas cada vez mais precisas sobre os diversos usos**, especialmente em cenários momentâneos de escassez hídrica e crise energética ou em cenários mais persistentes de mudanças do clima. A avaliação dos usos torna-se ainda mais relevante em bacias hidrográficas ou sistemas hídricos onde o volume de água para atendimento aos diversos usos é próximo à disponibilidade hídrica.

Historicamente, a evaporação líquida é considerada no dimensionamento de reservatórios e no planejamento e na operação do setor elétrico – por exemplo, na reconstituição das séries de vazões naturais. O Sistema para Cálculo da Evaporação Líquida para os Reservatórios do Sistema Elétrico Brasileiro (SisE-vapo) tem sido uma importante referência nas últimas décadas. A metodologia vigente no setor considera seus reservatórios e taxas fixas de evaporação, baseadas em normais ou médias climatológicas, aplicando-as às áreas observadas diária ou mensalmente; além disso, considera métodos diferentes para o subsistema Nordeste em relação aos demais aproveitamentos do País.

Na esfera dos recursos hídricos, por outro lado, a evaporação líquida ainda é pouco incorporada explicitamente, o que se deve, em boa medida, à dificuldade de quantificação em um país de dimensões continentais como o Brasil, com uma **grande quantidade de reservatórios artificiais que ocupam uma área considerável**. A heterogeneidade hidroclimática, a consistência de dados meteorológicos, a escala cartográfica e a qualidade dos mapeamentos de massas d'água são alguns dos aspectos desafiadores para estimativas robustas.

Cientes desse desafio das estimativas da **evaporação líquida como uma lacuna de conhecimento para a segurança hídrica** dos setores econômicos e do abastecimento humano, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA e a Universidade Federal do Paraná – UFPR uniram esforços em um projeto de pesquisa, que apresenta resultados inéditos para um conjunto de **cerca de 175**

mil reservatórios no território nacional, atualizando e aprimorando expressivamente os estudos do setor elétrico e da ANA.

O método desenvolvido possui base física e é capaz de lidar com a disponibilidade e a qualidade de dados no território nacional, incorporando dados de sensoriamento remoto processados em larga escala – a temperatura da água no lago, por exemplo, é obtida diariamente e para cada reservatório. Grande esforço foi aplicado na consistência, no preenchimento e no tratamento das bases de dados que subsidiam o modelo de evaporação em lago, denominado **SELET – Sistema de Evaporação em Lago Embasada na Temperatura da Superfície**.

Como resultado agregado, **a evaporação líquida consumiu 885.000 litros de água a cada segundo em 2019** (ou um volume anual de 27,9 trilhões de litros), em uma superfície média de 39.950 km² – uma taxa média de **22 litros por segundo por km² de superfície**. Neste ano, 114 reservatórios apresentaram evaporação líquida superior a 500 litros por segundo (0,5 m³/s) e somaram vazão média anual de 666 m³/s (75% do total nacional).

Os resultados atualmente produzidos, portanto, representam importante desenvolvimento em termos de metodologia, representatividade e acessibilidade às estimativas de evaporação líquida no Brasil. Ao mesmo tempo, abrem **oportunidades de aprimoramento contínuo** em consonância com o desenvolvimento das geotecnologias e de novos produtos de sensoriamento remoto.

O trabalho e suas futuras atualizações também contribuem para o aprimoramento da **base nacional de massas d'água** mantida pela ANA que, além de mapeamentos cada vez mais detalhados, passa a contar com maior nível de preenchimento de atributos, como as datas de construção ou enchimento de reservatórios e indicadores de variação de área.

A incorporação da evaporação líquida será valiosa em **instrumentos de planejamento** como o Plano Na-

cional de Segurança Hídrica, os Planos Decenais de Expansão de Energia, o Plano Nacional de Energia e o novo Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH 2022-2040) – este um instrumento-chave do novo ciclo de implementação da Política de Recursos Hídricos. Parcerias e arranjos institucionais poderão ser fortalecidos no aprimoramento das estimativas e na sua disponibilização aos decisores.

As recentes **Resoluções ANA n° 92 e 93**, de 2021, aprovaram, respectivamente, as séries históricas e as projeções futuras de vazões para usos consuntivos a montante de 545 aproveitamentos hidrelétricos (em operação ou em estudo). Trata-se de informação essencial, por exemplo, ao processo de reconstituição de vazões naturais e aos estudos de planejamento energético e de recursos hídricos. As resoluções incluíram mecanismos de atualização periódica para incorporar aprimoramentos nas bases de dados e novos anos às séries ou projeções. Os novos dados de evaporação líquida são, assim, um subsídio adicional às mesmas aplicações.

Também em 2021 – apenas dois anos após o lançamento do **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil** – a ANA atualiza de forma expressiva a base técnica dos três maiores usos da água no Brasil, cujos resultados foram divulgados por meio do **Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada**; do **Atlas Águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**; e da presente **Evaporação Líquida de Reservatórios Artificiais no Brasil**.

A ANA continuará investindo esforços na atualização e melhoria da base técnica sobre os diversos usos da água, alinhada com sua atribuição de manter atualizado o diagnóstico sobre os diversos usos da água e com sua **missão de garantir a segurança hídrica para o desenvolvimento sustentável do Brasil**.

Atualizações e conteúdos adicionais sobre a evaporação líquida no Brasil e sobre os diversos estudos e bases de dados da ANA podem ser acessados no portal do **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH** (<http://snirh.gov.br/>).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and drainage paper 56**. Food and Agriculture Organization, Rome, 1998.

ALLEN, R. G., TASUMI, M., MORSE, A., TREZZA, R., WRIGHT, J. L., BASTIAANSEN, W., ROBISON, C. W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 133(4), 395-406, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019a.

_____. **Contas Econômicas Ambientais da Água (CEAA) no Brasil 2013-2015**. Brasília: ANA, 2019b.

_____. **Atualização da Base de Dados Nacional de Referência de Massas d'Água**. [s.l.] ABrasília: ANA, 2020a.

_____. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada – 2ª Ed.** Brasília: ANA, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) & IBGE. **Contas econômicas ambientais da água: Brasil: 2013 – 2017, 2020b**.

ANDERSON, E. R. Energy-budget studies. In: **Water-loss investigations: Lake hefner studies**, Technical Report, p. 71-119. 1954.

ARMANI, F.A.S., DIAS, N.L., DAMÁZIO, J.M. Eddy-covariance CO₂ fluxes over Itaipu Lake, Southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 25, 1-14. 2020.

ASSOULINE, S., MAHRER, Y. Evaporation from lake Kineret 1. Eddy correlation system measurements and energy budget estimates. **Water Resources Research**, 29(4), 901-910, 1993.

BAKKEN, T. H.; KILLINGTVEIT, A.; ALFREDSEN, K. The Water Footprint of Hydropower Production – State of the Art and Methodological Challenges. **Global Changes**, v. 1, n.5, p. 1-8, 2017.

BAKKEN, T. H.; MODALH, I. S. RAADAL, H. L.; BUSTOS, A. A.; ARNOY, S. Allocation of water consumption in multipurpose reservoirs. **Water Policy**, n. 18, p. 932-947, 2016.

BASTIAANSEN, W. G., MENENTI, M., FEDDES, R. A., HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, 212, 198-212, 1998.

BEAUDOING, H.; RODELL, M. **GLDAS Noah Land Surface Model L4 3 hourly 0.25 x 0.25 degree V2.1**. Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2020.

BECKER, M. W.; DAW, A. Influence of lake morphology and clarity on water surface temperature as measured by EOS ASTER. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 3, p. 288-294, 30 nov. 2005.

BOUCHET, R. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. **Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub.**, v. 62, p. 134-142, 1963.

BRUIN, H. A. R. DE; KEIJMAN, J. The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Netherlands. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, p. 898-903, 1979.

BRUTSAERT, W.; STRICKER, H. An Advection-Aridity Approach to Estimate Actual Regional Evapotranspiration. **Water Resources Research**, v. 15, n. 2, p. 443-450, 1979.

BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water Resources Research**, 11, 742-744, 1975.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere**. Dordrecht: D. Reidel, 1982.

BRUTSAERT, W. **Hydrology**. an introduction. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.

BUSSIÈRES, N.; VERSEGHY, D.; MACPHERSON, J. I. The evolution of AVHRR-derived water temperatures over boreal lakes. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 3, p. 373–384, 2002.

CANCELLI, D. M.; DIAS, N. L.; CHAMECKI, M. Dimensionless criteria for the production–dissipation equilibrium of scalar fluctuations and their implications for scalar similarity. **Water Resources Research**, v. 48, p. W10522, 2012.

CLEVELAND, W. S.; DEVLIN, S. J. Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting. **Journal of the American Statistical Association**, v. 83, n. 403, p. 596–610, 1988.

CLEVELAND, W. S. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. **Journal of the American Statistical Association**, v. 74, n. 368, p. 829–836, 1979.

COELHO, C. D., SILVA, D. D. D., SEDIYAMA, G. C., MOREIRA, M. C., PEREIRA, S. B., LANA, Â. M.. Estimates of monthly and annual evaporation rates and evaporated volumes per unit time in the Tucuruí-PA and Lajeado-TO hydroelectric power plant reservoirs based on different methods. **Engenharia Agrícola**, 38, 38–46, 2018.

COELHO, C.D.; SILVA, D. D.; SEDIYAMA, G. C.; MOREIRA, M. C., PEREIRA, S. B.; LANA, A.M.Q. Comparison of the water footprint of two hydropower plants in the Tocantins River Basin of Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 164–175, 2017.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). **ERA5**: Fifth generation of ECMWF atmospheric re-analyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS).

DIAS, N. L.; KAN, A. Evaporação líquida no reservatório de Foz do Areia, PR: Estimativas dos modelos de relação complementar versus balanço hídrico sazonal e balanço de energia. **Revista Brasileira de**

Recursos Hídricos, v. 13, p. 31–43, 2008.

DIAS, N. L., MALHEIROS, A. L. Resultados de 2 anos de medição de evaporação no lago de itaipu com o método de covariâncias turbulentas atenuadas: Comparação com o balanço de energia, sazonalidade e episódios de evaporação intensa. In CD-rom, **XV Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos**. Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

DIAS, N. L., REIS, R. J. Métodos de cálculo do balanço de entalpia em lagos e erros associados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 3(3), 45–56, 1998.

DIAS, N. L., ROCHA, L. S. Cálculo da taxa de variação da entalpia para os lagos de Itaipu e Foz do Areia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 4(3), 39–52, 1999.

DIAS, N. L., VISSOTTO, D. The effect of temperature–humidity similarity on Bowen ratios, dimensionless standard deviations, and mass transfer coefficients over a lake. **Hydrological Processes**, 31(2), 256–269. Wiley–Blackwell, 2017.

DUARTE, H. F., DIAS, N. L., MAGGIOTTO, S. R. Assessing daytime downward longwave radiation estimates for clear and cloudy skies in Southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, 139, 171–181, 2006.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (EEA). **Implementing Water Assets Accounts in the EEA area**, 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The ETo Calculator – Reference Manual, version 3.2**. Rome: FAO, 2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **AQUASTAT**: FAO's Global Information System on Water and Agriculture. Rome: FAO, 2019.

FARR, T.G., ROSEN, P.A., CARO, E., CRIPPEN, R., DURAN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M., BURBANK, D., ALSDORF, D.E., **The shuttle radar topography mission**: Reviews of Geophysics, v. 45, no. 2, RG2004, 2007.

FISCHMANN, F. **Estimativa da pegada hídrica de aproveitamentos hidrelétricos no Sul do Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFSC: Florianópolis/SC, 140 p., 2016.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 1 – 21, 2015.

GELARO, R.; MCCARTY, W.; SUÁREZ, M.J.; TODLING, R.; MOLOD, A.; TAKACS, L.; WARGAN, K. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, 30(14), 5419–5454, 2017.

GIANNIOU, S. K.; ANTONOPOULOS, V. Z. Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece. **Journal of Hydrology**, v. 345, p. 212–223, 2007.

GRUBERT, E. A. Water consumption from hydroelectricity in the United States. **Advances in Water Resources**, v. 96, p. 88–94, 2016.

HARBECK, G. E., Jr. **A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory** (Professional Paper No. 272–E). U. S. Geological Survey, 1962.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., SIMMONS, A. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 2020.

HOGEBROOM, R. J.; KNOOK, L.; HOEKSTRA, A. Y. The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. **Advances in Water Resources**, v. 113, p. 285–294, 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **14046 – Environmental manage-**

ment: Water Footprint: principles, requirements and guidelines. Geneva, Switzerland, 2014.

KAHLER, D. M.; BRUTSAERT, W. Complementary relationship between daily evaporation in the environment and pan evaporation. **Water Resources Research**, v. 42, p. 2005WR004541, 2006.

KAN, A.; DIAS, N. L. Evaporação, evapotranspiração e evaporação líquida no reservatório de Foz do Areia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 3, p. 29–38, 1999.

KARIMI, P.; BASTIAANSEN, WGM; MOLDEN, D. Water Accounting Plus (WA+) – a water accounting procedure for complex river basins based on satellite measurements. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 7, p. 2459–2472, 2013.

KAY, J. E. et al. Accuracy of Lake and Stream Temperatures Estimated from Thermal Infrared Images. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 5, p. 1161–1175, 2005.

KOHLER, M.; NORDENSON, T.; FOX, W. **Evaporation from pans and lakes**. [s.l.] U.S. Weather Bureau, 1958.

KOHLI, A.; FRENKEN, K. **Evaporation from artificial lakes and reservoirs** (FAO AQUASTAT Reports). Rome: FAO, 2015.

LEE, U.; HAN, J.; ELGOWAINY, A.; WANG, M. Regional water consumption for hydro and thermal electricity generation in the United States. **Applied Energy**, v. 661, p. 661–672, 2018.

LENTERS, J. D.; KRATZ, T. K.; BOWSER, C. J. Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, Northern Wisconsin (USA). **Journal of Hydrology**, v. 308, p. 168–195, 2005.

LI, Z.-L.; TANG, R.; WAN, Z.; BI, Y.; ZHOU, C.; TANG, B.; YAN, G. e ZHANG, X. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. **Sensors**, v. 9, no. 5, p. 3801–3853, 2009.

LIU, J.; ZHAO, D.; GERBENS-LEENES, P. W.; GUAN, D. China's rising hydropower demand challenges water sector. **Scientific Reports**, v. 5, p. 1–14, 2015.

MARCIANO, J. J.; HARBECK, G. E. Mass-transfer studies. In: **Water-loss investigations: Lake Hefner studies**, technical report. [s.l: s.n.], 1954.

MARTENS, B., MIRALLES, D.G., LIEVENS, H., VAN DER SCHALIE, R., DE JEU, R.A.M., FERNÁNDEZ-PRÍETO, D., BECK, H.E., DORIGO, W.A., AND VERHOEST, N.E.C. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. **Geoscientific Model Development**, 10, 1903–1925, 2017.

MARTÍ-CARDONA, B.; PRATS, J.; NICLÒS, R. Enhancing the retrieval of stream surface temperature from Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 224, p. 182–191, 2019.

MCMAHON, T.A.; PEEL, M.C.; LOWE, L.; SRIKANTHAN, R.; MCVICAR, T.R. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using meteorological data: a pragmatic synthesis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.17, p.1331–1363, 2013.

McSHANE, R. R.; DRISCOLL, K. P., SANDO, R. A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents. **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report**, n. 5087, 2017.

LINACRE, E. T. Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 64, n. 3–4, p. 237–256, 1993.

MIRALLES, D.G., HOLMES, T.R.H., DE JEU, R.A.M., GASH, J.H., MEESTERS, A.G.C.A., DOLMAN, A.J.: Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations, **Hydrology and Earth System Sciences**, 15, 453–469, 2011.

MONTEITH, J. Evaporation and the environment. In: **19th Symposium of the Society of Experimental Biology**. Cambridge: Cambridge University Press, 205–234, 1965.

MORTON, F. I.; RICARD, F.; FOGARASI, S. **Operational estimates of areal evapotranspiration and lake evaporation – program WREVAP**. Ottawa, Canada: National Hydrology Research Institute, 1985.

MORTON, F. I. Climatological estimates of evapotranspiration. **J. Hydr. Div. Proc. ASCE**, v. 102, n. HY3, p. 275–291, 1976.

MORTON, F. I. Estimating Evapotranspiration from Potential Evaporation: Practicality of an Iconoclastic Approach. **Journal of Hydrology**, v. 38, p. 1–32, 1978.

MORTON, F. I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 66, p. 1–76, 1983a.

MORTON, F. I. Operational Estimates of Lake Evaporation. **J. Hydrol.**, v. 66, p. 77–100, 1983b.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n.8, p. 1781–1800, 2011

NAGY, M., ALFIERI, A., VARDON, M. Treatment of water in artificial reservoirs. Water in artificial reservoir – A produced asset? **14th Meeting of the London Group on Environmental Accounting**. 2009.

OESCH, D., JAQUET, J. M., KLAUS, R., SCHENKER, P. Multi-scale thermal pattern monitoring of a large lake (Lake Geneva) using a multi-sensor approach. **International Journal of Remote Sensing**, 29(20), 5785–5808, 2008.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS). **Vetores de Evaporação Líquida para o Subistema Nordeste** (ONS-NT-074/2003). Rio de Janeiro: ONS, 2003a.

_____. **Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água nas principais bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN**. Rio de Janeiro: ONS, 2003b.

_____. **Evaporações líquidas nas usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ONS, 2004.

_____. **Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água em bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN**. Rio de Janeiro: ONS, 2005.

PEKEL, J. F., COTTAM, A., GORELICK, N., BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, 540(7633), 418–422, 2016.

PENMAN, H. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **P. R. Soc. London**, A(193), 120–146, 1948.

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

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

REIS, R. J.; DIAS, N. L. Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment. **Journal of Hydrology**, v. 208, p. 135–147, 1998.

SACKS, L., LEE, T., RADELL, M. Comparison of energy-budget evaporation losses from two morphometrically different Florida seepage lakes. **Journal of Hydrology**, 156(1–4), 311–334, 1994.

SCHAEFFER, B. A., IIAMES, J., DWYER, J., URQUHART, E., SALLS, W., ROVER, J., SEEGER, B. An initial validation of Landsat 5 and 7 derived surface water temperature for U.S. lakes, reservoirs, and estuaries. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 22, p. 7789–7805, 17 nov. 2018.

SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; e VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577–591, 2013.

SIMA, S.; AHMADALIPOUR, A.; TAJRISHY, M. Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 374–385, 1 set. 2013.

SINGH, V.; XU, C.-Y. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. **Hydrological Processes**, v. 11, n. 3, p. 311–323, 1997.

STANNARD, D., ROSENBERRY, R. A comparison of short-term measurements of lake evaporation using eddy-correlation and energy budget methods. **Journal of Hydrology**, 122, 15–22, 1991.

STURROCK, A. M., WINTER, T. C., ROSENBERRY, D. O. Energy budget evaporation from Williams Lake: A closed lake in north central Minnesota. **Water Resources Research**, 28(6), 1605–1607, 1992.

TAREK, M.; BRISSETTE, F.P.; ARSENAULT, R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. **Hydrology and Earth System Sciences**, 24(5), 2527–2544, 2020.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, v. 456, p. 12–29, 2012.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geogr. Rev.**, v. 38, p. 55–94, 1948.

TORCELLINI, P; LONG, N; JUDKOFF, R. **Consumptive Water Use for U. S. Power Production**: Technical Report NREL/TP-550-33905. Golden, Colorado: NREL, 2003.

UNITED NATIONS (UN). **System of Environmental and Economic Accounting for Water**. New York: UN, 2012a.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). **UN World Water Development Report 2021 ‘Valuing Water’**. UNESCO, 2021.

UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION (UNSD). **International Recommendations for Water Statistics**. UN, 2012b.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Water-loss investigations:** Lake hefner studies (Geol. Surv. Prof. Paper No. 269). USGS, 1954.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Water-loss investigations:** Lake mead studies (Geol. Surv. Prof. Paper No. 298). USGS, 1958.

VALIPOUR, M. Calibration of mass transfer-based models to predict reference crop evapotranspiration. **AWS**, 7(2), 625–635, 2017.

VANHELLEMONT, Q. Automated water surface temperature retrieval from Landsat 8/TIRS. **Remote Sensing of Environment**, v. 237, p. 111518, 2020.

VIEIRA, N., PEREIRA, S. B., MARTINEZ, M. A., SILVA, D. D. D., SILVA, F. B. Estimativa da evaporação nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias usando diferentes modelos. **Engenharia Agrícola**, 36, 433–448, 2016.

WORLD COMMISSION ON DAMS (WCD). **Dams and development:** A new framework for decision-making: The report of the world commission on dams. Earthscan, 2000.

XIE, X., JIANG, X., ZHANG, T., HUANG, Z. Regional water footprints assessment for hydroelectricity generation in china. **Renewable Energy**, 138, 316–325. Elsevier, 2019.

YUAN, Q., SHEN, H., LI, T., LI, Z., LI, S., JIANG, Y., ZHANG, L. Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. **Remote Sensing of Environment**, 241, 111716, 2020.

ZHAN, W., CHEN, Y., WANG, J., ZHOU, J., QUAN, J., LIU, W., LI, J. Downscaling land surface temperatures with multi-spectral and multi-resolution images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 18, 23–36, 2012.

ZHAO, G.; GAO, H.; CAI, X. Estimating Lake temperature profile and evaporation losses by leveraging MODIS LST data. **Remote Sensing of Environment**, v. 251, p. 112104, 2020.



Lago da UHE Capivara - rio Paranapanema - em Porecatu (PR)
Raylton Alves / Banco de imagens ANA



MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO REGIONAL



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

ISBN: 978-65-88101-20-9



9 786588 101209