

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Aline Bortoluzzi

**Caracterização da pegada hídrica em empreendimentos hidrelétricos na bacia do Rio  
Iguaçu**

Florianópolis  
2024

Aline Bortoluzzi

Caracterização da pegada hídrica em empreendimentos hidrelétricos na bacia do Rio Iguaçu

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental  
Orientador: Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.  
Coorientador: Vinícius Borgo Portal Chagas, Dr.

Florianópolis  
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.

Dados inseridos pelo próprio autor.

Bortoluzzi, Aline

Caracterização da pegada hídrica em empreendimentos hidrelétricos na bacia do rio Iguaçu / Aline Bortoluzzi ; orientador, Pedro Luiz Borges Chaffe, coorientador, Vinícius Bogo Portal Chagas, 2024.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Pegada hídrica. 3. Usinas hidrelétricas. 4. Evaporação. 5. Rio Iguaçu. I. Chaffe, Pedro Luiz Borges. II. Chagas, Vinícius Bogo Portal. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Aline Bortoluzzi

**Caracterização da pegada hídrica em empreendimentos hidrelétricos na bacia do Rio Iguaçu**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitarista e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 10 de dezembro de 2024.

---

Coordenação do Curso

---

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.

---

Vinícius Bogo Portal Chagas, Dr.

**Banca examinadora**

---

Eng. Júlia Mella Massing

---

Eng. Ewerthon Cezar Schiavo Bernardi, Me.

Florianópolis, 2024.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero expressar minha profunda gratidão à minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e compreendendo todas as minhas escolhas. Agradeço especialmente aos meus pais, Vana e Ivaldo, que sempre participaram ativamente da minha jornada acadêmica, com amor, orientação e dedicação. Um agradecimento especial à minha mãe, que estava ainda mais ansiosa pela apresentação deste TCC do que eu mesma. À minha irmã, Júlia, que, com paciência, me acompanhou nos momentos de estresse dessa trajetória. E, claro, ao meu fiel companheiro Toddy, que esteve sempre ao meu lado, seja para brincar ou para estudar, me proporcionando momentos de alívio e carinho. Muito obrigada!

Agradeço imensamente ao professor Pedro, pela oportunidade de ser sua orientanda, pelo tempo dedicado e pelos ensinamentos valiosos ao longo dessa caminhada. Ao Vinícius, que contribuiu de maneira significativa para meu aprendizado.

Sou muito grata à Nova Engevix e toda equipe da Hidráulica, que me proporcionou a oportunidade de trabalhar com Hidráulica e Hidrologia, áreas que me ajudaram a definir meu caminho profissional após a graduação. Agradeço também às minhas colegas de estágio, Lari e Carol, que tornaram essa jornada mais leve e alegre, sempre ao meu lado até o final, ouvindo pacientemente minhas loucuras diárias.

A todos os meus amigos que fiz ao longo da graduação, especialmente Christian, Gabrielli, Jéssica e Rafaela, sou eternamente grata. Vocês foram fundamentais para a conclusão do meu curso e para a minha formação não só acadêmica, mas também pessoal.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina, por proporcionar um ensino público, gratuito e de qualidade. A todos os professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, que com seu conhecimento e dedicação, contribuíram para a minha formação acadêmica e para a realização deste TCC.

## RESUMO

A bacia do Rio Iguaçu se destaca pelo elevado potencial hidrelétrico e pela presença de grandes usinas hidrelétricas instaladas, cujos impactos ambientais incluem o aumento da evaporação nas áreas de implantação dos reservatórios. No entanto, são poucos os estudos que demonstram a interdependência entre água e energia das usinas hidrelétricas e estimam o consumo de água destas instalações. Um indicador amplamente utilizado para comparar os impactos de diferentes atividades sobre a disponibilidade de recursos hídricos é a pegada hídrica. Para empreendimentos hidrelétricos estima o montante de água evaporada por unidade de energia. Este trabalho avaliou a variabilidade temporal da pegada hídrica nos oito empreendimentos hidrelétricos da bacia do Rio Iguaçu, utilizando os métodos WREVAP, BR-DWGD e SELET para o cálculo da evaporação, considerando áreas alagadas e profundidades variáveis. O valor médio da pegada hídrica foi de  $28,75 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$  e  $20,61 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$  para os métodos WREVAP e BR-DWGD, respectivamente, sendo que para o SELET não foi possível calcular devido a resultados negativos de evaporação. Observou-se a presença de sazonalidade nas pegadas hídricas intra- anuais, mas sem padrões claros quando analisadas interanualmente. A caracterização de anos secos e úmidos indicou que usinas com reservatórios de acumulação a montante, que regularizam a vazão, não são tão afetadas pelos efeitos da seca, e a baixa precipitação coincidiu com a alta na pegada hídrica. Além disso, os reservatórios a fio d'água apresentaram pegadas hídricas menores do que as usinas de acumulação. Foram encontradas correlações moderadas entre a pegada hídrica e a área inundada e o nível de água. Esses resultados revelam a importância de considerar os efeitos da evaporação no tipo de reservatório a ser implantado, para aproximar da gestão sustentável dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Pegada hídrica; Usinas hidrelétricas; Rio Iguaçu.

## ABSTRACT

The Iguaçu River Basin stands out for its high hydroelectric potential and the presence of large installed hydroelectric plants, whose environmental impacts include increased evaporation in the areas where the reservoirs are implemented. However, there are few studies that demonstrate the interdependence between water and energy in hydroelectric plants and estimate the water consumption of these installations. A widely used indicator to compare the impacts of different activities on the availability of water resources is the water footprint. For hydroelectric ventures, it estimates the amount of water evaporated per unit of energy. This study evaluated the temporal variability of the water footprint in the eight hydropower plants of the Iguaçu River Basin, using the WREVAP, BR-DWGD, and SELET methods for calculating evaporation, considering flooded areas and varying depths. The average water footprint value was  $28.75 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$  and  $20.61 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$  for the WREVAP and BR-DWGD methods, respectively, while for SELET, it was not possible to calculate due to negative evaporation results. Seasonal variations were observed in the intra-annual water footprints, but no clear patterns were identified when analyzed interannually. The characterization of dry and wet years indicated that plants with upstream storage reservoirs, which regulate flow, are less affected by drought effects. Furthermore, run-of-river reservoirs exhibited lower water footprints than accumulation plants. Moderate correlations were found between the water footprint and the characteristics of the flooded area and the water level. These results highlight the importance of considering evaporation effects when choosing the type of reservoir to be implemented in order to move towards the sustainable management of water resources.

**Keywords:** Water footprint; Hydroelectric plants; Rio Iguaçu.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de energia elétrica no Brasil.....	19
Figura 2 – Quantidade de usinas de geração de energia e potência outorgada .....	20
Figura 3 – Conceito de pegada hídrica aplicado ao nível de bacia, onde estão representadas as PHs verde e azul. ....	21
Figura 4 – Pegadas hídricas totais de diferentes fontes de geração de energia. ....	22
Figura 5 – Modificações no ciclo hidrológico local provocadas pela instalação de uma barragem. Na primeira imagem apresenta um rio com a calha natural, e na segunda um reservatório artificial.....	23
Figura 6 – Mapa de localização da bacia do Rio Iguaçu e a distribuição espacial das usinas hidrelétricas do estudo. ....	28
Figura 7 – Mapa com o clima na bacia do Rio Iguaçu .....	29
Figura 8 – Profundidade média dos reservatórios estudados. ....	30
Figura 9 – Área inundada dos reservatórios estudados. ....	31
Figura 10 – Potência instalada dos reservatórios estudados.....	31
Figura 11 – Nível máximo normal dos reservatórios estudados. ....	32
Figura 12 - Esquema de funcionamento do código do modelo WREVAP. Os módulos presentes no modelo .....	33
Figura 13 – Mapa de localização das usinas hidrelétricas e estações meteorológicas .....	35
Figura 14 – Estimativas médias de evaporação anual nos reservatórios para cada método de cálculo.....	40
Figura 15 - Relação entre altitude do reservatório e evaporação anual, para cada método de cálculo. O tamanho dos círculos é proporcional as áreas superficiais dos reservatórios. ...	41
Figura 16 – Médias anuais de evaporação de cada usina e seu desvio padrão, para cada método de cálculo.....	41
Figura 17 – Comportamento da evaporação média anual da UHE Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto (GBM). ....	42
Figura 18 – Comportamento da evaporação média mensal da UHE Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto (GBM). ....	43
Figura 19 - Variação das AET médias mensais estimadas pelo CRLE de acordo com a variação na profundidade média do reservatório. ....	44



Figura 20 – Comportamento da evaporação média anual da UHE Fundão (FND).....	44
Figura 21 - Comportamento da evaporação média mensal da UHE Fundão (FND).....	45
Figura 22 – Mapa com a pegada hídrica média mensal para os reservatórios. ....	47
Figura 23 – Boxplot com a distribuição das pegadas hídricas estimadas para os aproveitamentos hidrelétricos, WREVAP em vermelho e BR-DWGD em azul.....	50
Figura 24 - Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE SCL para toda série de dados. ....	51
Figura 25 - Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE FND para toda série de dados. ....	51
Figura 26 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE GJR para toda série de dados. ....	52
Figura 27 – Variabilidade interanual da pegada hídrica para a evaporação do BR-DWGD. ....	53
Figura 28 – Variabilidade interanual da pegada hídrica para a evaporação do WREVAP. ....	54
Figura 29 – Pegada hídrica mensal pelo WREVAP com os quartis 25 e 75.....	56
Figura 30 – Pegada hídrica mensal pelo método BR-DWGD com os quartis 25 e 75.....	56
Figura 31 – Pegada hídrica, precipitação e geração ao longo do ano de 2006 para UHE SSN .....	58
Figura 32 – Pegada hídrica, precipitação e geração ao longo do ano de 2015 para UHE SSN .....	58
Figura 33 – Pegada hídrica, precipitação e geração ao longo do ano de 2008 para UHE SOS .....	60
Figura 34 – Pegada hídrica, precipitação e geração ao longo do ano de 2014 para UHE SOS .....	60
Figura 35 – Boxplot do tipo de reservatório pela pegada hídrica.....	64
Figura 36 – Correlação área inundada pela pegada hídrica por Spearman. ....	64
Figura 37 – Correlação potência instalada pela pegada hídrica por Spearman. ....	64
Figura 38 – Correlação do nível de água e pegada hídrica por Spearman. ....	64
Figura 39 – Evaporação anual da UHE GBM. ....	69
Figura 40 – Evaporação mensal da UHE GBM. ....	69
Figura 41 – Evaporação anual UHE GNB.....	69
Figura 42 – Evaporação mensal UHE GNB.....	69

Figura 43 – Evaporação anual UHE SCL.....	69
Figura 44 – Evaporação mensal UHE SCL.....	69
Figura 45 – Evaporação anual UHE FND.....	69
Figura 46 – Evaporação mensal UHE FND.....	69
Figura 47 – Evaporação anual UHE SSN.....	70
Figura 48 – Evaporação mensal UHE SSN.....	70
Figura 49 – Evaporação anual UHE SOS.....	70
Figura 50 – Evaporação mensal UHE SOS.....	70
Figura 51 – Evaporação anual UHE GJR.....	70
Figura 52 – Evaporação mensal UHE GJR.....	70
Figura 53 – Evaporação anual UHE BIG.....	70
Figura 54 – Evaporação mensal UHE BIG.....	70
Figura 55 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE GBM para toda série de dados.....	71
Figura 56 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE GNB para toda série de dados.....	71
Figura 57 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE SSN para toda série de dados.....	72
Figura 58 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE SOS para toda série de dados.....	72
Figura 59 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE BIG para toda série de dados.....	73
Figura 60 – Pegada Hídrica anual UHE GBM.....	74
Figura 61 – Pegada hídrica anual UHE GNB.....	74
Figura 62 – Pegada hídrica anual UHE SCL.....	74
Figura 63 – Pegada hídrica anual UHE FND.....	74
Figura 64 – Pegada hídrica anual UHE SSN.....	74
Figura 65 – Pegada hídrica anual UHE SOS.....	74
Figura 66 – Pegada hídrica anual UHE GJR sem outlier.....	74
Figura 67 – Pegada hídrica anual UHE GJR com outlier.....	74
Figura 68 – Pegada hídrica anual UHE BIG.....	75

Figura 69 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GBM pelo BR-DWGD.....	76
Figura 70 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GNB pelo BR-DWGD.....	76
Figura 71 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SCL pelo BR-DWGD.....	76
Figura 72 – Média mensal da pegada hídrica da UHE FND pelo BR-DWGD.....	76
Figura 73 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SSN pelo BR-DWGD.....	76
Figura 74 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SOS pelo BR-DWGD.....	76
Figura 75 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GJR pelo BR-DWGD.....	76
Figura 76 – Média mensal da pegada hídrica da UHE BIG pelo BR-DWGD.....	76
Figura 77 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GBM pelo WREVAP.....	77
Figura 78 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GNB pelo WREVAP.....	77
Figura 79 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SCL pelo WREVAP.....	77
Figura 80 – Média mensal da pegada hídrica da UHE FND pelo WREVAP.....	77
Figura 81 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SSN pelo WREVAP.....	77
Figura 82 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SOS pelo WREVAP.....	77
Figura 83 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GJR pelo WREVAP.....	77
Figura 84 – Média mensal da pegada hídrica da UHE BIG pelo WREVAP.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das usinas hidrelétricas do estudo .....	30
Tabela 2 – Dados de entrada e suas respectivas fontes do programa WREVAP. ....	34
Tabela 3 – Informações das estações meteorológicas usadas para cada usina .....	35
Tabela 4 – Índice de Classificação de Anomalia (IAP).....	39
Tabela 5 – Comparação estudos anteriores. Evaporação em mm ano.....	46
Tabela 6 – Pegadas hídricas médias mensais estimadas.....	48
Tabela 7 – Variabilidade da pegada hídrica obtidas pela evaporação do WREVAP. ....	48
Tabela 8 – Variabilidade da pegada hídrica obtidas pela evaporação do BR-DWGD.....	49
Tabela 9 – Meses sem geração de energia.....	52
Tabela 10 – Medianas anuais das pegadas hídricas.....	53
Tabela 11 – Índice de anomalia de precipitação (IAP) para a UHE SSN .....	57
Tabela 12 – Índice de anomalia de precipitação (IAP) para a UHE SOS .....	59
Tabela 13 – Resultados das correlações das características .....	61

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....	18
2.2	GERAÇÃO DE ENERGIA NA BACIA DO RIO IGUAÇU.....	19
2.3	PEGADA HÍDRICA .....	20
2.4	PEGADA HÍDRICA EM EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS.....	21
2.5	EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS .....	25
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	28
3.2	CARACTERÍSTICAS DAS USINAS .....	29
3.3	ESTIMATIVA DA PEGADA HÍDRICA .....	32
3.4	ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO.....	33
<b>3.4.1</b>	<b><i>Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and Lake Evaporation - WREVAP</i></b>	<b>33</b>
<b>3.4.2</b>	<b><i>Sistema de Evaporação em Lago Embasada na Temperatura da Superfície - SELET</i></b>	<b>36</b>
<b>3.4.3</b>	<b><i>Daily Gridded Meteorological Variables in Brazil – BR-DWGD</i></b> .....	<b>37</b>
3.5	DADOS OPERACIONAIS .....	37
3.6	CARACTERIZAÇÃO DE ANO SECO E ÚMIDO.....	37
3.7	ANÁLISE DE CORRELAÇÕES ENTRE A PEGADA HÍDRICA E CARACTERÍSTICAS DAS USINAS .....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>40</b>
4.1	ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO.....	40
4.2	ESTIMATIVA DA PEGADA HÍDRICA .....	46

<b>3.4.1</b>	<b>Meses sem Geração de Energia .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Variabilidade Interanual .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Variabilidade Intra-Anual .....</b>	<b>55</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Caracterização da Pegada Hídrica de Anos Secos e Úmidos.....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.5</b>	<b>Correlações com as Características .....</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE A – Estimativas de Evaporação .....</b>	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE B – Pegadas Hídricas com Evaporação e Geração de Energia.....</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE C – Pegadas Hídricas Anuais.....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE D – Pegadas Hídricas Mensais.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A intensa urbanização aliada ao crescimento populacional, vem aumentando a demanda por recursos hídricos em escala global (Tundisi, 2008). A quantidade e qualidade da água ficam comprometidas, resultando em regiões que historicamente contavam com disponibilidade hídrica, à enfrentar problemas como secas prolongadas, ondas de calor, variações sazonais ou mudanças climáticas (Beekman, 2020). Cresce o desafio do gerenciamento e manejo adequado, racional e eficiente administração desse recurso (Tundisi, 2008; Cantelle; Lima; Borges, 2018).

A produção hidrelétrica é um dos setores afetados pela disponibilidade de água. Portanto, surge uma significativa preocupação quanto à sustentabilidade hídrica de hidrelétricas, mostrando a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a interdependência entre água e energia (Scherer; Pfister, 2016; Herath, 2011). A questão de classificar reservatórios e usinas hidrelétricas como usuários consuntivos de água é debatida há anos, tanto no contexto brasileiro quanto global (Bakken *et al.*, 2015). A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) em alguns estudos já considera hidrelétricas como uso consuntivo, pois a água é retirada do ambiente, mesmo parte dela depois sendo devolvida após o uso na geração de energia (ANA, 2017).

Allan Hoekstra em 2002 introduziu o conceito de pegada hídrica, com o propósito de apresentar as relações entre o consumo humano e o uso de água, também entre o comércio global e a gestão de recursos hídricos (Silva *et al.*, 2013). A pegada hídrica surge como um indicador de sustentabilidade ambiental e é definida como o volume de água total usada durante a produção e o consumo de bens e serviços, considerando tanto o consumo direto quanto o indireto no processo de produção (Hoekstra, 1998). A pegada hídrica da hidroeletricidade é a razão entre volume de água evaporada e quantidade de energia gerada (Hoekstra *et al.*, 2011). Herath *et al.* (2011), compararam três diferentes métodos de estimativa de pegada hídrica para 9 usinas na Nova Zelândia, entretanto, ainda não existe uma metodologia fundamentada que seja consenso pela comunidade científica para realizar este cálculo.

A pegada hídrica apresenta uma relação proporcional à evaporação, quanto maior este processo maior a pegada hídrica. Existem diversos métodos listados na literatura para estimar a evaporação de um reservatório, por isso torna-se importante estudos que verifiquem a particularidade e as diferenças dos resultados para um mesmo reservatório. Outra

complexidade, discutida por Bakken (2013), é sobre a alocação da evaporação em reservatórios construídos em cascata, onde o reservatório mais a montante regulariza água para todo o sistema a jusante.

A área alagada é um dos fatores que mais sofre alterações com os períodos de seca em um reservatório, e conseqüentemente no volume de água evaporado. Massing (2021) estimou a pegada hídrica de 132 usinas hidrelétricas no Brasil, adotando a área alagada como constante. Da mesma forma, Fischmann (2016) realizou sua pesquisa considerando a área alagada constante em 41 usinas localizadas na região Sul do Brasil.

Os empreendimentos hidrelétricos são caracterizados por apresentarem pegadas hídricas elevadas, em relação às demais fontes de geração de energia. A pegada hídrica em hidrelétricas depende de fatores climáticos, topográficos, hidrológicos e tecnológicos, tornando-a específica para cada tipo de usina. Dessa forma, a utilização de um valor médio global para caracterizar a pegada hídrica em usinas mostra-se inadequada, frente às grandes diferenças observadas entre os empreendimentos (Hoekstra, 2011).

Entender o comportamento sazonal da pegada hídrica é importante, pois permite avaliar as variações climáticas e operacionais ao longo do ano, e como impactam o consumo de água nos reservatórios, permitindo identificar padrões e períodos mais críticos. Já a análise interanual possibilita ter uma visão da tendência de variações, e como podem se alterar de um ano para outro. Esse conhecimento oferece dados importantes que podem apoiar os tomadores de decisão na gestão dos reservatórios, principalmente em cascata.

A presente pesquisa caracterizou a variabilidade da pegada hídrica de 8 empreendimentos hidrelétricos localizados em cascata na bacia do Rio Iguaçu, considerando sua área alagada variável. A bacia do Rio Iguaçu estende-se desde a capital Curitiba até Foz do Iguaçu, no Paraná, e é a sub-bacia do Rio Paraná com maior potencial de geração de energia.



## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Investigar a variabilidade temporal da pegada hídrica dos empreendimentos hidrelétricos da bacia do Rio Iguaçu.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a sazonalidade da pegada hídrica nas hidrelétricas da bacia do Rio Iguaçu no período de 2000 à 2023;
- Analisar a variabilidade interanual da pegada hídrica;
- Caracterizar a pegada hídrica de um ano seco e um ano úmido;
- Avaliar correlações da pegada hídrica e as características das usinas: tipo de reservatório, nível de água, potência instalada e área inundada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

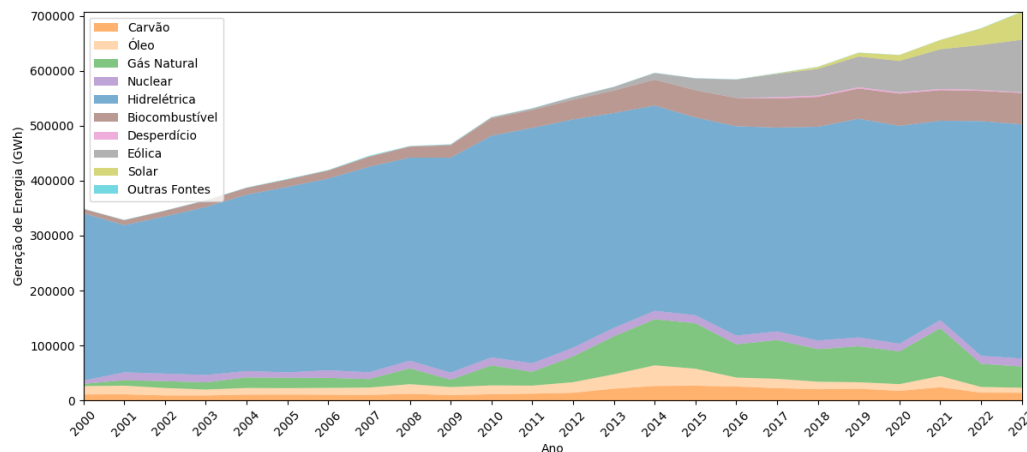
O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte para produção e transmissão de energia elétrica (ANEEL, 2024). Estabelecido em 1998, o SIN conecta quatro grandes subsistemas (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul), permitindo a otimização na geração e distribuição de energia (ONS, 2024). Sua importância está em oferecer um abastecimento seguro, confiável e econômico, integrando diversas fontes, como hidrelétricas, termelétricas, eólicas e solares. A operação do sistema é coordenada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que realiza a gestão em tempo real para garantir que a demanda de energia seja atendida. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão responsável por regular a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Também fiscaliza as concessões, as permissões e os serviços de energia, implementa as políticas e diretrizes do governo federal e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos e promove as atividades de outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica (ANEEL, 2024).

Nas últimas décadas, a matriz energética para a produção de eletricidade tem passado por uma intensa diversificação, em resposta ao crescimento dos níveis de consumo (Walter, 2010 apud Farias; Sellitto, 2011). Fatores como a disponibilidade de recursos, interesses comerciais, domínio tecnológico e a preservação ambiental influenciaram as diferentes escolhas dos países na composição de suas matrizes energéticas. Com a sustentabilidade sendo um tema recorrente nas discussões globais, o estudo de políticas energéticas e ambientais, fontes renováveis de energia e diversificação das matrizes energéticas torna-se essencial para o desenvolvimento sustentável, promovendo crescimento aliado à conservação dos recursos naturais (Lopes; Taques, 2016). No Brasil, o aumento da demanda nacional por energia elétrica, tem incentivado o país a buscar fontes alternativas que possam substituir as convencionais, como o petróleo e o carvão mineral.

De acordo com o relatório da *BloombergNEF's Energy Transition Investment Trends* de 2024, publicado pelo Ministério de Minas e Energia, o Brasil é o sexto país do mundo que mais investe em energia renovável. Grandes usinas hidrelétricas respondem cerca de 80% da geração doméstica de eletricidade, tornando a matriz elétrica brasileira uma das mais limpas do

mundo (IEA, 2021). Na Figura 1 visualiza-se a geração de energia elétrica no Brasil dos anos 2000 até 2023.

Figura 1 – Geração de energia elétrica no Brasil

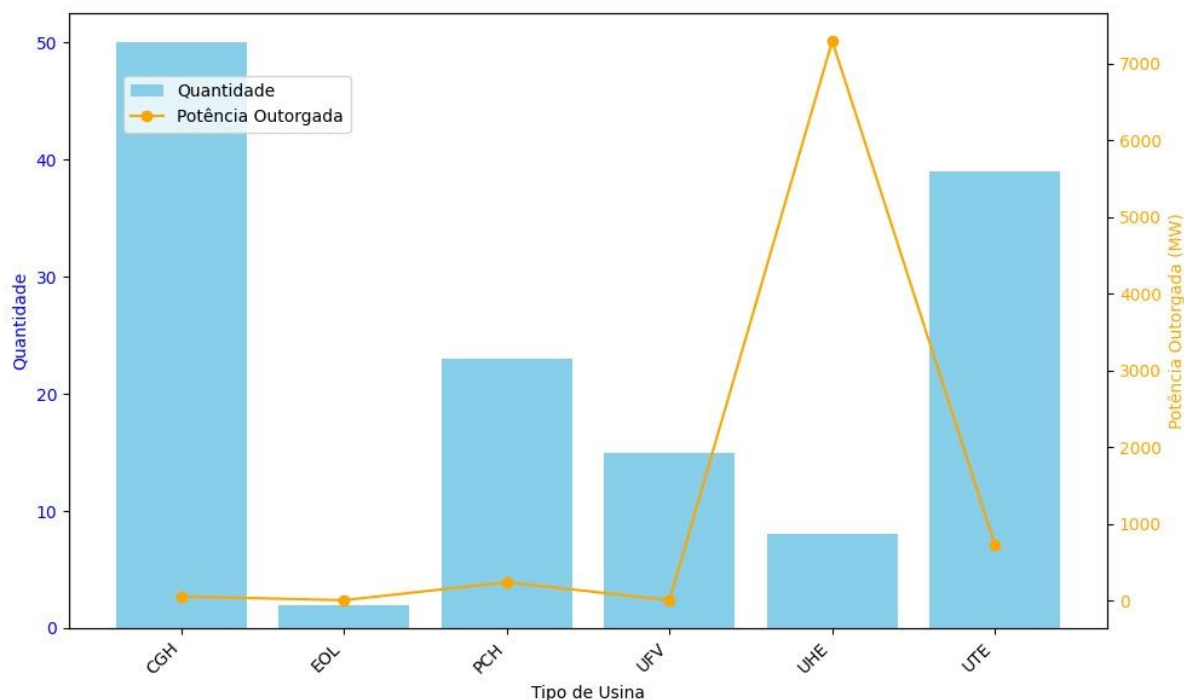


## 2.2 GERAÇÃO DE ENERGIA NA BACIA DO RIO IGUAÇU

A bacia hidrográfica do Rio Iguaçu é a maior do estado do Paraná e atravessa o mesmo no sentido Leste-Oeste iniciando seu curso próximo a Curitiba e tendo sua foz na confluência com o Rio Paraná, na cidade de Foz do Iguaçu. A bacia é subdividida em três regiões, o alto Iguaçu (1º planalto), médio (2º planalto) e o baixo Iguaçu (3º planalto). O grande desnível no terceiro planalto, tornou-se um atrativo significativo para implantação de usinas hidrelétricas, resultando na construção de 5 grandes reservatórios, e vários outros menores, os quais alteram de forma considerável os atributos físicos, químicos e biológicos da região. (Baumgartner, *et al.*, 2012).

No banco de dados SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL, atualizado em novembro de 2024, existem 8 usinas hidrelétricas (UHE), 23 centrais geradoras hidrelétricas (CGH), 12 pequenas centrais hidrelétricas (PCH), 2 usinas eólicas (EOL), 15 usinas fotovoltaicas (UFV) e 39 usinas termoeletricas (UTE), em operação comercial na bacia do Rio Iguaçu, somando pouco mais de 8.300 MW de potência instalada. A Figura 2 ilustra a quantidade de usinas em operação e sua potência outorgada, de acordo com cada tipo.

Figura 2 – Quantidade de usinas de geração de energia e potência outorgada



Fonte dos dados: ANEEL (2024)

Mesmo possuindo somente 8 usinas hidrelétricas, elas chegam a 87,5 % do total da energia gerada na bacia atualmente, seguindo a mesma tendência do resto do país.

### 2.3 PEGADA HÍDRICA

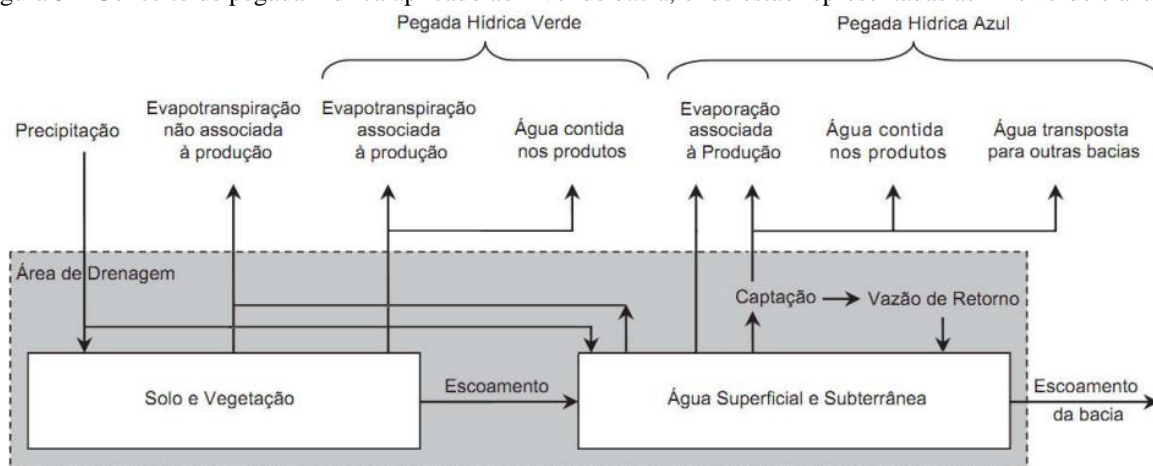
John Anthony Allan em 1998, introduziu o conceito de Água Virtual, sendo definida como água incorporada em *commodities*, ou seja, a água envolvida no processo produtivo de qualquer bem industrial ou agrícola. O autor apresenta que, ao importar determinado produto, um país evita o consumo da quantidade de água necessária para sua produção, sendo esta água utilizada no país de origem.

O termo Pegada Hídrica (PH) surgiu em 2002, por Arjen Hoekstra durante uma reunião de peritos internacionais sobre o comércio de água virtual realizada em Delft, na Holanda. A ideia é análoga à pegada ecológica, embora os conceitos tenham origens distintas. A pegada ecológica é expressa em hectares, enquanto a pegada hídrica é medida em volume de água doce consumida.

A pegada hídrica é um indicador do uso de água que considera não apenas o uso direto de água por um consumidor ou produtor, mas também o uso indireto, ou seja, toda a cadeia de suprimento. Considerando que os recursos de água doce são finitos, a PH é um recurso muito útil, visto que ele mostra quando, onde e como os produtores, consumidores, processos e produtos demandam desse recurso (Bueno, 2014).

No Manual de Avaliação de Pegada Hídrica, de Hoekstra *et al.* (2011), cita que a mesma pode ser classificada como azul, verde e cinza. A pegada hídrica azul corresponde ao uso consuntivo de recursos hídricos superficiais e subterrâneos ao longo da cadeia produtiva de um produto. A verde refere-se ao uso da água da chuva que não gera escoamento superficial. Já a pegada hídrica cinza está relacionada à poluição, sendo definida como o volume de água doce necessário para diluir a carga de poluentes até os padrões de qualidade ambiental.

Figura 3 – Conceito de pegada hídrica aplicado ao nível de bacia, onde estão representadas as PHs verde e azul.

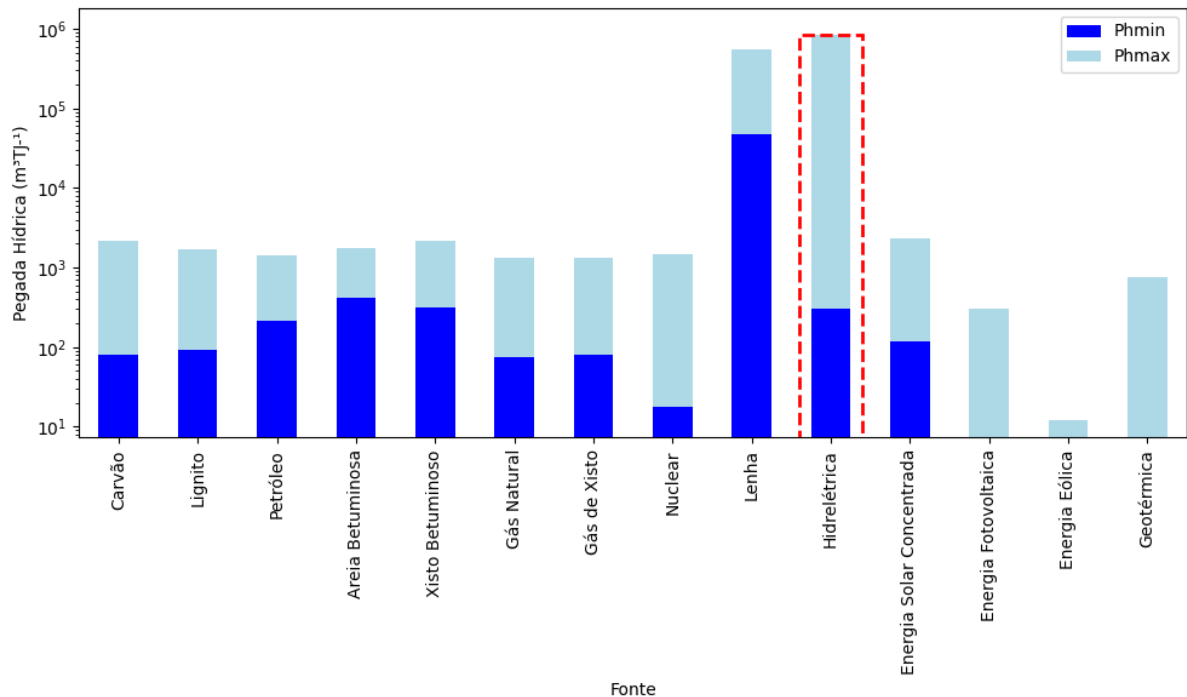


Fonte: Adaptado de Hoekstra *et al.* (2011)

## 2.4 PEGADA HÍDRICA EM EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS

A pegada hídrica para geração de energia de usinas hidrelétricas é bem superior quando comparada com as demais fontes, como pode ser visualizada na Figura 4. O estudo de Mekonnen, Gerbens-Leenes e Hoekstra (2015) avaliaram a pegada hídrica para diferentes fontes, considerando os três principais aspectos da cadeia de produção: a distribuição, a construção e a operação da usina.

Figura 4 – Pegadas hídricas totais de diferentes fontes de geração de energia.

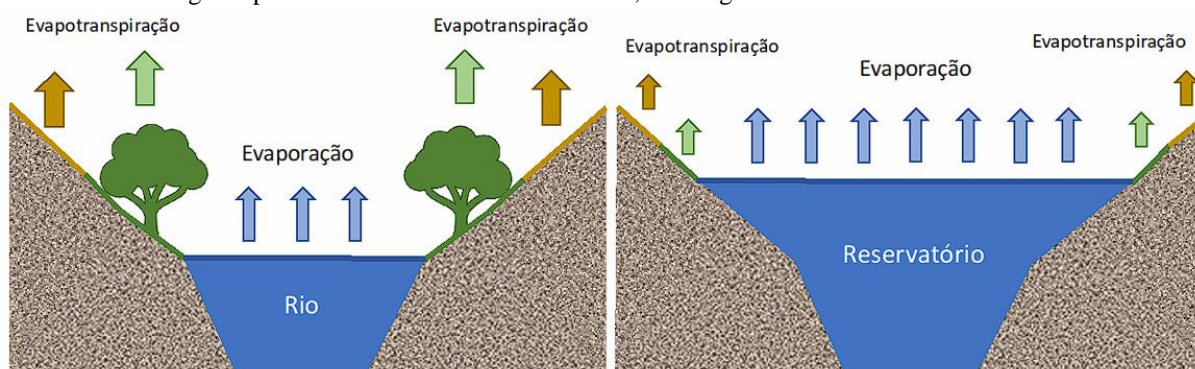


Fonte: Adaptado de Mekonnen, Gerbens-Leenes e Hoekstra (2015)

As hidrelétricas são frequentemente discutidas no contexto global como potenciais usos consuntivos de água (Bakken *et al.*, 2015). Em 2019, no “Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil”, elaborado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), já considera os reservatórios artificiais como usos consuntivos de água, estimando o consumo de água pela evaporação líquida (ANA, 2019).

A construção de um reservatório altera o ciclo hidrológico do local, onde a evapotranspiração é substituída pela evaporação do espelho d’água formado. Na Figura 5, demonstra como ocorre o aumento da evapotranspiração total.

Figura 5 – Modificações no ciclo hidrológico local provocadas pela instalação de uma barragem. Na primeira imagem apresenta um rio com a calha natural, e na segunda um reservatório artificial.



Fonte: Massing (2021)

Entre os usos consuntivos de pegada hídrica azul citada no tópico anterior, está associada à operação das barragens. Trata-se de um indicador calculado entre o consumo de água das usinas e a energia gerada, geralmente expresso em  $\text{m}^3 \text{GJ}^{-1}$ . Segundo Bueno (2018), a PH de usinas hidrelétricas depende de vários fatores como potência instalada, eficiência das turbinas, demanda por energia elétrica, topografia, aspectos hidrológicos, aspectos meteorológicos, tamanho do reservatório e diretrizes operativas estabelecidas pela ONS.

A pegada hídrica das usinas hidrelétricas apresenta uma relação proporcional à evaporação, quanto maior esse processo, maior será a pegada hídrica. Ela depende da área alagada do reservatório e de condições climáticas, que influenciam diretamente na evaporação (Bueno, 2018).

Soito e Freitas (2011), citam que do ponto de vista socioambiental, nos últimos anos, observa-se uma tendência a construção de usinas a fio d'água no Brasil, sem grandes alagamentos, ocasionando em valores de densidade de potência ( $\text{km}^2$  inundados/MW instalados) relativamente menores em comparação às usinas implantadas em décadas anteriores, consideradas de acumulação.

De acordo com Mekonnen e Hoekstra (2011), a relação da área inundada pela potência instalada das hidrelétricas, resulta em uma relação linear e crescente com sua pegada hídrica. Bueno (2018), conclui que o tamanho da superfície do reservatório, em relação à capacidade instalada na usina, tem mais impacto do que as condições climáticas da região.

Para Bakken, Killingtveit e Alfredsen (2017), existe uma diversidade de métodos de cálculo para as estimativas de PH de hidrelétricas, e pode ser selecionada de acordo com as particularidades locais e características de cada empreendimento.

Herath *et al.* (2011) comparou três diferentes métodos de estimativa de pegada hídrica para 9 usinas na Nova Zelândia. Primeiro, utilizou o conceito de pegada hídrica definido por Hoekstra e Chapagain (2007), onde é considerada a água sendo consumida no processo de geração.

$$PH_1 = E_0/G \quad (1)$$

Onde, a pegada hídrica ( $PH_1$ ) é igual a evaporação da superfície do reservatório ( $E_0$ ) dividida pela geração de energia associada ao reservatório ( $G$ ).

A segunda abordagem apresentada pelos autores, também considera o uso consuntivo de água, mas considerada a evapotranspiração anterior ao reservatório, portanto:

$$PH_2 = (E_0 - ET_C)/G \quad (2)$$

Em que a pegada hídrica ( $PH_2$ ) é calculada pela diferença da evaporação da superfície do reservatório ( $E_0$ ) menos a quantidade de água perdida por evapotranspiração anterior à construção do reservatório ( $ET_C$ ), e dividido pela geração de energia ( $G$ ).

No terceiro método, foi usado um simples balanço hídrico, considerando as entradas e saídas do reservatório. Assim:

$$PH_3 = (E_0 - P)/G \quad (3)$$

A  $PH_3$  (pegada hídrica), é a perda líquida de água anual ( $E_0$ ) menos a precipitação anual sobre o reservatório ( $P$ ), dividido pela geração de energia ( $G$ ).

Herath *et al.* (2011), concluíram que utilizando a Equação 3 os valores de pegada hídrica, são menores do que outros métodos relatados internacionalmente.



## 2.5 EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS

Segundo Tucci (2004), a evaporação é o processo físico pelo qual um líquido se transforma em vapor. Esse fenômeno ocorre na superfície de lagos, no solo e nas plantas, sendo fundamental para a manutenção do ciclo hidrológico. A evaporação não apenas contribui para a umidade do ar, mas também desempenha um papel crucial na redistribuição da água na natureza, influenciando o clima e os ecossistemas.

Nas pesquisas de Costa, Melo e Ferreira (2006) e Curtarelli *et al.*, (2013), indicam que diversos fatores podem afetar o processo de evaporação de água, sendo eles a concentração de substância a ser evaporada, a pressão, temperatura, umidade do ar e do solo, as forças intermoleculares, e também fatores meteorológicos como radiação solar e velocidade do vento. Curtarelli *et al.*, (2013), apontam ainda que a qualidade da água, características físicas do lago e a profundidade, também podem variar a evaporação.

A evaporação pode ser classificada em duas categorias: evaporação potencial (EP) e evaporação real (ER). Também existe o conceito de evapotranspiração, que é a soma da evaporação do solo e da transpiração das plantas. A evapotranspiração potencial (ETP) refere-se à quantidade máxima de água que pode ser evaporada sob condições ideais de umidade de solo. E a evapotranspiração real (ETR), representa a quantidade efetiva de água realmente evaporada e transpirada em condições reais do ambiente, sendo sempre inferior a ETP (Massing, 2021).

Dentre os métodos de estimativa de evaporação tem-se: o método da transferência de massa, do balanço de energia, do balanço hídrico, os evaporímetros e as equações empíricas.

Em 2017, no “Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil” a ANA realizou a estimativa da altura da evaporação líquida de 7.360 espelhos d’água artificiais com área acima de 20 ha. O método utilizado foi definido a partir da relação complementar (Morton, 1983a; 1983b), sendo utilizados os modelos CRAE (*Complementary Relationship Areal Evapotranspiration*) para estimativa da evapotranspiração real e CRLE (*Complementary Relationship Lake Evaporation*) para a obtenção da evaporação real do lago, podendo ser com profundidade constante (CLRE 1) ou com profundidade variável (CRLE 2). Além desses utilizados no estudo, o programa também conta com o módulo CRWE (*Complementary Relationship Wet-Surfacel Evaporation*) que calcula a evaporação de lagos rasos.

A evaporação líquida ( $E_{\Delta}$ ) é a diferença entre a evaporação real de um reservatório artificial e a evapotranspiração real que ocorreria na mesma área na ausência desse reservatório. A fórmula é expressa como:

$$E_{\Delta} = E_L - E_R \quad (4)$$

Onde,  $E_L$  representa a evaporação da superfície do lago e  $E_R$  a evapotranspiração real.

Os modelos CRAE e CRLE foram automatizados pelo software WREVAP (Morton *et al.*, 1985; McMahon *et al.*, 2013) um arquivo executável na linguagem FORTRAN, e tem como entrada a altitude (m) e latitude da estação meteorológica, temperatura média (°C), umidade relativa (%), precipitação média anual (mm), insolação (h), e para caso de lagos profundos, o nível médio mensal (m). O estudo da ANA (2017), concluiu que a vazão total de retirada/consumo de evaporação líquida foi de 669,1 m<sup>3</sup>/s em 2017, posicionando esse uso como o segundo maior do País.

Já em 2021, a ANA em conjunto com a Universidade Federal do Paraná (UFPR), publicaram “Evaporação Líquida de Reservatórios Artificiais no Brasil”, onde calculou a evaporação líquida para cerca de 175 mil reservatórios brasileiros, do período de 2001 até 2019. Neste estudo, a evapotranspiração real foi estimada utilizando o produto MOD16A do MODIS, baseado na equação de Penman–Monteith, e ajustada com dados de 1.088 estações fluviométricas no Brasil. Para calcular a evaporação do lago, foi desenvolvido o Sistema de Evaporação em Lago Embasada na Temperatura da Superfície (SELET), que utiliza dados meteorológicos e de temperatura da superfície da água obtidos por sensoriamento remoto. O SELET assegura o fechamento do balanço de energia em cada lago e é aplicável a diferentes tamanhos e condições geográficas. O modelo se fundamenta em métodos reconhecidos na literatura científica e requer dados como temperatura da superfície da água, variáveis meteorológicas (como temperatura do ar e velocidade do vento), grandezas astronômicas determinadas a partir da latitude e do dia do ano (albedo, número máximo de horas de sol e irradiância solar), e a altitude do reservatório em relação ao nível médio do mar para sua operação. Os autores concluíram que a evaporação líquida consumiu 885 mil 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 km<sup>2</sup>. Ainda em 2019, 114 reservatórios apresentaram evaporação líquida

superior a  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  e somaram vazão média anual de  $666 \text{ m}^3/\text{s}$  (75% do total de vazão de retirada nacional).

O estudo de Xavier *et al.* (2016), denominado *Daily Gridded Meteorological Variables in Brazil* - Grade de Dados Meteorológicos Diários para o Brasil (BR-DWGD), desenvolveram grades de alta resolução ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) de precipitação diária, evapotranspiração, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. Xavier *et al.* (2022), publicaram uma atualização da grade reduzindo para  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , e expandindo também o período da grade. O conjunto de dados BR-DWGD foi construído usando dados de 1.252 estações meteorológicas e 11.473 pluviômetros, provenientes de duas instituições brasileiras: a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para calcular os valores diários em grade para as variáveis mencionadas, nessa última atualização em 2022, os autores utilizaram dois métodos de interpolação: *Inverse Distance Weighting* (IDW) e *Angular Distance Weighting* (ADW). Diversos trabalhos em diferentes campos de pesquisa, já foram realizados avaliando a qualidade da BR-DWGD, sendo resultados destas avaliações sempre satisfatórios (Xavier *et al.*, 2016; Xavier *et al.*, 2017; Xaver *et. al.*, 2022).

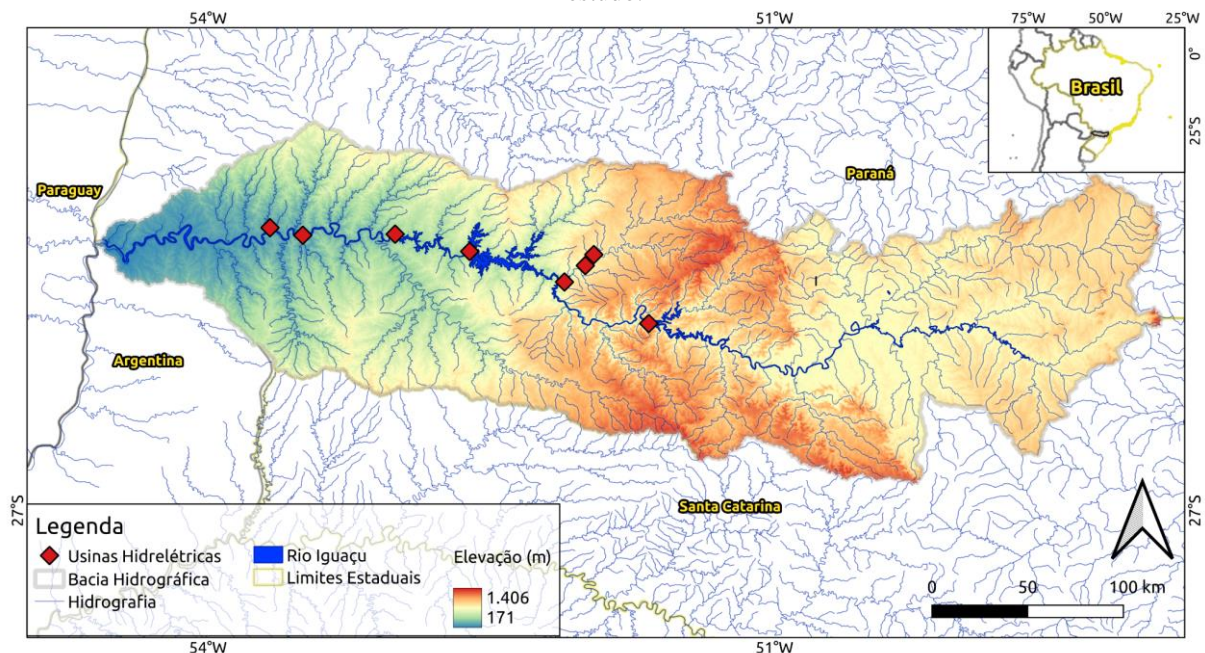
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Rio Iguaçu está situada predominantemente no sul do estado do Paraná, com uma pequena extensão em Santa Catarina e no Uruguai. Possui uma área de drenagem total de cerca de 68 mil km<sup>2</sup> (IAT, 2020). Considerando a confluência dos rios Atuba e Iraí como ponto de origem, o desnível do rio é de 830 metros, começando a partir da altitude de 908 metros neste local, até alcançar os 78 metros na sua foz no rio Paraná. Com uma direção geral de leste a oeste, o rio percorre 1.060 quilômetros desde suas nascentes na vertente ocidental da Serra do Mar até sua desembocadura no rio Paraná (Baumgartner *et al.*, 2012).

O objeto do presente estudo abrange as 8 usinas hidrelétricas localizadas na bacia hidrográfica do Rio Iguaçu. A distribuição geográfica e sua elevação é apresentada na Figura 6. A área total alagada pelos reservatórios associados aos aproveitamentos hidrelétricos considerados é de aproximadamente 675 km<sup>2</sup>, cerca de 10% do tamanho total da bacia, no Nível de Água Máximo Normal, e com potência total instalada de 6.914,2 MW (ANA, 2021).

Figura 6 – Mapa de localização da bacia do Rio Iguaçu e a distribuição espacial das usinas hidrelétricas do estudo.

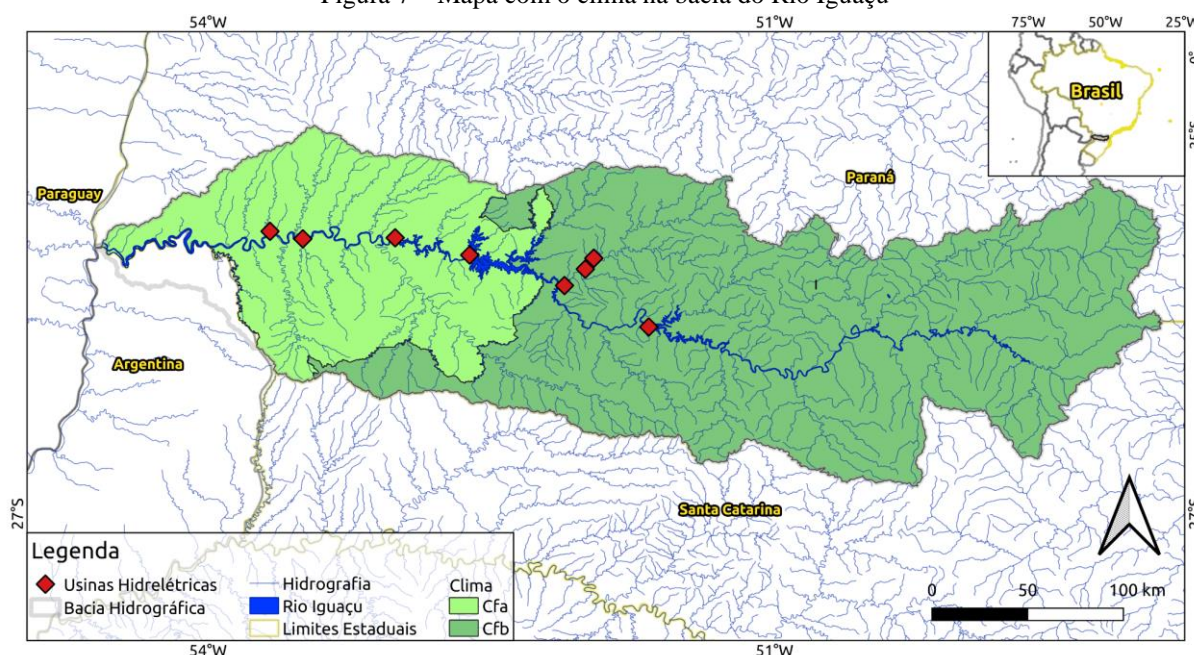


Fonte dos dados: ANA (2021), ANEEL (2024), IBGE (2023), SUDERHSA (2007).

Datum: Sirgas 2000 UTM zone 22s

O clima na bacia do Rio Iguaçu é predominantemente subtropical úmido (Figura 7), mesotérmico, com verão quente, sem estação seca no inverno. Esta classificação é caracterizada por temperaturas amenas durante o ano e uma distribuição relativamente uniforme de chuvas (Baumgartner *et al.*, 2012).

Figura 7 – Mapa com o clima na bacia do Rio Iguaçu



Fonte dos dados: ANA (2021), ANEEL (2024), IBGE (2023), SUDERHSA (2007)

Datum: Sirgas 2000 UTM zone 22s

As temperaturas médias anuais variam entre 15°C e 25°C. No verão, as temperaturas podem alcançar 30°C ou mais, enquanto no inverno, podem cair para valores próximos a 10°C. As variações sazonais são menos extremas em comparação com climas temperados ou tropicais. A umidade relativa do ar é geralmente alta, contribuindo para a densidade da vegetação e a formação de neblina, especialmente nas áreas próximas às cataratas. A precipitação média anual fica em torno de 1.600 a 2.000 mm por ano, com variações dependendo da localização e da estação do ano. As chuvas são bem distribuídas ao longo do ano, com um aumento durante o verão, que é a estação chuvosa (IAT, 2021).

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DAS USINAS

Como já mencionado em tópicos anteriores, as características das usinas são fatores condicionantes para a estimativa da pegada hídrica. Na Tabela 1 apresenta-se suas características. As usinas estão dispostas de montante da bacia do Rio Iguaçu para jusante até

sua foz, e todos seus resultados serão apresentados na mesma ordem. Nas figuras a seguir, ilustra-se suas características apresentadas.

Tabela 1 – Características das usinas hidrelétricas do estudo

n°	Usina	Sigla	Tipo	Potência Instalada (MW)	Área Inundada (km <sup>2</sup> )	NA Máx. Normal (m)	Profundidade de Média (m)
1	Usina Hidrelétrica Gov. Bento Munhoz da Rocha Neto - Foz do Areia	UHE GBM	Acumulação	1676	126,44	742	150
2	Usina Hidrelétrica Gov. Ney Aminthas de Barros Braga - Segredo	UHE GNB	Fio d'água	1260	79,87	607	128
3	Usina Hidrelétrica Santa Clara	UHE SCL	Fio d'água	120	20,23	805	57
4	Usina Hidrelétrica Fundão	UHE FND	Fio d'água	120	2,25	705	44
5	Usina Hidrelétrica Salto Santiago	UHE SSN	Acumulação	1420	209,18	506	79
6	Usina Hidrelétrica Salto Osório	UHE SOS	Fio d'água	1078	56,13	397	60
7	Usina Hidrelétrica Gov. José Richa - Salto Caxias	UHE GJR	Fio d'água	1240	139,62	325	77
8	Usina Hidrelétrica Baixo Iguaçu	UHE BIG	Fio d'água	245	31,63	259	19

Fonte dos dados: Copel (2024), Engie (2024), Neoenergia (2024), Elejor (2024), ANA (2024), ANEEL (2024)

Figura 8 – Profundidade média dos reservatórios estudados.

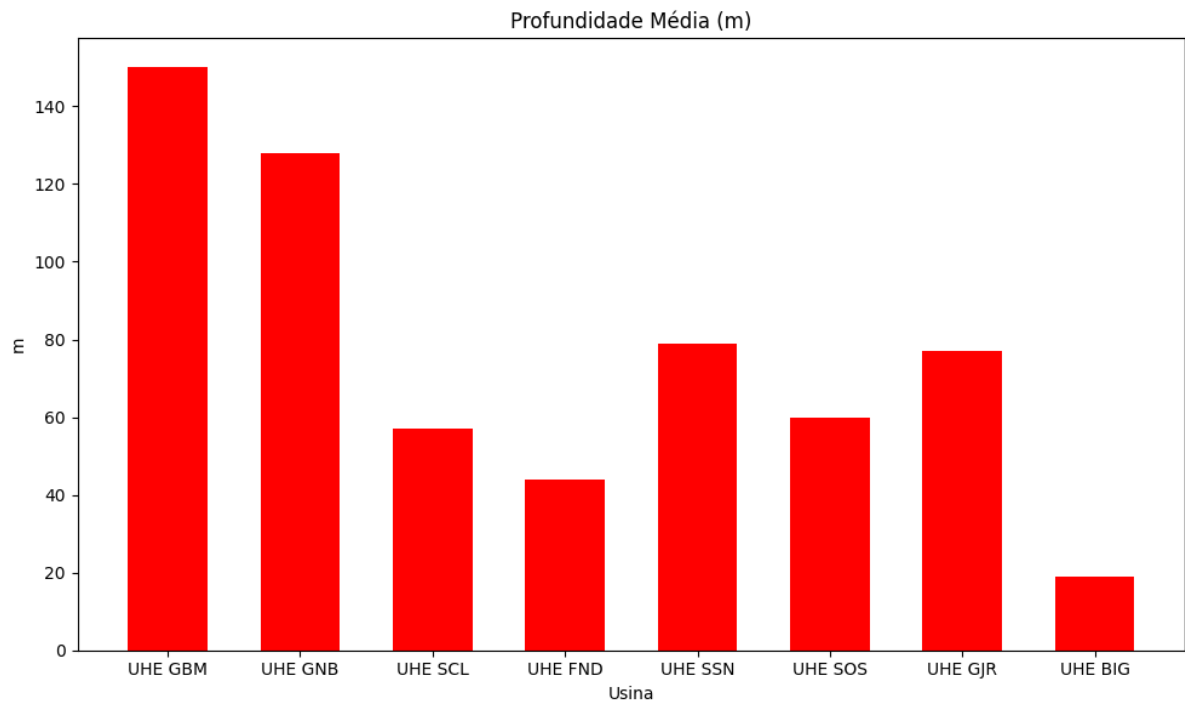


Figura 9 – Área inundada dos reservatórios estudados.

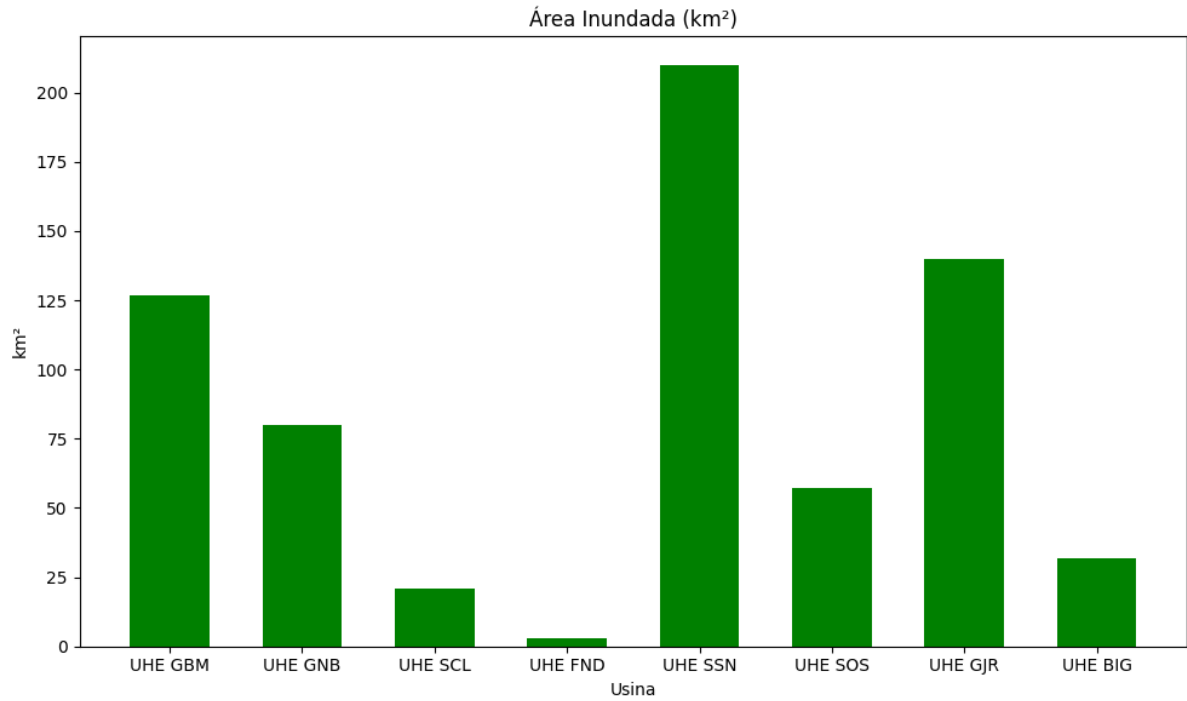


Figura 10 – Potência instalada dos reservatórios estudados.

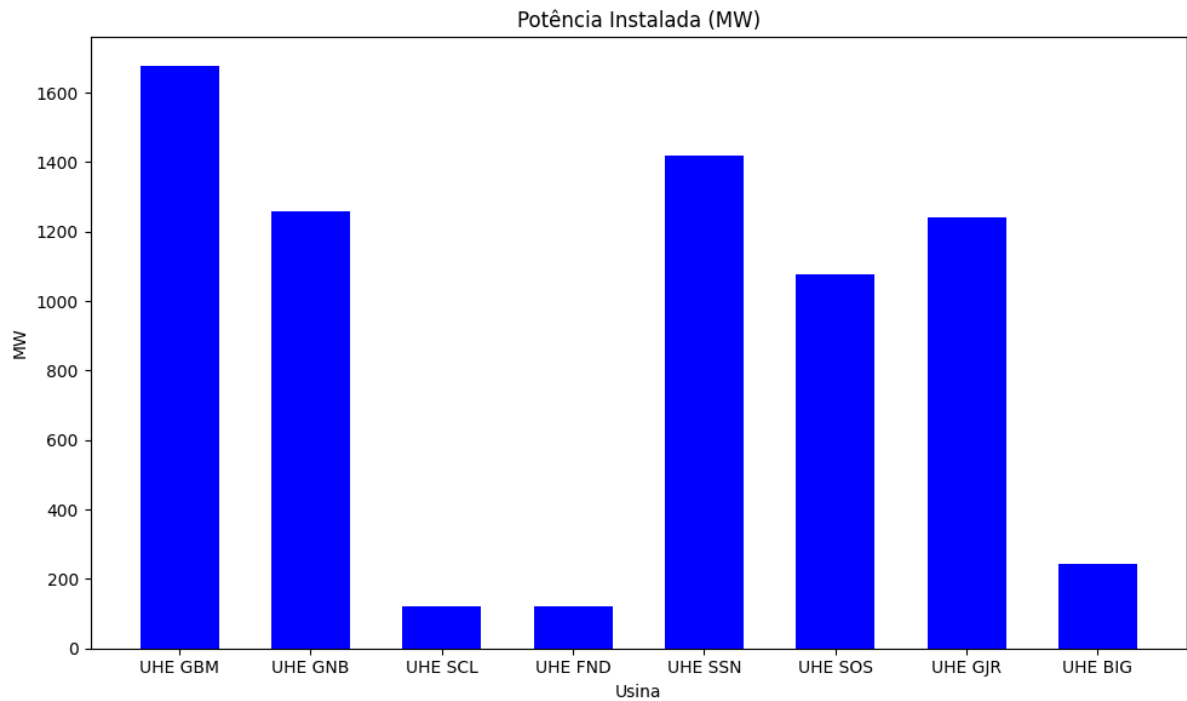
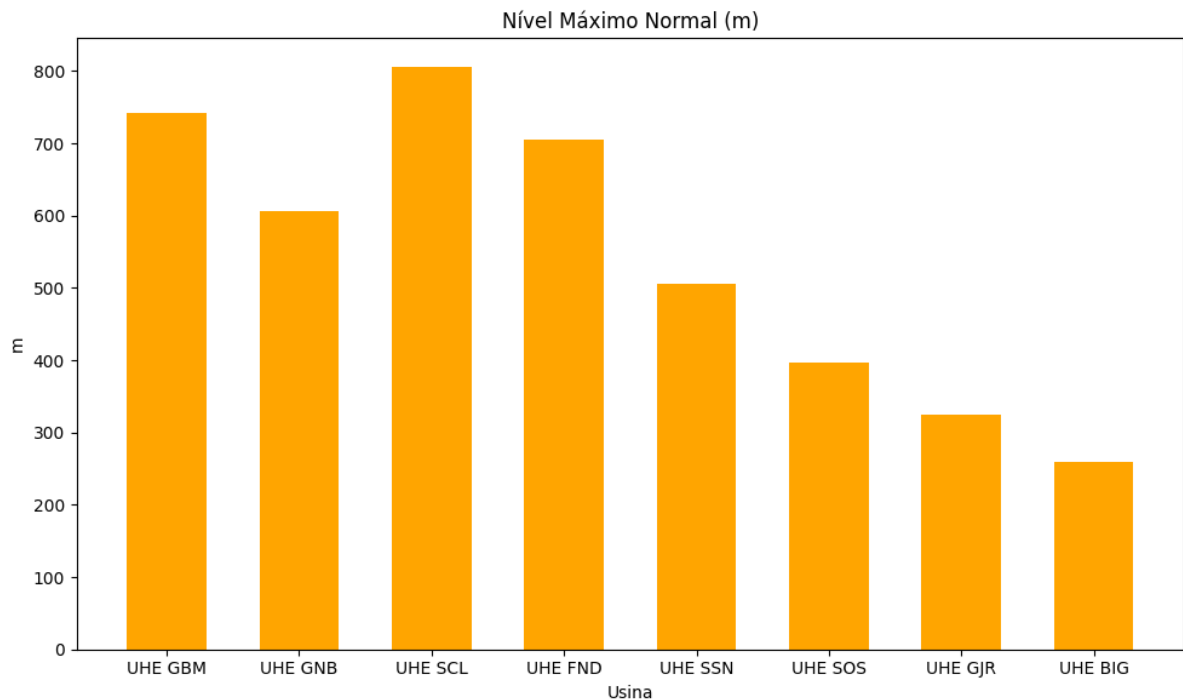


Figura 11 – Nível máximo normal dos reservatórios estudados.



### 3.3 ESTIMATIVA DA PEGADA HÍDRICA

Para o cálculo da pegada hídrica foi utilizada a metodologia proposta por Mekonnen e Hoekstra (2012), conforme equação abaixo:

$$PH = E/G$$

(5)

Em que a PH é a pegada hídrica associada ao reservatório da usina, em  $m^3 \text{ GJ}^{-1}$ , E é a evaporação associada ao reservatório, em  $m^3/\text{mês}$  e G é a energia gerada pela unidade geradora associada ao reservatório, em  $\text{GJ}/\text{mês}$ .

A estimativa da evaporação foi obtida a partir dos dados de saída dos três métodos já apresentados: modelo WREVAP (Morton *et al.* 1985), método SELET (ANA, 2021) e método BR-DWGD (Xavier *et al.*, 2022). Cada método será explanado no tópico 3.4 ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO.

A geração de energia foi obtida pela ONS (2024) de acordo com a data de operação da usina, e está em mais detalhes no tópico 3.5 DADOS OPERACIONAIS.



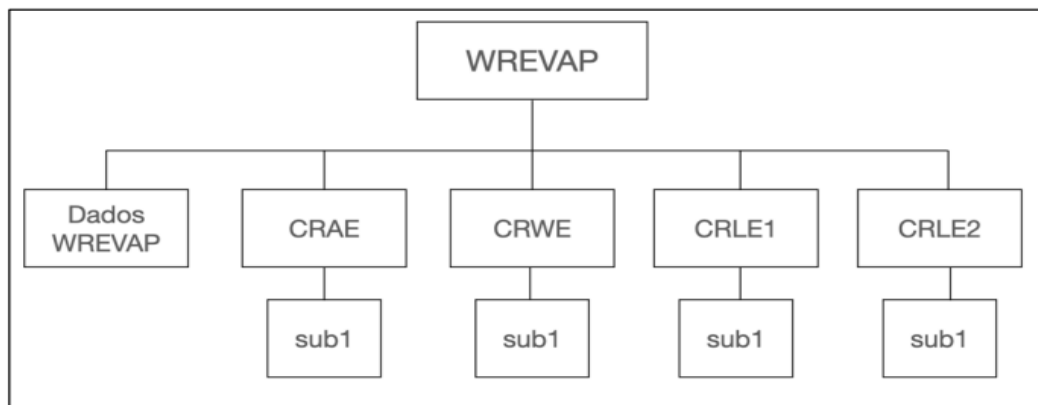
### 3.4 ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO

#### 3.4.1 *Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and Lake Evaporation* - WREVAP

O programa WREVAP apresentado por Morton *et al.* (1985) e disponibilizado em linguagem FORTRAN por McMahon *et al.* (2013), foi utilizado para o cálculo da evaporação, justamente por ser o mais indicado para evaporação de água em reservatórios profundos.

O código do modelo WREVAP possui 5 módulos, apresentados na Figura 12, onde são utilizadas as relações complementares (CR) para o cálculo de 4 situações diferentes de evaporação, já apresentado no 2.5 EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS. No caso do presente estudo, utilizou-se o CRLE 2 (*Complementary Relationship Lake Evaporation 2*), que tem como saída a evaporação real da superfície do reservatório, considerando a profundidade variável. O módulo sub1 calcula a radiação solar incidente no reservatório.

Figura 12 - Esquema de funcionamento do código do modelo WREVAP. Os módulos presentes no modelo correspondem aos possíveis cenários de cálculo de evaporação, sendo eles evaporação real em do solo (CRAE), evaporação em lagos rasos (CRWE) e evaporação em lagos profundos com profundidade fixa e variável (CRLE 1 e 2).



Fonte: Massing (2021)

Fischmann (2016) testou a sensibilidade dos parâmetros de entrada do modelo WREVAP, concluindo que o modelo é mais sensível à insolação, temperatura e profundidade do reservatório. O autor também concluiu que o modelo é pouco sensível à salinidade, altitude

da estação e umidade relativa do ar. Sobre a precipitação média anual, estando na variação esperada para a região, não apresenta sensibilidade.

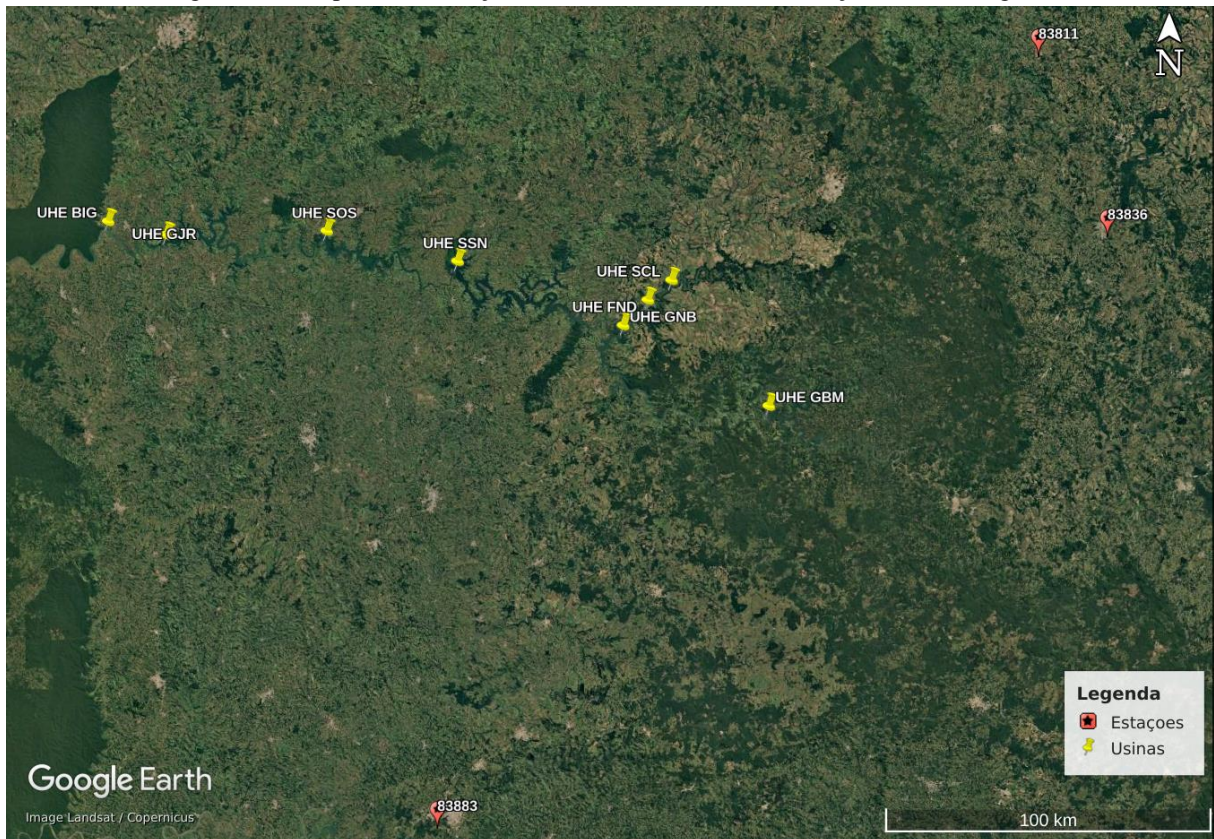
Portanto, com as considerações de Fischmann (2016), neste estudo foi adotado os valores de 2,5 ppm para salinidade e 1800 mm para precipitação. A Tabela 2 apresenta as variáveis de entrada utilizadas para calcular a evaporação e suas respectivas fontes de dados.

Tabela 2 – Dados de entrada e suas respectivas fontes do programa WREVAP.

<b>Dado de entrada</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fonte</b>
Latitude da estação	Graus UTM	Estação INMET
Altitude da estação	m	Estação INMET
Precipitação anual média	mm	Fischmann (2016)
Salinidade do reservatório	ppm	Fischmann (2016)
Temperatura média mensal	°C	Estação INMET
Umidade relativa média mensal	%	Estação INMET
Insolação média diária	horas	Estação INMET
Profundidade do reservatório	m	ANA

A maior limitação desse método é a disponibilidade de estações meteorológicas com dados completos. Foram utilizadas 3 estações convencionais do INMET (INMET, 2024). A escolha da estação para cada usina foi pela menor distância até a mesma. Na Figura 13, está ilustrada a localização das estações e na Tabela 3 mostra a alocação, disponibilidade de dados e as distâncias. Na UHE Baixo Iguaçu, a única estação com dados no período de operação da usina foi a 83836, mesmo não sendo a mais próxima.

Figura 13 – Mapa de localização das usinas hidrelétricas e estações meteorológicas



Fonte dos dados: Google Earth (2024), INMET (2024), ANEEL (2024)

Tabela 3 – Informações das estações meteorológicas usadas para cada usina

Usina	Estação	Intervalo de dados	Distância em linha reta (km)
UHE GBM	83836	jan/2000-dez/2022	118
UHE GNB	83883	jan/2000-jan/2017	155
UHE SCL	83811	jan/2000-jan/2016	133
UHE FND	83836	jan/2000-dez/2022	142
UHE SSN	83883	jan/2000-jan/2017	167
UHE SOS	83883	jan/2000-jan/2017	175
UHE GJR	83883	jan/2000-jan/2017	192
UHE BIG	83836	jan/2000-dez/2022	340

Fonte: Google Earth (2024), INMET (2024), ANEEL (2024)

Com a estimativa da evaporação resultado da saída do modelo WREVPAP em mm/mês, foi multiplicado pela área alagada média mensal. Foi possível obter a variação da profundidade

do reservatório e a variação da área alagada a partir da Curva Cota x Área x Volume (CAV), disponibilizado pela ANA em dezembro de 2019, juntamente com o estudo de batimetria das usinas. A partir da cota de fundo, foi subtraído do nível médio de água mensal, e obtido o valor de profundidade, em metros. Além disso, com o nível de água, substituindo na CAV, pode-se obter a área do reservatório. A UHE Baixo Iguaçu não possuía a CAV, portanto foi utilizado o valor de cota de fundo obtido pelo relatório topobatimétrico, elaborado em 2017 pela Envex Engenharia e Consultoria. A área alagada também foi considerada fixa no NA Máximo Normal, por falta de dados.

Como resultado, obtém-se a evaporação em  $\text{m}^3/\text{mês}$  para a área do reservatório.

Neste modelo, optou-se por não considerar a evapotranspiração anterior, nem a precipitação sobre o reservatório. A pegada hídrica é um indicador de apropriação dos recursos hídricos por uma determinada atividade, portanto, como os reservatórios são artificiais, considerou-se que a água evaporada após sua construção é uma forma de consumo da atividade que, no caso, é a geração de energia. De acordo com Hoekstra (2017), se for levado em conta a evapotranspiração precedente a instalação do reservatório é interpretar erroneamente o conceito de PH.

### **3.4.2 Sistema de Evaporação em Lago Embasada na Temperatura da Superfície - SELET**

Para estimativa da evaporação pelo método SELET, como produto do estudo da Evaporação Líquida de Reservatórios do Brasil, a ANA (2021) disponibilizou uma planilha em *Software Excel*, contendo os dados médios mensais para os 1.345 reservatórios artificiais com área mapeada superior a  $1 \text{ km}^2$  do ano de 2001 à 2019.

Essa planilha contém o identificador, ano e mês de referência, taxa de evaporação líquida média diária, área média do reservatório, vazão de evaporação líquida mensal e também a fonte de onde obteve-se a área (observada ou estimada por CAV, preenchida com média mensal ou adotada da área mapeada).

Para o cálculo da evaporação em  $\text{m}^3/\text{mês}$ , primeiro multiplicou-se o valor da taxa de evaporação pela quantidade de dias no mês de referência, e depois multiplica-se pela área média do espelho d'água.

O método SELET, diferente do WREVP, considera a evapotranspiração real, ou seja, o resultado dessa evaporação será a evaporação da superfície menos a evapotranspiração real.

### 3.4.3 *Daily Gridded Meteorological Variables in Brazil – BR-DWGD*

O método BR-DWGD (Xavier *et al.*, 2022) calcula os valores somente de evapotranspiração, ou seja, antes do reservatório ser construído naquele local.

Para extração do banco de dados foi necessário o uso de linguagem de programação, no caso foi utilizado *Python*. Os dados obtidos pela grade são da evapotranspiração diária no ponto exato do reservatório.

Para calcular a evapotranspiração em m<sup>3</sup>/mês para a área dos reservatórios foi multiplicada pela área alagada fixa, de acordo com o catálogo de massas d'água da ANA (2020).

O objetivo de integrar esse método de cálculo na análise, é buscar compreender como o comportamento da evaporação interfere na sazonalidade da pegada hídrica, sem a implantação do reservatório.

## 3.5 DADOS OPERACIONAIS

Os dados operacionais foram baixados diretamente do Portal de Dados Abertos da ONS (2024). As séries históricas de geração e nível de água utilizadas para este estudo, iniciam a partir de janeiro de 2000 ou quando a usina iniciou sua operação após essa data, com a data final em dezembro de 2023. Os dados de geração são horários, em MWh, posteriormente convertidos para geração mensal em GJ. Os dados de nível de montante do reservatório, foram disponibilizados em metros.

## 3.6 CARACTERIZAÇÃO DE ANO SECO E ÚMIDO

O método de classificação de anos secos e úmidos, foi realizada com base no Índice de Anomalia de Precipitação (IAP). Esse índice é amplamente empregado em estudos de variabilidade climática e gerenciamento de recursos hídricos. Em alguns artigos é citado como IAC, Índice de Anomalia de Chuva, onde sua principal função é quantificar as anomalias de

precipitação em relação à média histórica, ajustando-as pelo desvio padrão. Dessa forma, o IAP possibilita uma análise comparativa consistente entre diferentes regiões ou períodos, independentemente das características climáticas locais.

A caracterização da pegada hídrica em um ano seco e um ano úmido, foi realizada para somente duas usinas hidrelétricas: Usina Hidrelétrica Salto Santiago (UHE SSN) e Usina Hidrelétrica Salto Osório (UHE SOS). A escolha se deu principalmente devido a usina SSN ser de acumulação e estar a montante da SOS que é a fio d'água.

Inicialmente para realizar essa comparação, foi feito o *download* da série de dados da estação pluviométrica mais próxima das usinas, disponibilizadas pela base de dados da ANA, o *Hidroweb*. As estações selecionadas foram: 2552070 – UHE SALTO SANTIAGO BARRAMENTO; e 2552000 - QUEDAS DO IGUAÇU (CAMPO NOVO). O período de dados pluviométricos analisados foi o mesmo período que se obteve o resultado da pegada hídrica pelo método WREVAP. Com os dados mensais da precipitação, foi calculada a média anual histórica e o desvio padrão.

O Índice de Anomalia de Precipitação (IAP) foi calculado pela fórmula:

$$IAP = (P_{ano} - P_{média})/\sigma \quad (6)$$

Onde o  $P_{ano}$  representa a precipitação no ano avaliado, o  $P_{média}$  a média histórica e  $\sigma$  o desvio padrão histórico.

A classificação para definir qual ano é o mais seco e o mais úmido para série de dados, foi realizada conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Índice de Classificação de Anomalia (IAP)

<b>Categoria</b>	<b>Classificação</b>
Ano muito seco	$IAP < - 1,5$
Ano seco	$- 1,5 \leq IAP < -0,5$
Ano normal	$- 0,5 \leq IAP \leq 0,5$
Ano úmido	$0,5 < IAP \leq 1,5$
Ano muito úmido	$IAP > 1,5$

Fonte: Adaptado McKee, Doesken e Kleist (1995).

### 3.7 ANÁLISE DE CORRELAÇÕES ENTRE A PEGADA HÍDRICA E CARACTERÍSTICAS DAS USINAS

A análise de correlação tem como objetivo a avaliação do grau de associação entre duas variáveis. Portanto, a fim de investigar a relação entre os resultados de pegada hídrica e as características dos empreendimentos hidrelétricos estudados, diferentes métodos estatísticos foram aplicados, considerando o tipo das variáveis e suas distribuições.

As características já apresentadas das usinas foram organizadas em uma planilha *Excel* contendo as variáveis de interesse. Para as análises estatísticas, foi utilizada a linguagem de programação *Python*, empregando bibliotecas específicas para manipulação dos dados, cálculos estatísticos e modelagem.

A correlação de Spearman e Kendall, foram utilizadas para avaliar a relação entre a pegada hídrica (variável contínua) e as características numéricas (nível de água, potência instalada e área inundada). A correlação de Spearman é indicada quando não é verificado o pressuposto de normalidade (Sousa, 2019). A correlação de Kendall utiliza os dados ordenados em postos entre duas medidas (Origuela, 2018). Ambos podem ser usados para testar relações não-lineares entre as variáveis.

Para cada correlação, foram gerados gráficos para facilitar a interpretação dos resultados. A força das associações foi interpretada com base nos coeficientes e p-valores obtidos, seguindo os critérios descritos por Cohen (1988) para correlações fracas, moderadas e fortes.

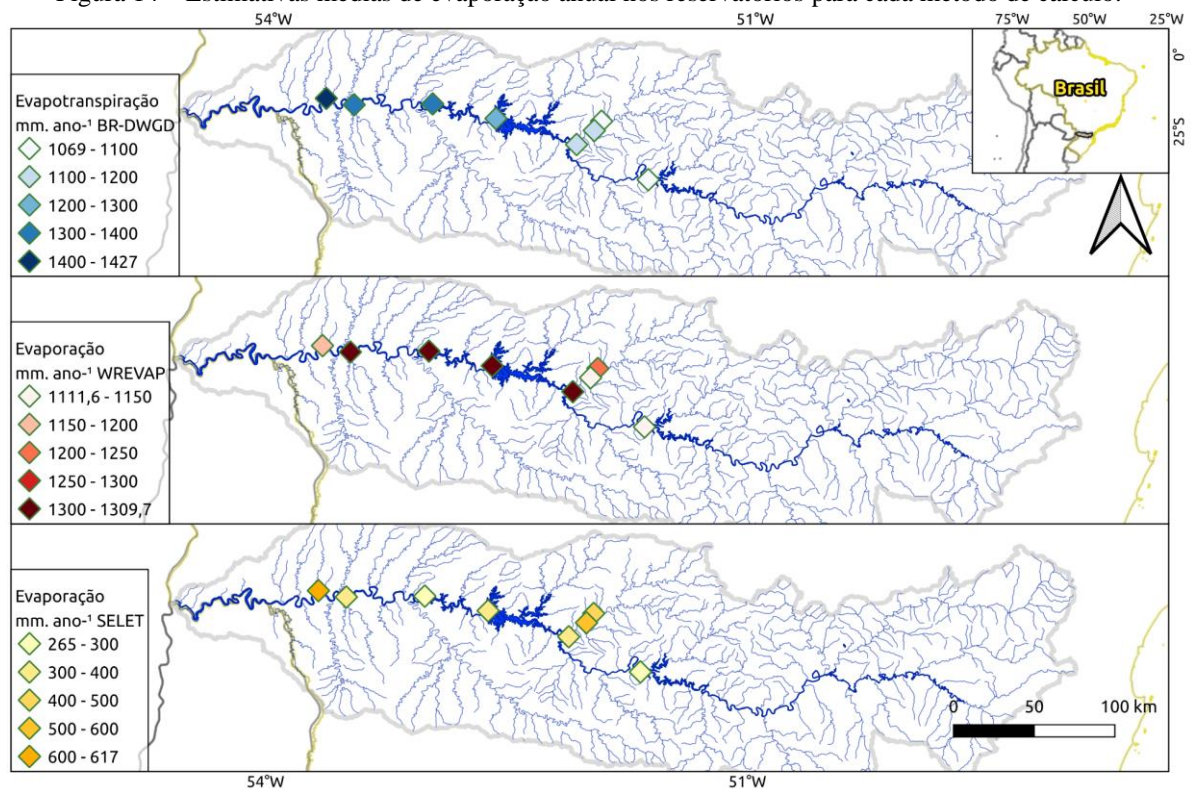
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO

A Figura 14 apresenta as estimativas médias anuais da evaporação para os reservatórios das usinas hidrelétricas estudadas, de acordo com cada método.

Para o método BR-DWGD a média das usinas hidrelétricas da bacia foi de 1.214 mm ano<sup>-1</sup> com desvio padrão de +- 130 mm ano<sup>-1</sup>. Pelo método WREVAP os resultados foram bem similares, com a média de 1.231 mm ano<sup>-1</sup> com desvio de +- 86 mm ano<sup>-1</sup>. O resultado pelo método SELET, se distingue dos demais, com a média em 412 mm ano<sup>-1</sup> e desvio +-136 mm ano<sup>-1</sup>.

Figura 14 – Estimativas médias de evaporação anual nos reservatórios para cada método de cálculo.



Fonte dos dados: ANA (2021), ANEEL (2024), IBGE (2023)

Datum: Sirgas 2000 UTM zone 22s



Figura 15 - Relação entre altitude do reservatório e evaporação anual, para cada método de cálculo. O tamanho dos círculos é proporcional as áreas superficiais dos reservatórios.

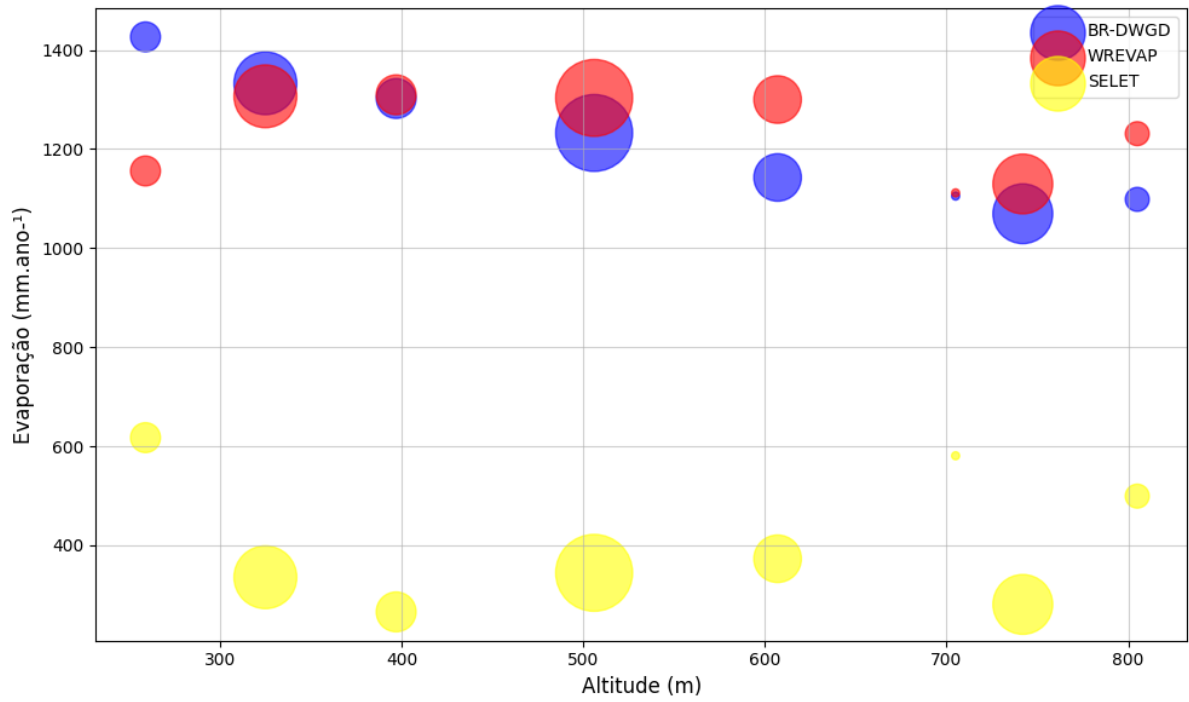
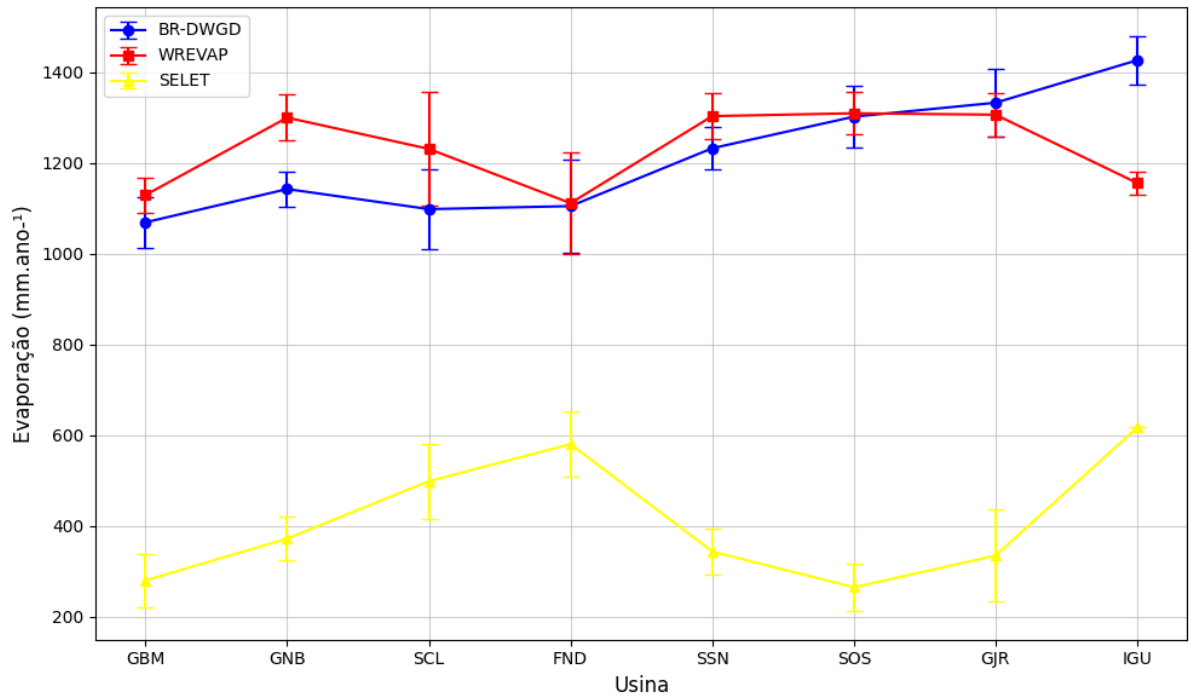


Figura 16 – Médias anuais de evaporação de cada usina e seu desvio padrão, para cada método de cálculo.



Conforme a Figura 15 demonstra, as evaporações pelo BR-DWGD tendem a aumentar conforme diminui a altitude. Já para as séries do WREVAP e SELET não seguem um padrão.

O padrão interanual das evaporações pelo WREVAP e BR-DWGD são similares, porém quando discretizado mensalmente, verifica-se que o comportamento da série de dados é diferente. Enquanto o pico de evaporação pelo WREVAP fica nos meses de inverno, assim como o SELET, para o BR-DWGD fica próximo dos meses do verão. Um exemplo é a UHE Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto (GBM), com 125,6 m de profundidade no NA máximo normal, na Figura 17 demonstra a evaporação média anual para a usina, enquanto a Figura 18 apresenta seu comportamento mensal para toda série de dados.

Figura 17 – Comportamento da evaporação média anual da UHE Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto (GBM).

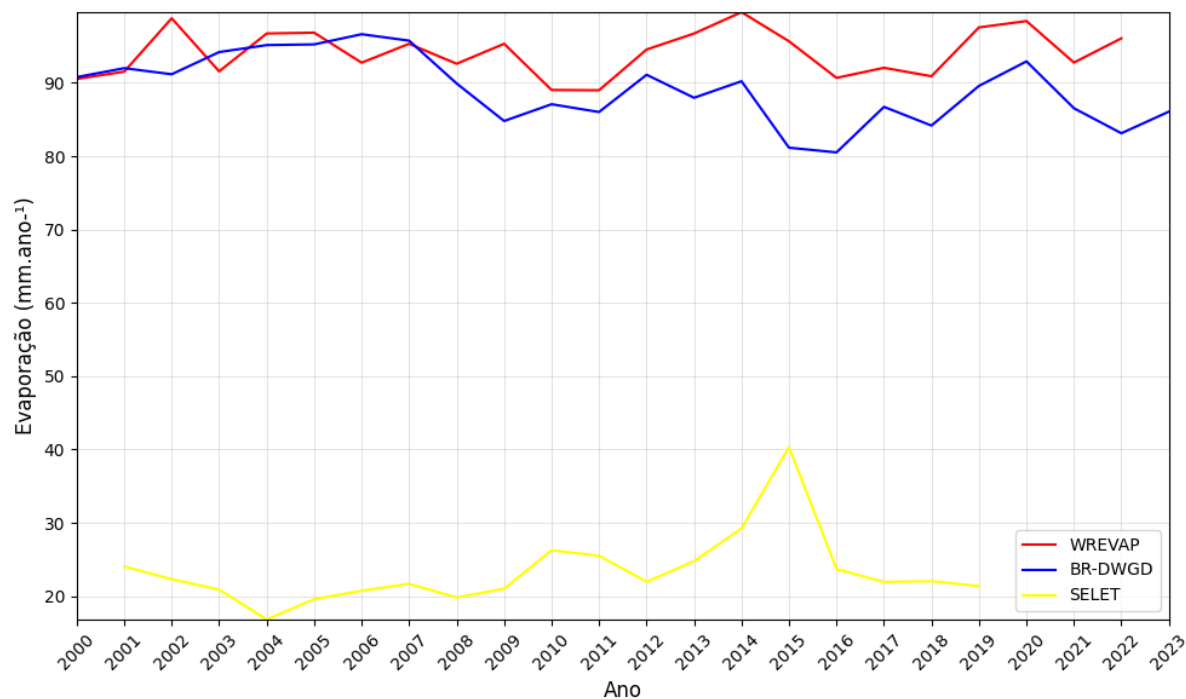
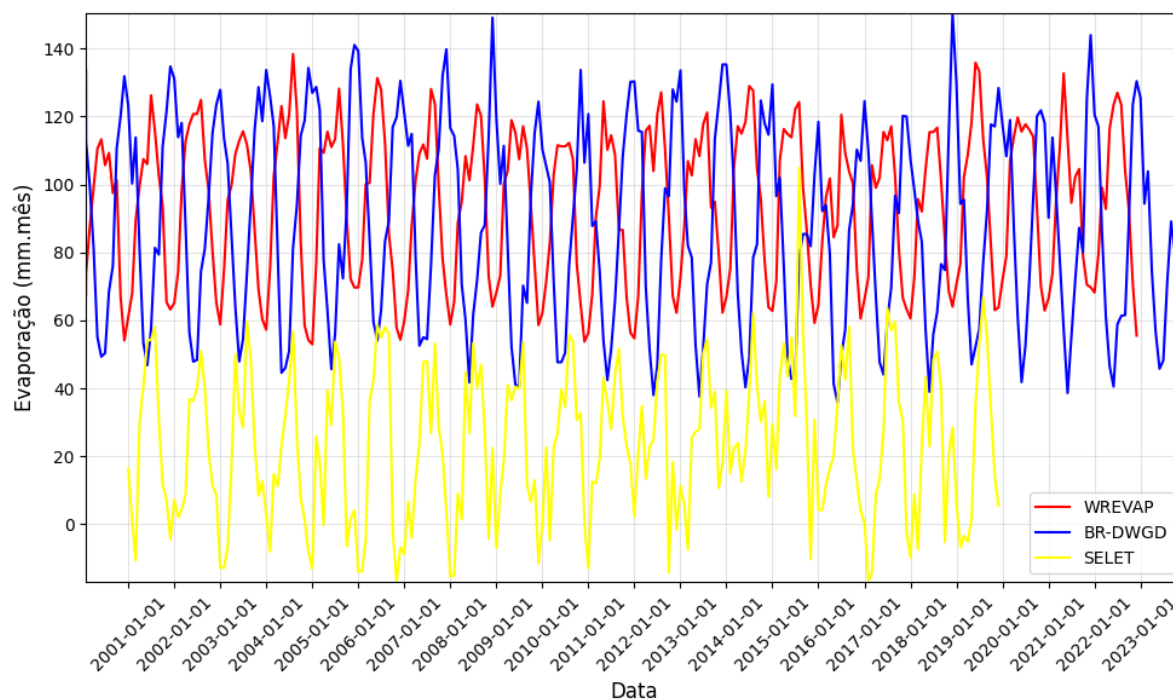
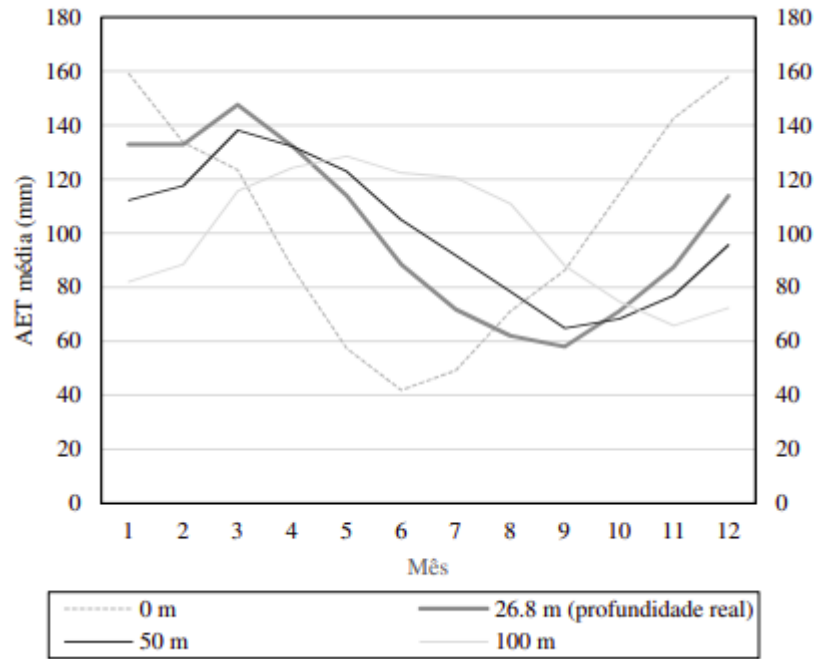


Figura 18 – Comportamento da evaporação média mensal da UHE Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto (GBM).



Porém esse comportamento dos resultados do WREVAP tem relação direta com a profundidade dos reservatórios. Fischmann (2016) testou a sensibilidade do parâmetro de profundidade, e concluiu que grandes variações, levam a em alterações no pico de evaporação, o deslocando para os meses de inverno. A Figura 19 apresenta o teste realizado pelo autor, com 4 diferentes níveis de profundidade. O autor comenta que isso ocorre, pois, a profundidade consiste em um dado de entrada para o *routing* linear realizado pelo CRLE para simular o armazenamento de calor nos lagos. Ou seja, a variação interanual na quantidade de calor armazenado é desprezível, porém apresenta variações significativas no comportamento de evaporação mensal. Outro exemplo é a UHE Fundão, localizada no Rio Jordão, afluente do Rio Iguaçu, a usina possui profundidade média de 44 m, e sua evaporação anual pode ser visualizada na Figura 20 e a mensal na Figura 21.

Figura 19 - Variação das AET médias mensais estimadas pelo CRLE de acordo com a variação na profundidade média do reservatório.



Fonte: Fischmann (2016)

Figura 20 – Comportamento da evaporação média anual da UHE Fundão (FND).

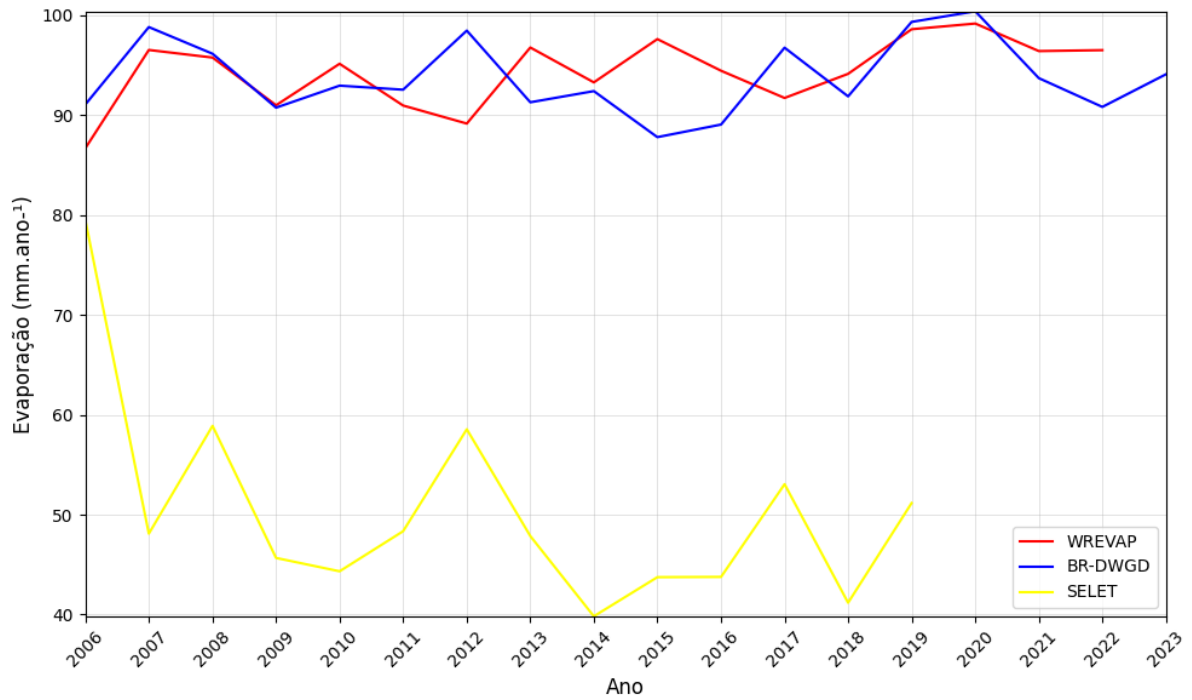
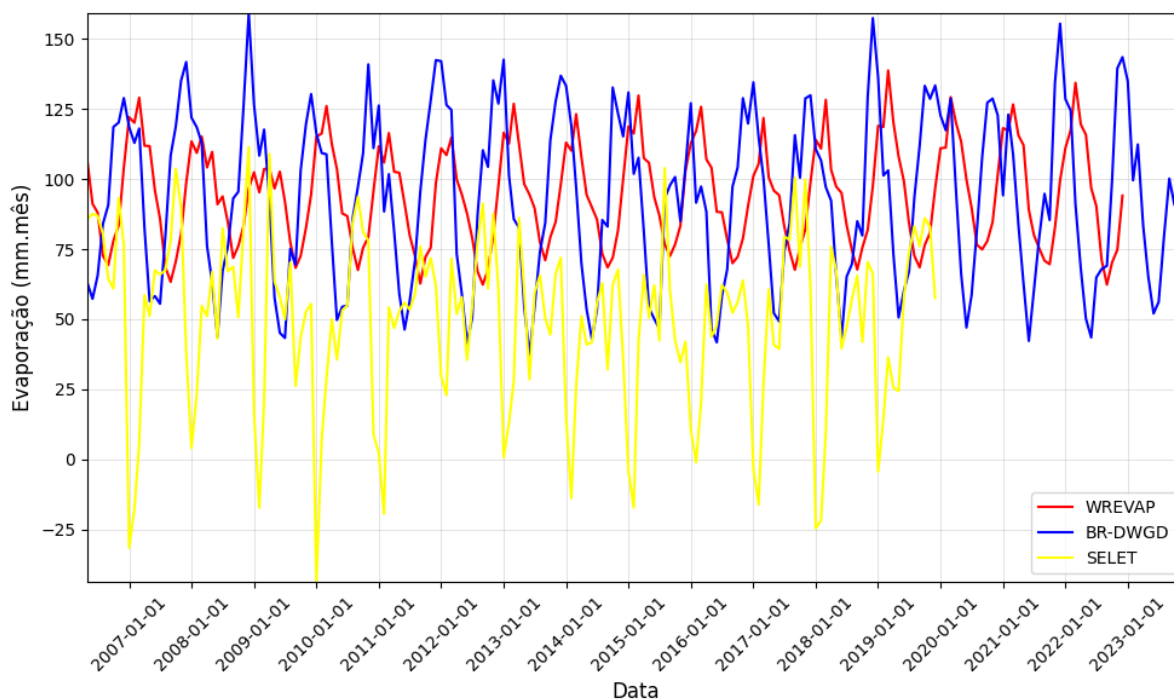


Figura 21 - Comportamento da evaporação média mensal da UHE Fundão (FND).



Como observado nas Figura 21 e Figura 22, e afirmado por Fischmann (2016), a evaporação acaba se deslocando para os meses de inverno conforme aumenta a profundidade.

Outra observação sobre as Figura 21 e Figura 18 (evaporações mensais), é que pelo método SELET algumas evaporações ficaram negativas. Segundo a ANA (2021), situações locais de evaporação líquida negativa ocorrem, principalmente, devido aos elevados valores de evapotranspiração real no entorno desses espelhos d'água, com presença de vegetação exuberante e de condições favoráveis de umidade no solo. Destaca-se ainda, que o método de estimativa da evapotranspiração real também possui uma forte relação com as condições locais, especialmente da dinâmica do entorno do reservatório.

Os demais gráficos contendo o comportamento interanual e mensal das evaporações dos outros reservatórios encontram-se no APÊNDICE A – Estimativas de Evaporação.

No estudo de Fischmann (2016), foi estimado a evaporação de 41 usinas no Sul do Brasil, utilizando o modelo WREVAP, a metodologia empregada em ambos estudos é semelhante, diferenciando-se no uso de nível e área alagada constante, enquanto no presente estudo utilizou-se ambas variáveis. Ainda no Brasil, Massing (2021) calculou a evaporação de 132 usinas hidrelétricas brasileiras pelo método WREVAP, com a metodologia similar com este estudo, divergindo somente pela área alagada fixa, enquanto neste foi variável. Na Tabela

5, apresenta-se um comparativo das evaporações médias anuais pelos dois autores pelo método WREVAP.

Tabela 5 – Comparação estudos anteriores. Evaporação em mm ano.

<b>Usina</b>	<b>Fischmann (2016)</b>	<b>Massing (2021)</b>	<b>A autora (2024)</b>
UHE GBM	1200	1129	1069
UHE GNB	1450	1311	1143
UHE SCL	1300	1154	1099
UHE FND	1250	1153	1105
UHE SSN	1500	1305	1233
UHE SOS	1400	1310	1302
UHE GJR	1500	1285	1333
UHE IGU	-	-	1427

Os resultados de evaporação dos três trabalhos ficaram similares, principalmente pelo uso das mesmas estações meteorológicas.

Os métodos de estimativa de evaporação contrastam entre si em razão de calcularem diferentes tipos de evaporação. Enquanto o WREVAP calcula a parcela líquida real evaporada, o BR-DWGD nos retorna os resultados de evapotranspiração da área, e por fim o SELET desconta da evaporação líquida a evapotranspiração.

No presente estudo, a autora optou por seguir as análises da pegada hídrica somente com a estimativa da evaporação pelos métodos WREVAP e BR-DWGD. Os resultados do SELET, visto que resultaram em valores negativos de evaporação, precisam de uma maior atenção ponto a ponto, para verificar se estes dados é uma boa escolha para o cálculo da pegada hídrica, como não é o objetivo deste trabalho definir o melhor método de evaporação, optou-se por excluí-lo das análises seguintes.

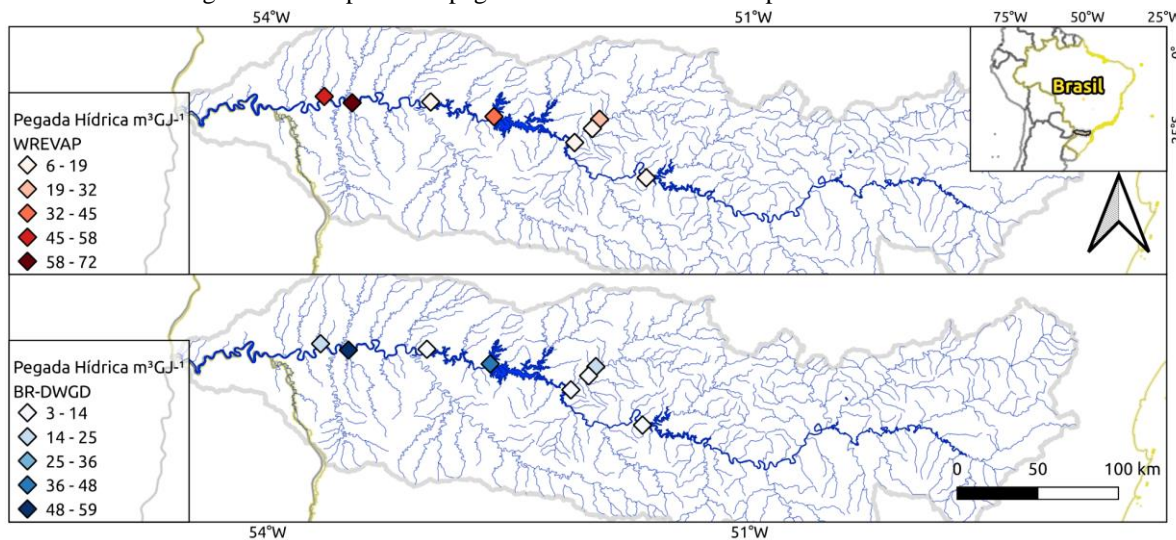
#### 4.2 ESTIMATIVA DA PEGADA HÍDRICA

A Figura 22 apresenta as pegadas hídricas médias estimadas para os 8 aproveitamentos hidrelétricos da bacia do Rio Iguaçu, e na

Tabela 6 apresenta-se os valores médios. A pegada hídrica média para todas as usinas foi de  $28,75 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$  e  $20,61 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$ , para o WREVAP e BR-DWGD, respectivamente. O valor ficou próximo ao de Fischmann (2016), que chegou em  $22,35 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$  para 41 usinas hidrelétricas no sul do Brasil, e de Semertzidis *et al.* (2019), de  $28,80 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$  para 163 reservatórios brasileiros. Bueno (2018) estimou para a UHE Funil, localizada no estado do Rio de Janeiro, a média de  $29 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$ , valor bem próximo do resultado deste estudo. Porém o valor diverge de Massing (2021), que obteve a média de  $60,80 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$  para as usinas hidrelétricas da bacia do Rio Paraná e Mekonnen e Hoekstra (2012), que também chegou a um valor de  $68 \text{ m}^3 \text{ GJ}^{-1}$  para algumas usinas do mundo. Cabe destacar que a pegada hídrica está diretamente ligada às condições climáticas do local e regras de operação das usinas, então sua comparação deve ser feita considerando esses fatores.

Neste trabalho optou-se por não excluir os meses com baixa geração, somente os meses que não tiveram geração de energia, no tópico 3.4.1 Meses sem Geração de Energia aborda sobre os meses desconsiderados.

Figura 22 – Mapa com a pegada hídrica média mensal para os reservatórios.



Fonte dos dados: ANA (2021), ANEEL (2024), IBGE (2023)

Datum: Sirgas 2000 UTM zone 22s

Tabela 6 – Pegadas hídricas médias mensais estimadas.

<b>Usina</b>	<b>PH med (m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup>) - WREVAP</b>	<b>PH med (m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup>) - BR-DWGD</b>	<b>Diferença (%)</b>
GBM	12,61	12,44	0,17
GNB	13,49	10,81	2,68
SCL	19,77	18,92	0,85
FND	8,39	2,54	5,85
SSN	43,03	40,40	2,63
SOS	6,02	5,22	0,8
GJR	71,59	58,80	12,79
IGU	55,09	15,73	39,36

Ao analisar cada usina de forma individual, observa-se uma considerável variação nos valores mensais estimados. As Tabela 7 e Tabela 8, ilustram essa variabilidade, apresentando os valores mínimos, médios e máximos da pegada hídrica, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação das UHEs incluídas neste estudo, para cada método de estimativa de evaporação.

Tabela 7 – Variabilidade da pegada hídrica obtidas pela evaporação do WREVAP.

<b>Usina</b>	<b>PH min (m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup>)</b>	<b>PH med (m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup>)</b>	<b>PH max (m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup>)</b>	<b>DP (m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup>)</b>	<b>CV</b>
GBM	2,06	12,61	740,37	45,07	3,57
GNB	2,67	13,49	211,25	16,80	1,24
SCL	4,81	19,77	367,49	45,40	2,30
FND	0,49	8,39	673,40	59,93	7,14
SSN	7,72	43,03	498,90	49,16	1,14
SOS	2,34	6,02	29,09	3,67	0,61
GJR	4,87	71,59	10668,64	745,68	10,42
IGU	10,17	55,09	550,25	84,54	1,53



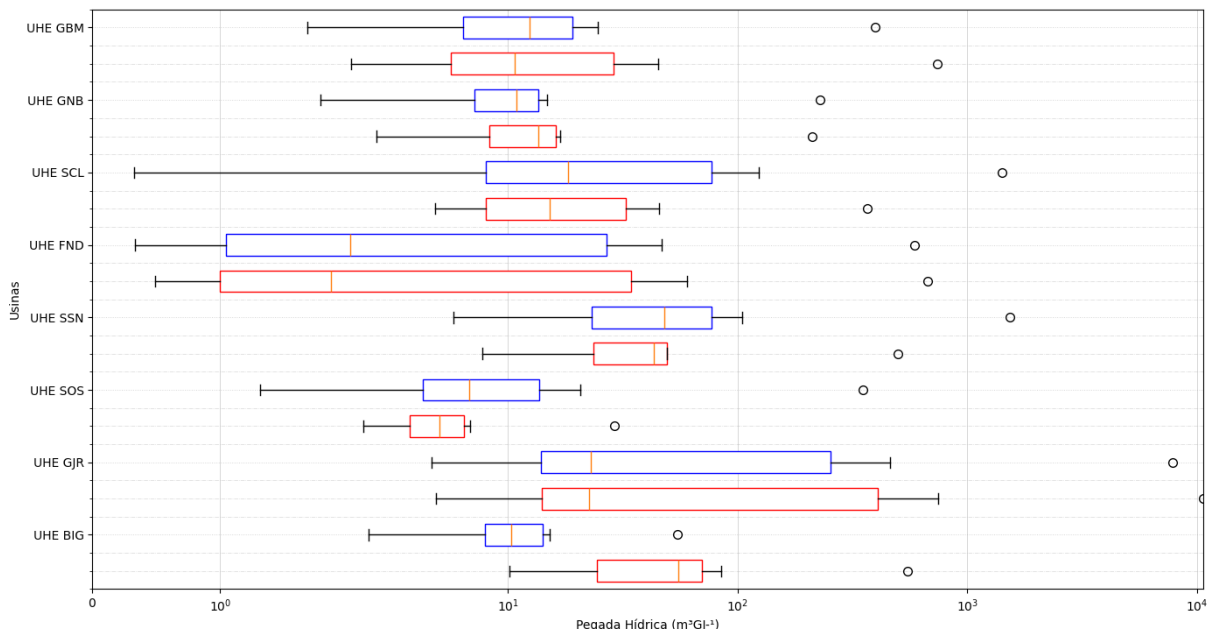
Tabela 8 – Variabilidade da pegada hídrica obtidas pela evaporação do BR-DWGD.

Usina	PH min (m <sup>3</sup> GJ <sup>-1</sup> )	PH med (m <sup>3</sup> GJ <sup>-1</sup> )	PH max (m <sup>3</sup> GJ <sup>-1</sup> )	DP (m <sup>3</sup> GJ <sup>-1</sup> )	CV
GBM	1,69	12,44	396,74	28,25	2,27
GNB	1,79	10,81	227,78	16,90	1,56
SCL	0,33	18,92	1416,88	123,45	6,52
FND	0,34	2,54	589,37	46,66	18,37
SSN	6,89	40,40	1526,07	104,86	2,59
SOS	1,72	5,22	349,60	20,57	3,94
GJR	4,65	46,33	7823,13	460,02	9,93
IGU	2,48	15,73	174,43	10,28	0,65

A PH máxima foi obtida para UHE Gov. José Richa, antes denominada Salto Caxias, de 71,59 m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup> e 46,33 m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup>, mas este valor pode ter sofrido uma distorção por um outlier, devido ao seu valor máximo da série ser de 10.668,64 m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup> e 7.823,13 m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup>. Excluindo-se esse valor de baixa geração (junho/2006), a média ficaria 19,38 m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup> e 19,15 m<sup>3</sup> GJ<sup>-1</sup>.

A Figura 23 apresenta os *boxplot* das pegadas hídricas, representando a amplitude dos valores obtidos de estimativas para cada usina. As UHEs estão na ordem de montante a jusante da bacia. Os círculos pretos representam os *outliers* das séries estimadas, geralmente elevados devido aos meses com baixa geração de energia. Como já mencionado, optou-se por não excluir os meses com baixa geração visto que representa as particularidades da operação da usina e também do despacho da ONS. A distribuição dos dados é muito similar para ambos os métodos.

Figura 23 – Boxplot com a distribuição das pegadas hídricas estimadas para os aproveitamentos hidrelétricos, WREVAP em vermelho e BR-DWGD em azul.



Para analisar toda série temporal de dados, foi plotado a pegada hídrica, com a evaporação (WREVAP) e a geração de energia para cada usina. Nessa análise, preferiu-se utilizar somente a evaporação resultada do WREVAP, pois aproxima-se mais da realidade do reservatório (área alagada variável).

E pode-se concluir que a geração é o fator mais dependente na pegada hídrica do que a evaporação. Toda vez que houve baixa geração de energia, resultou em PH altas, como é o caso para UHE GJR (Figura 26) e UHE SCL em 2006 (Figura 24), e UHE FND em 2020 (Figura 25). A evaporação no geral, tende a manter um certo padrão, e é raro acontecer um evento tão extremo que modifique de tal maneira a comprometer a pegada hídrica. Agora a geração de energia pode ser interrompida por diversos fatores, desde manutenções nas usinas, despacho da ONS, regras operativas até eventos de estiagem que comprometam o bom funcionamento das turbinas, como ficar abaixo do nível mínimo operativo. É importante destacar que todas as usinas estão dispostas em cascata ao longo do Rio Iguaçu, e pode ser que a ONS solicite que as usinas mais a montante liberem água para as usinas mais a jusante. A consequência dessa operação, pode gerar momentos de baixa geração e consequentemente aumento da pegada hídrica. Os demais gráficos estão apresentados na APÊNDICE B – Pegadas Hídricas com Evaporação e Geração de Energia.

Figura 24 - Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE SCL para toda série de dados.

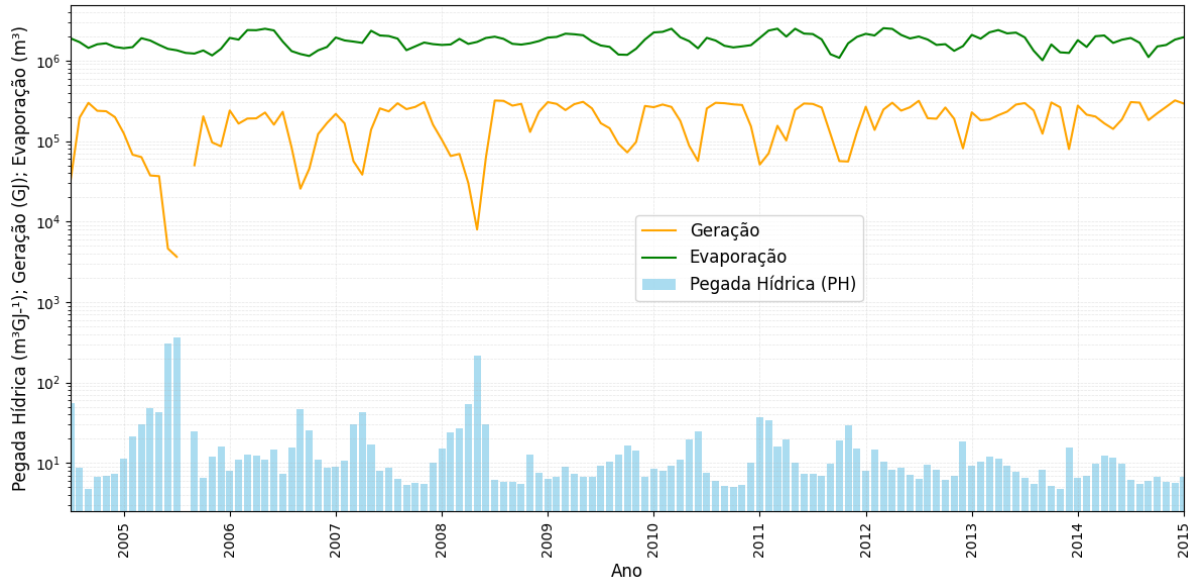


Figura 25 - Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE FND para toda série de dados.

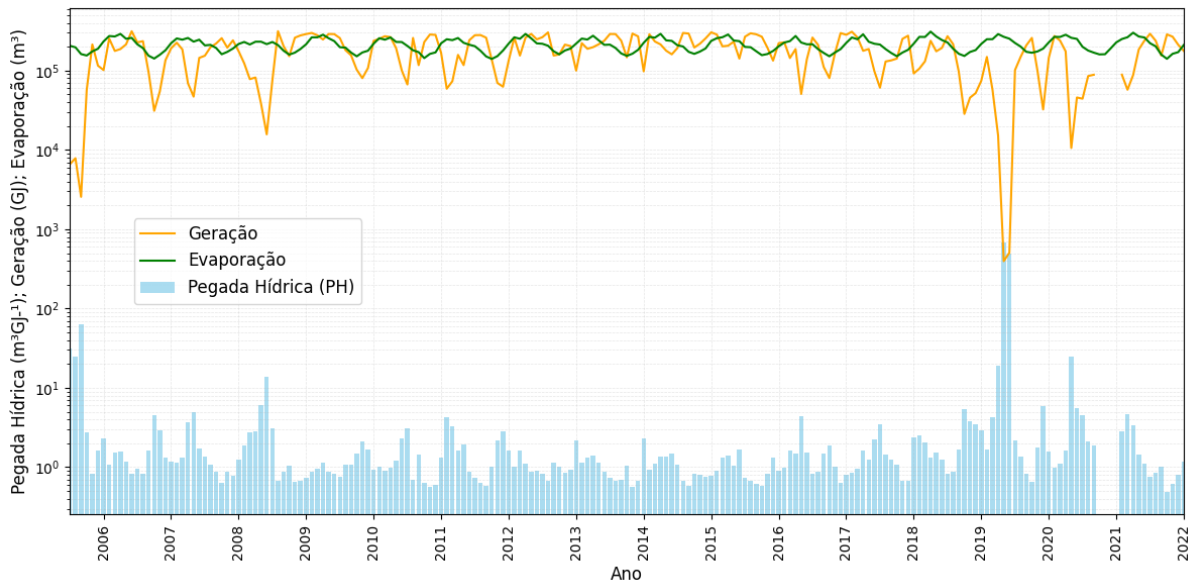
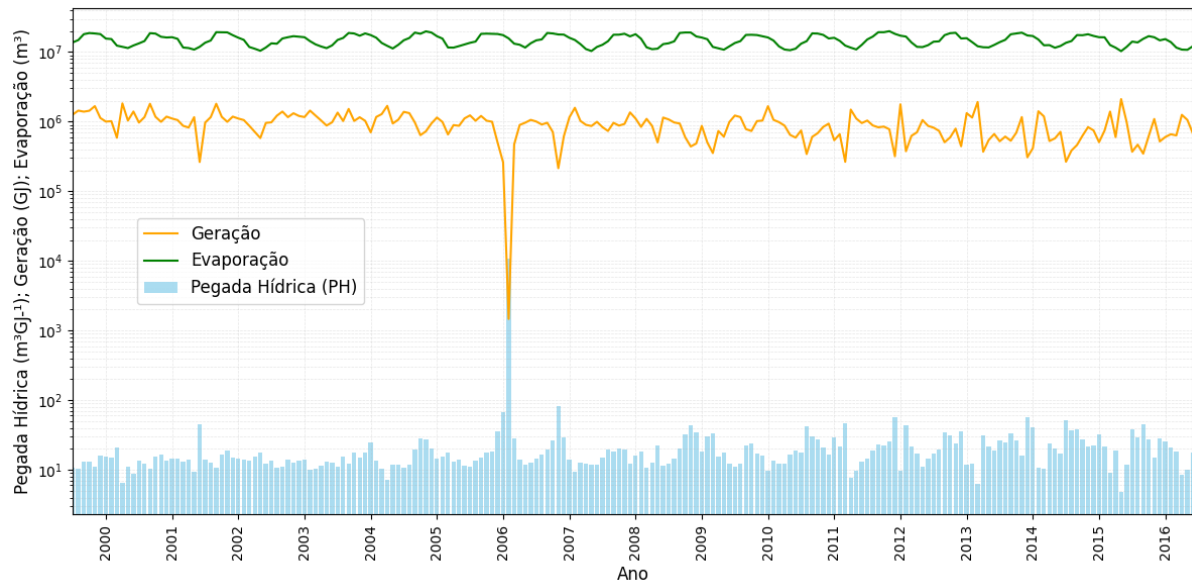


Figura 26 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE GJR para toda série de dados.



### 3.4.1 Meses sem Geração de Energia

A Tabela 9 apresenta os meses que tiveram geração nula de energia, os quais foram desconsiderados para fins de cálculo. Os meses com baixa geração de energia não foram desconsiderados, visto que são representativos para a série de dados.

Tabela 9 – Meses sem geração de energia.

Usina	Meses
SCL	Agosto/2006;
FND	Setembro/2021; Outubro/2021; Novembro/2021; Dezembro/2021

### 3.4.2 Variabilidade Interanual

Na Tabela 10 estão expostos os resultados da mediana das pegadas hídricas anuais e nas Figura 27 e Figura 28 podem ser observados os gráficos de variabilidade interanual, para os empreendimentos hidrelétricos estudados. Nessa parte, para apresentação dos gráficos, na UHE GJR optou-se por retirar o outlier.

Tabela 10 – Medianas anuais das pegadas hídricas.

Usina	PH mediana anual (m <sup>3</sup> GJ <sup>-1</sup> ) WREVAP	PH mediana anual (m <sup>3</sup> GJ <sup>-1</sup> ) BR-DWGD
GBM	95,75	221,50
GNB	142,15	116,23
SCL	120,99	164,80
FND	19,11	19,72
SSN	421,84	455,93
SOS	68,66	65,64
GJR	245,91	221,50
IGU	691,96	120,72

Figura 27 – Variabilidade interanual da pegada hídrica para a evaporação do BR-DWGD.

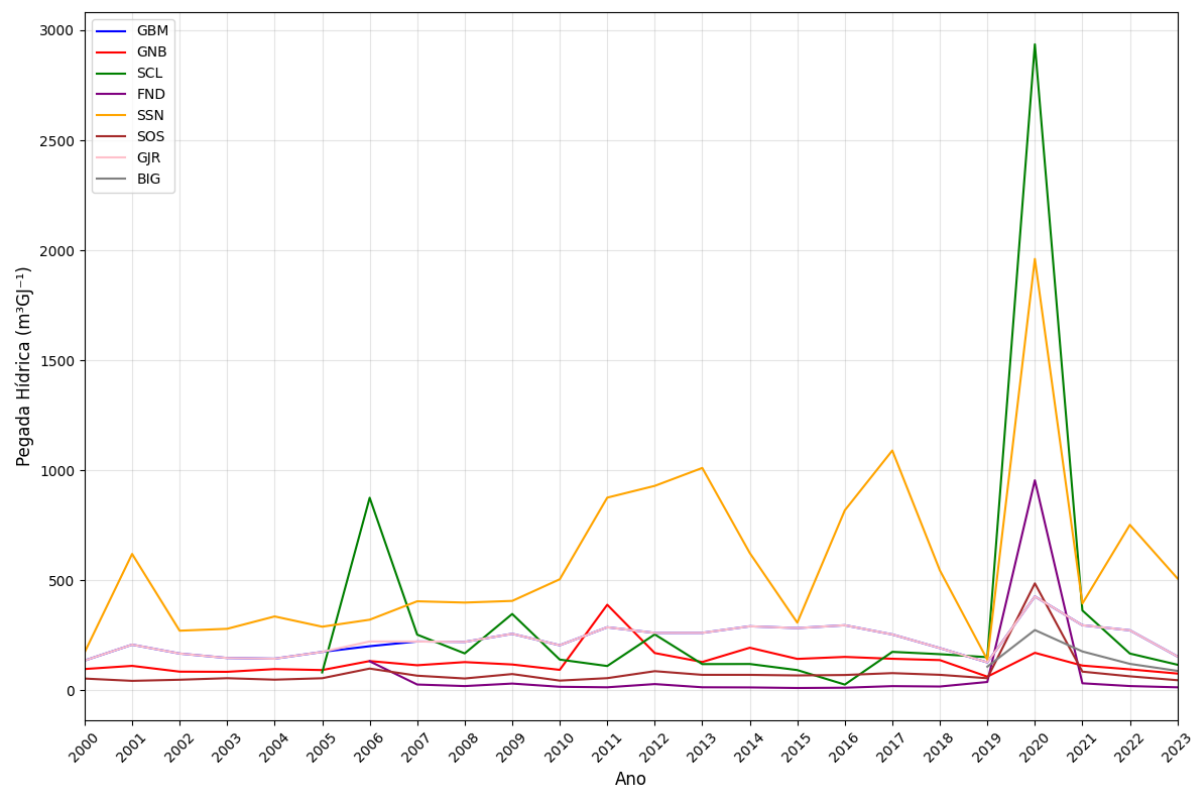
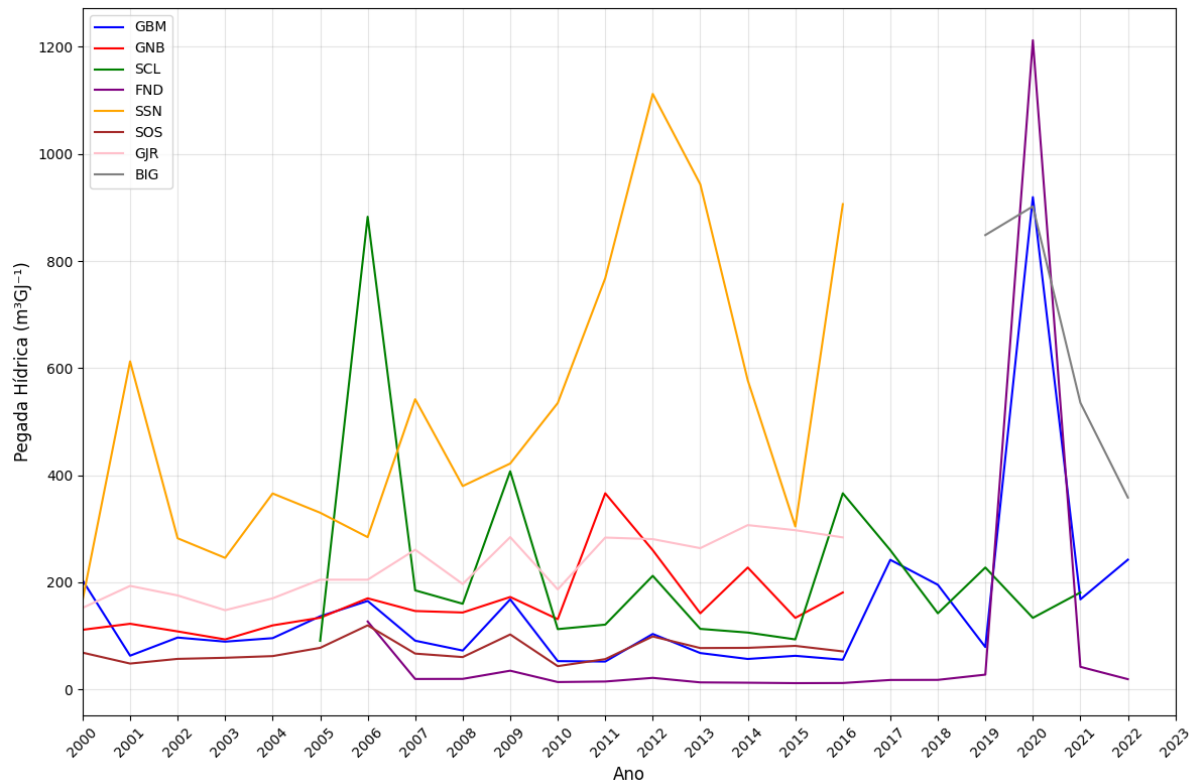


Figura 28 – Variabilidade interanual da pegada hídrica para a evaporação do WREVAP.



Observa-se grande variabilidade entre as usinas para ambos métodos de evaporação. A usina Salto Santiago (SSN) é a usina com maior variabilidade e também com maiores valores de pegada hídrica anual. Já nas usinas de Segredo e Foz do Areia (GNB e GBM), pode-se concluir que há pouca inconstância na série de dados.

As UHEs Santa Clara (SCL) e Fundão (FND) estão localizadas no Rio Jordão dispostas em cascata, onde SCL regula a vazão para FND, ambas têm a mesma capacidade de geração, porém com áreas alagadas diferentes. Isso pode justificar a grande diferença entre as pegadas hídricas das usinas.

Conforme observado, todas exceto a usina de Segredo (UHE Gov. Ney Aminthas de Barros Braga, GNB), tiveram sua pegada hídrica máxima no ano de 2020. Neste ano, principalmente no sul do Brasil, na bacia do Rio Paraná, houve uma seca intensa no final do verão, onde apresentou um dos maiores déficits trimensais pluviométricos (GRIMM *et al.*, 2020; Pelinson, Fan; 2023). Mas em julho de 2020, as chuvas ocorridas nos estados do Paraná e Santa Catarina contribuíram para uma leve recuperação hidrológica na bacia hidrográfica que abastece a UHE Segredo (Gov. Ney Aminthas de Barros Braga, GNB). A vazão afluente neste mês foi cerca de 54% da média histórica de julho, representando uma melhora significativa em

comparação ao mês anterior, quando foi de apenas 22% da média. (CEMADEN, 2020) Em virtude disso, a pegada hídrica de GNB naquele ano não foi tão expressivamente alta igual as outras usinas da bacia.

Para as pegadas hídricas anuais estimadas com o WREVAP, pode-se concluir que há picos bem definidos nos anos de 2006, 2009, 2012 e 2020. Esses picos provavelmente estão mais relacionados a estiagens ou cheias ocorridas na época, do que mudanças operacionais e variações na eficiência, visto que ocorre para a maioria das usinas.

No APÊNDICE C – Pegadas Hídricas Anuais apresenta-se os gráficos da variabilidade interanual de cada usina separadamente.

### **3.4.3 Variabilidade Intra-Anual**

No APÊNDICE D – Pegadas Hídricas Mensais, apresenta-se os gráficos da variabilidade intra-anual para cada usina. Em geral, utilizando a evaporação do BR-DWGD as pegadas hídricas mensais ficaram maiores nos meses de verão (novembro e dezembro), e menores no inverno. Totalmente o inverso pelo estimado pelo WREVAP, que o pico da PH fica nos meses de abril a julho. Isso pode ser explicado pelo próprio resultado das evaporações, pois seguem a mesma tendência.

Nas Figura 29 e Figura 30 pode ser verificada a pegada hídrica intra-anual da UHE Foz do Areia (GBM). Também pode-se verificar que os meses de maior pegada hídrica também são os de maior variabilidade entre os valores. Observa-se que há sazonalidade, mas esta depende fortemente da evaporação

Figura 29 – Pegada hídrica mensal pelo WREVAP com os quartis 25 e 75.

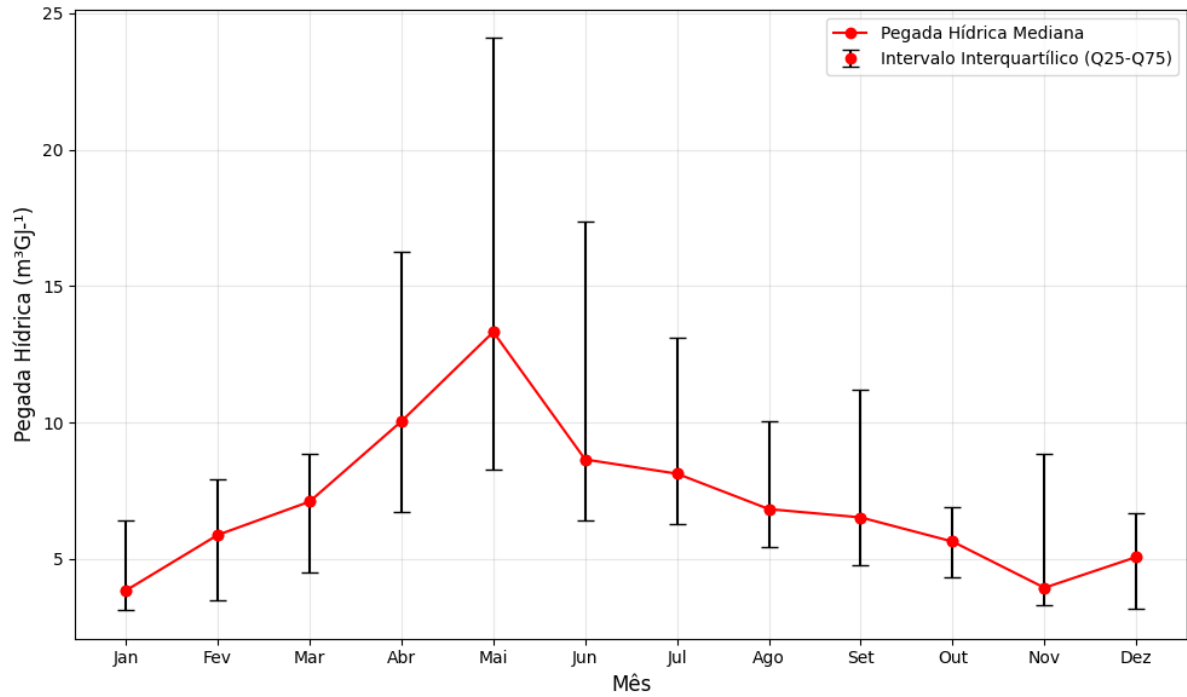
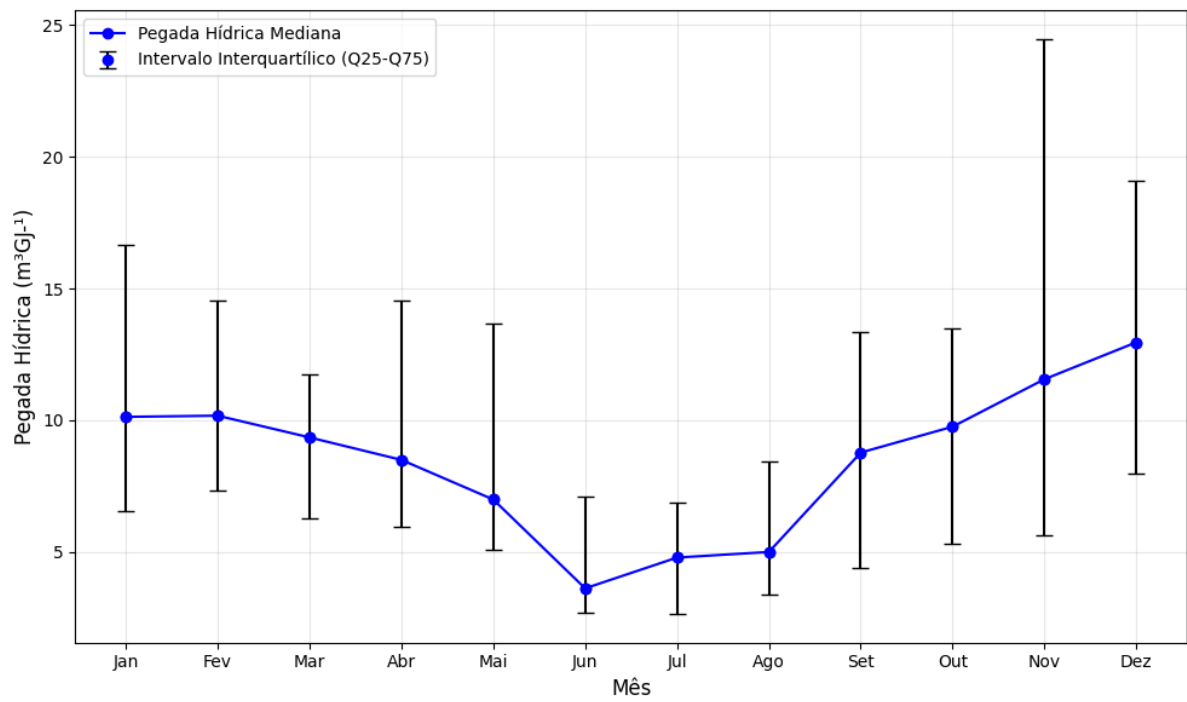


Figura 30 – Pegada hídrica mensal pelo método BR-DWGD com os quartis 25 e 75.





### 3.4.4 Caracterização da Pegada Hídrica de Anos Secos e Úmidos

Os resultados da caracterização da precipitação para a UHE Salto Santiago, estão demonstrados na Tabela 11. A média foi 1706 mm/ano e desvio padrão de 247 mm. Conforme observado, o ano mais úmido para a região foi 2015 e o mais seco o de 2006.

Tabela 11 – Índice de anomalia de precipitação (IAP) para a UHE SSN

Ano	IAP	Classificação
2016	1,1	Ano úmido
<b>2015</b>	<b>1,9</b>	<b>Ano muito úmido</b>
2014	0,9	Ano úmido
2013	0,5	Ano normal
2012	-1,5	Ano muito seco
2011	0,2	Ano normal
2010	-0,7	Ano seco
2009	0,6	Ano úmido
2008	-1,0	Ano seco
2007	-0,3	Ano normal
<b>2006</b>	<b>-1,9</b>	<b>Ano muito seco</b>
2005	0,4	Ano normal
2004	-0,7	Ano seco
2003	-0,9	Ano seco
2002	-0,2	Ano normal
2001	-0,9	Ano seco
2000	1,0	Ano úmido

As Figura 31 e Figura 32 apresentam a precipitação em mm, juntamente com a pegada hídrica e o nível de água, para o ano mais seco (2006) e mais úmido (2015), respectivamente. Durante o ano de 2006, caracterizado como seco, é possível observar uma queda no nível do reservatório, logo após um mês de baixa precipitação, e é inverso a pegada hídrica, que aumenta com a diminuição do nível.

No ano de 2015, considerado o mais úmido, observa-se que a retomada do nível do reservatório foi juntamente com a retomada da precipitação. Notavelmente, em dezembro, o nível registrado ficou próximo do NA máximo, coincidindo também com a maior precipitação para o período. É importante ressaltar que o reservatório da UHE SSN é de acumulação e está interligado a três usinas a jusante operando a fio d'água. Esse sistema pode estar sujeito à regulação do ONS, que, em situações específicas, pode determinar a liberação de água às usinas a jusante.

Figura 31 – Pegada hídrica, precipitação e geração ao longo do ano de 2006 para UHE SSN

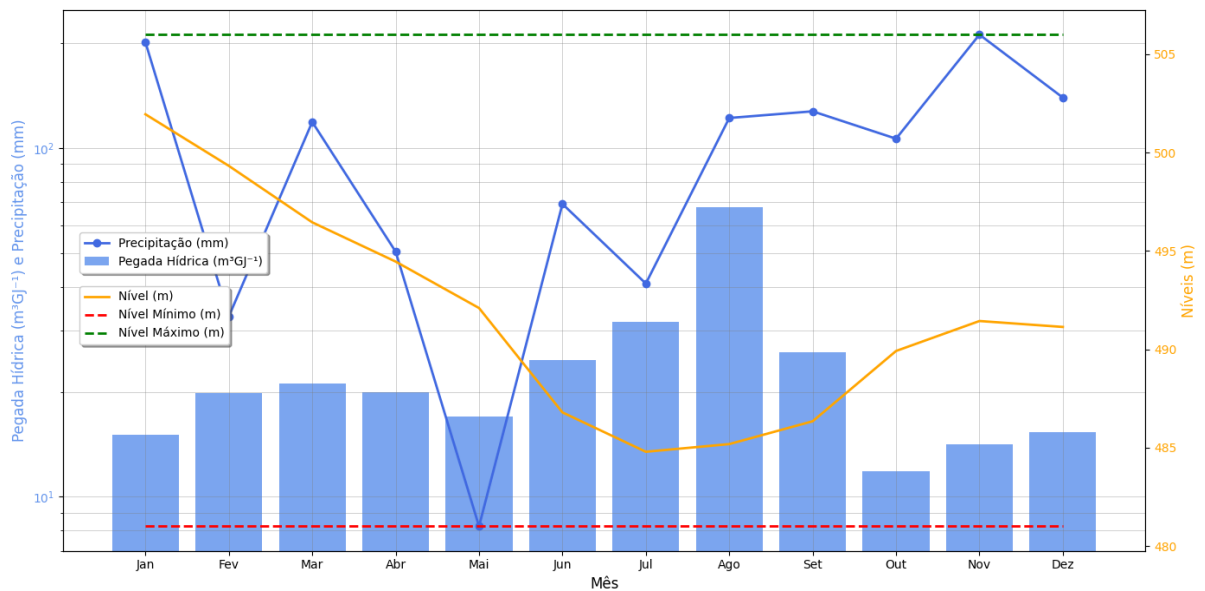
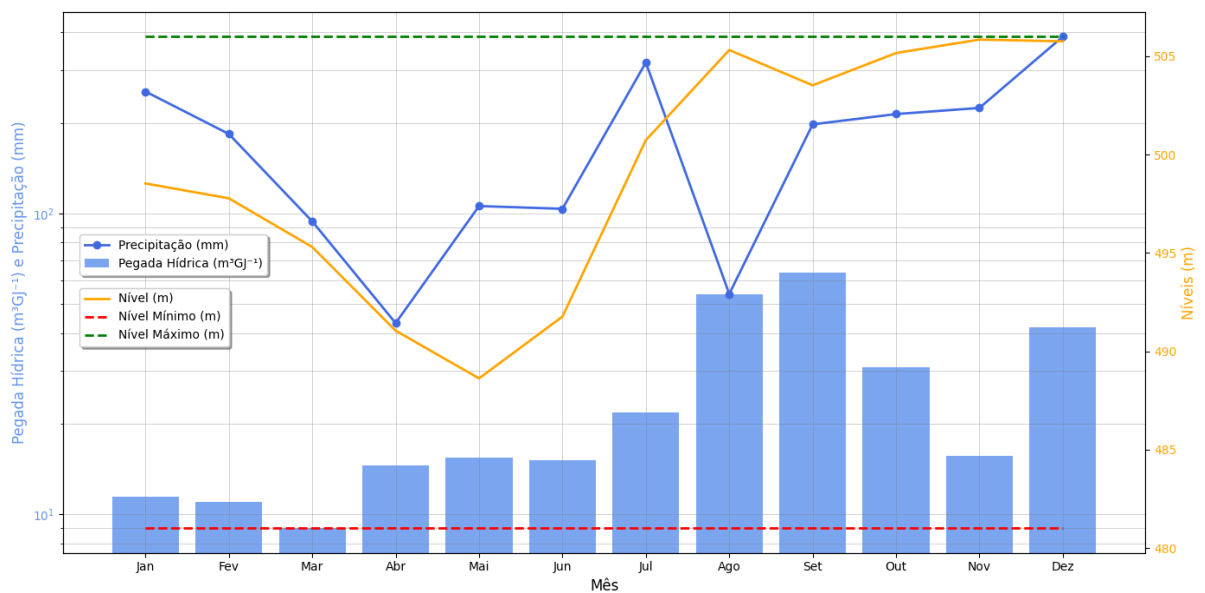


Figura 32 – Pegada hídrica, precipitação e geração ao longo do ano de 2015 para UHE SSN



Os resultados da caracterização da precipitação dos anos para a UHE Salto Osório, estão demonstrados na Tabela 12. A média foi 1874 mm/ano com 214 mm de desvio padrão.

Tabela 12 – Índice de anomalia de precipitação (IAP) para a UHE SOS

Ano	IAP	Classificação
2016	-0,8	Ano seco
2015	-0,4	Ano normal
<b>2014</b>	<b>1,8</b>	<b>Ano muito úmido</b>
2013	1,6	Ano muito úmido
2012	-1,1	Ano seco
2011	-0,1	Ano normal
2010	-0,9	Ano seco
2009	1,5	Ano úmido
<b>2008</b>	<b>-1,4</b>	<b>Ano muito seco</b>
2007	-0,7	Ano úmido
2006	-1,0	Ano seco
2005	-0,3	Ano normal
2004	-0,2	Ano normal
2003	-0,2	Ano normal
2002	1,5	Ano úmido
2001	0,4	Ano normal
2000	0,5	Ano normal

O ano mais seco registrado para a UHE Salto Osório foi 2008, enquanto o mais úmido foi 2014. Na análise do ano de 2008, observa-se uma certa constância no nível da água, que para todos os meses ficou próximo dos 396 metros, mesmo com a precipitação sendo abaixo da média. No mês de maio, onde houve a menor precipitação, coincidiu com a maior pegada hídrica. Para o ano de 2014, considerado o mais úmido, pode ser observado um comportamento similar entre a precipitação e a evaporação, e seus níveis variando de 394 a 396 metros. Como a usina de SOS é a fio d'água, não é esperado grandes diferenças nos níveis do reservatório. Na série de dados de 2000 a 2023, o menor nível foi 394,12, no mês de agosto de 2014, mesmo sendo o ano mais úmido.

As usinas a fio d'água, como a UHE SOS, são mais vulneráveis a períodos de seca, uma vez que não possuem capacidade de armazenamento de água e dependem diretamente da vazão natural do rio. Contudo, a usina a montante (UHE SSN), que opera como reservatório de acumulação, exerce controle sobre a vazão para a SOS. Essa regulação pode atenuar os impactos de fatores climáticos adversos, como a redução da precipitação, tornando menos perceptíveis as quedas na geração de energia, e consequentemente aumento expressivo na pegada hídrica.

Figura 33 – Pegada hídrica, precipitação e geração ao longo do ano de 2008 para UHE SOS

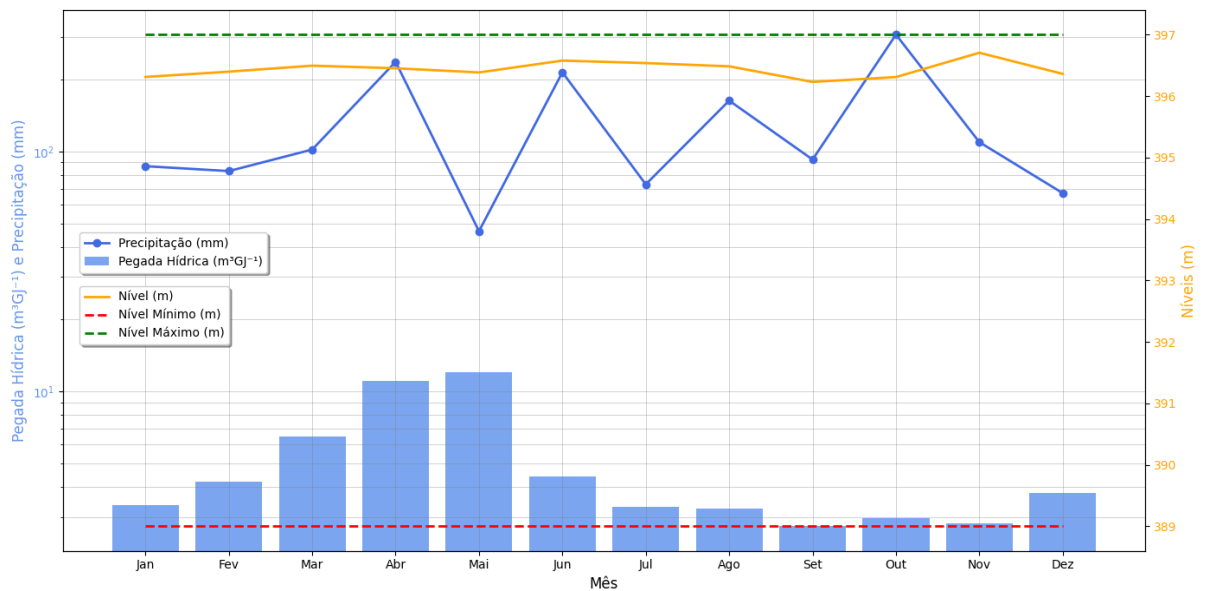
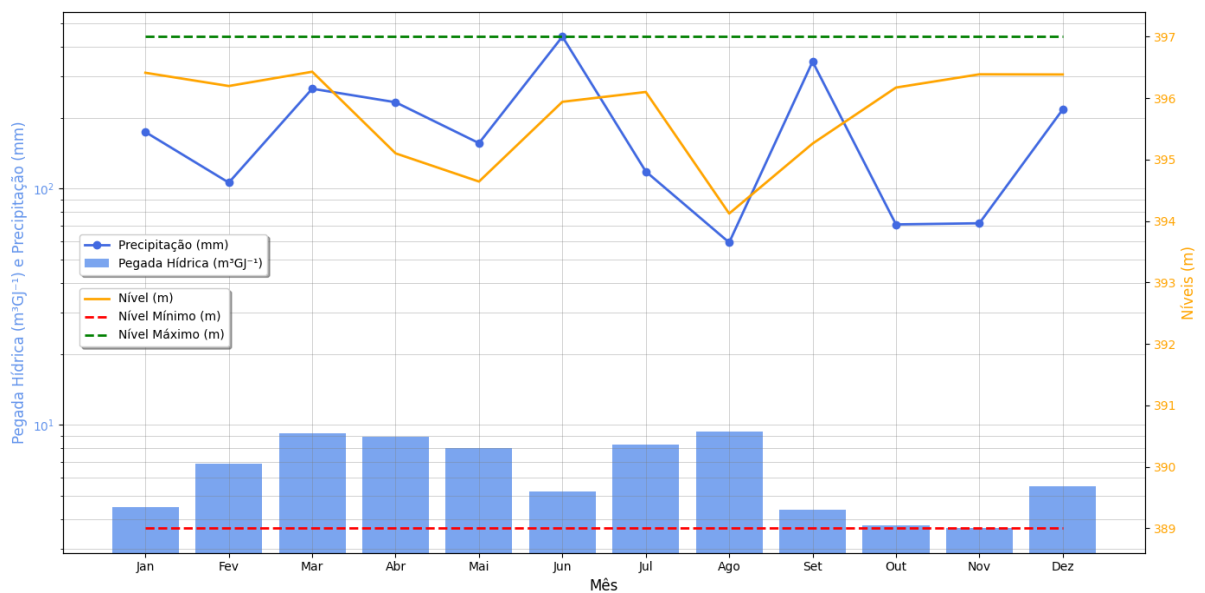


Figura 34 – Pegada hídrica, precipitação e geração ao longo do ano de 2014 para UHE SOS



### 3.4.5 Correlações com as Características

As pegadas hídricas dos empreendimentos hidrelétricos foram associadas a características construtivas e operacionais de modo a se identificar possíveis correlações. Como já apresentado os reservatórios estudados são de dois tipos, 6 usinas a fio d'água e 2 de acumulação, e as duas de acumulação são as que têm maior potência instalada e maiores reservatórios da cascata.

Na Tabela 13 apresenta-se os resultados das correlações da pegada hídrica de acordo com os métodos empregados.

Tabela 13 – Resultados das correlações das características

Método	Variável	Correlação	P-valor	Interpretação
Spearman	Nível de Água	-0,5714	0,1390	Moderada
Kendall	Nível de Água	-0,4286	0,1789	Moderada
Spearman	Potência Instalada	0,2515	0,5479	Fraca
Kendall	Potência Instalada	0,1818	0,5330	Fraca
Spearman	Área Inundada	0,4762	0,2329	Moderada
Kendall	Área Inundada	0,4286	0,1789	Moderada

Para as usinas da bacia do Rio Iguaçu, pode-se concluir que o nível de água e a área inundada são as características que mais apresentam correlação pelos métodos Spearman e Kendall. Nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38 ilustram os gráficos das correlações. E na Figura 35 apresenta-se um *boxplot* da média das pegadas hídricas de acordo com o tipo de reservatório, assim podendo concluir que usinas a fio d'água possuem pegadas hídricas menores que as de acumulação para a bacia do Rio Iguaçu.

Figura 35 – Boxplot do tipo de reservatório pela pegada hídrica

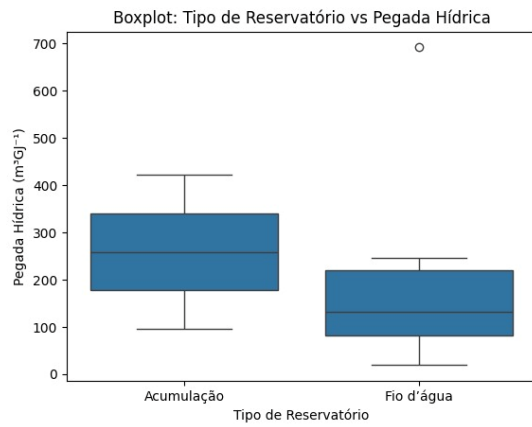


Figura 37 – Correlação potência instalada pela pegada hídrica por Spearman.

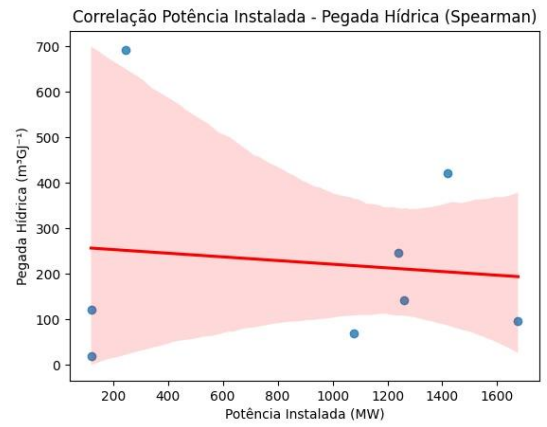


Figura 36 – Correlação área inundada pela pegada hídrica por Spearman.

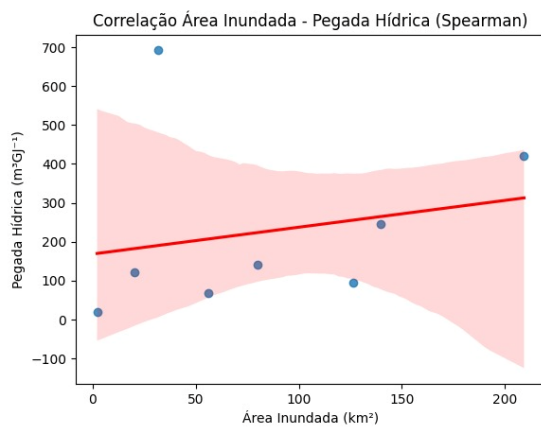
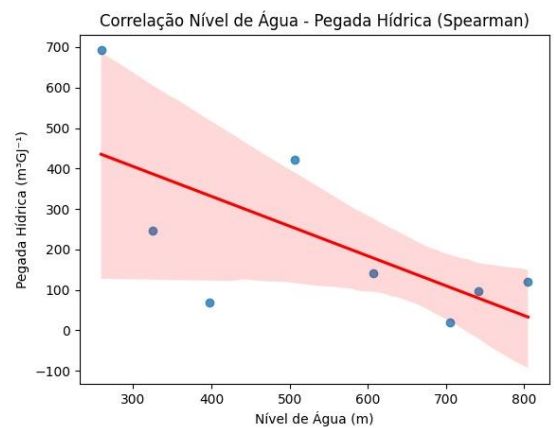


Figura 38 – Correlação do nível de água e pegada hídrica por Spearman.



## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a pegada hídrica para as 8 usinas hidrelétricas da bacia do Rio Iguaçu. Para estes reservatórios, foram estimadas as evaporações de 3 métodos distintos. Para as pegadas hídricas foram analisadas a variabilidade interanual, intra-anual, verificada as correlações entre características e a caracterização de anos úmidos e secos.

Os resultados da pegada hídrica ficaram próximos da literatura disponível. O fator geração de energia é mais dependente da pegada hídrica, do que a evaporação. A evaporação tende a ter um comportamento sazonal, mas a geração não, pois depende de fatores externos principalmente com regras operacionais da ONS.

A pegada hídrica possui um comportamento sazonal intra-anual, e esta depende fortemente da evaporação do reservatório. A PH apresentou dois tipos de sazonalidade distintas: por um lado a pegada hídrica pela evaporação real do reservatório, ficou predominantemente maior nos meses de outono e inverno e baixa nos meses de verão e primavera, totalmente ao contrário quando estimado pela evapotranspiração. Portanto, a definição do método da obtenção da evaporação deve ser minuciosamente escolhida de acordo com as particularidades de cada usina.

As usinas demonstraram grande variabilidade interanual da pegada hídrica, não encontrando-se nenhum padrão. Em 2020 a bacia passou por um ano mais seco do que o normal, o qual quase todos os reservatórios tiveram sua pegada hídrica máxima neste ano.

Quanto a verificação do comportamento de anos secos e úmidos, a análise revelou como o nível de um reservatório pode ser impactado por variações na precipitação, com efeitos distintos, dependendo do tipo de usina. Para usinas a fio d'água, foi verificado não sofrer com o problema de escassez de água, mesmo tendo sido o ano mais seco da série de dados. Entretanto, usinas com essa configuração, no geral, tendem a ser mais vulneráveis a eventos climáticos extremos, visto que não acumulam água. O efeito foi contrário do esperado, pois as usinas do presente estudo possuem um reservatório de acumulação a montante, assegurando a regularização da vazão. Já as usinas de acumulação do presente estudo, tiveram uma maior variação de nível. Além da precipitação, para avaliação de anos secos e úmidos é importante verificar a vazão de entrada dos reservatórios, pois uma chuva extrema a montante da bacia pode encher todo o sistema e beneficiar as usinas a jusante, aumentando a vazão natural do rio.

As correlações entre a pegada hídrica e as características encontradas foram de nível moderado para o nível de água e a área inundada. Também se conclui que usinas a fio d'água tendem a ter pegadas hídricas anuais menores, quando comparadas com reservatórios de acumulação.

Por fim, a autora encontrou algumas limitações, como reduzida série de dados, principalmente de estações meteorológicas próximas dos reservatórios. Neste trabalho avaliou-se somente a pegada hídrica das usinas hidrelétricas (UHE), estas com capacidade mínima de 120 MW e máxima de 1.676 MW, mas na bacia possuem diversos outros empreendimentos hidrelétricos como centrais geradoras (CGH) e pequenas centrais hidrelétricas (PCH). Portanto, considerar este valor de pegada hídrica média para as demais usinas deve ser feito com cautela e verificado individualmente cada caso.

A pegada hídrica em usinas hidrelétricas é um bom indicador de sustentabilidade ambiental e pode servir de auxílio para novas implantações ou manutenções dos sistemas existentes. Como mencionado, as UHEs da bacia do Rio Iguaçu possuem um papel fundamental na matriz energética do sul do Brasil, então demais fatores socioeconômicos e ambientais devem ser considerados na gestão e operação destas usinas.



## REFERÊNCIAS

Allan, JA "Água virtual: um recurso estratégico." *Ground Water* , vol. 36, no. 4, julho-agosto de 1998, pp. 545+. Gale Academic OneFile , link.gale.com/apps/doc/A20990296/AONE?u=anon~67bc6ebf&sid=googleScholar&xid=a8259025 . Acessado em 27 de outubro de 2024.

Agência Nacional de Águas - Especialista em Recursos Hídricos (org.). **Reservatórios: catálogo de metadados da ANA**. Catálogo de metadados da ANA. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/41f4f780-dcda-43d5-80e3-5c9042eb718a>. Acesso em: 17 set. 2024.

BAKKEN, T. H. *et al.* Water consumption from hydropower plants: Review of published estimates and an assessment of the concept. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 10, p. 3983±4000, 2013.

BAKKEN, T. H.; KJOSAVIK, F.; KILLINGTVEIT, Å.; ALFREDSEN, K.. Are Reservoirs Water Consumers or Water Collectors? Reflections on the Water Footprint Concept Applied on Reservoirs. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 29, n. 14, p. 4919-4926, 12 ago. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-015-1104-x>.

BAKKEN, Tor Haakon; KILLINGTVEIT, Ånund; ALFREDSEN, Knut. The Water Footprint of Hydropower Production—State of the Art and Methodological Challenges. **Global Challenges**, [S.L.], v. 1, n. 5, 6 jun. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/gch2.201600018>.

BAUMGARTNER, Gilmar *et al.* Peixes do baixo Rio Iguaçu. [S.L.], jan. 2012. EDUEM. <http://dx.doi.org/10.7476/9788576285861>.

BEEKMAN, Gertjan B.. Gerenciamento Integrado dos Recursos Hídricos. Brasília: Agência de Cooperação Técnica do Brasil, 2020. 60 p.

BLOOMBERGNEF' (org.). **Energy Transition Investment Trends**. 2024. Disponível em: <https://about.bnef.com/energy-transition-investment/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. . Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil. Brasília: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2017. 75 p.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). . **Bem-vindo à ANEEL!** Disponível em: [https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/aneel?p\\_p\\_id=101&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&\\_101\\_struts\\_action=%2Fasset\\_publisher%2Fview\\_content&\\_101\\_assetEntryId=14469158&\\_101\\_type=content&\\_101\\_urlTitle=informacoes-institucionais&inheritRedirect=true](https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/aneel?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=14469158&_101_type=content&_101_urlTitle=informacoes-institucionais&inheritRedirect=true). Acesso em: 06 nov. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Acesso em: 12 nov. 2024.

BRASIL. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. (org.). **Portal de Dados Abertos do ONS**. Disponível em: <https://dados.ons.org.br/>. Acesso em: 10 set. 2024.

BUENO, Eduardo de Oliveira; MELLO, Carlos Rogério de; ALVES, Geovane Junqueira. Evaporation from Camargos hydropower plant reservoir: water footprint characterization. **Rbrh**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 570-575, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616021>.

BUENO, Eduardo de Oliveira. **Evaporação do reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos: caracterização da pegada hídrica** 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

BUENO, Eduardo de Oliveira. **Pegada hídrica das usinas hidrelétricas do Sistema Interligado Nacional na Região Hidrográfica do Paraná**. 2018. 372 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

CANTELLE, Tatiana Dias; LIMA, Eudes de Castro; BORGES, Luís Antônio Coimbra. PANORAMA DOS RECURSOS HÍDRICOS NO MUNDO E NO BRASIL. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 1259, 28 dez. 2018. Centro Universitario de Maringa. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n4p1259-1282>.

COSTA, Djerson M A da; MELO, Henio Normando de Souza; FERREIRA, Sebastião R. INFLUÊNCIA DA SALINIDADE NA TAXA DE EVAPORAÇÃO DA ÁGUA. **HOLOS**, [S. l.], v. 3, p. 4–10, 2007. DOI: 10.15628/holos.2006.14. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/14>. Acesso em: 17 nov. 2024.

COPEL Geração e Transmissão (org.). **Monitoramento hidrológico do Rio Iguaçu**. Disponível em: <https://www.copel.com/mhbweb/paginas/bacia-iguacu.jsf>. Acesso em: 11 set. 2024.

CURTARELLI, Marcelo Pedroso *et al.* Assessment of temporal dynamics of evaporation in the Itumbiara reservoir, GO, using remote sensing data. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, [S.L.], v. 8, n. 1, 30 abr. 2013. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1083>.

ENVEX ENGENHARIA E CONSULTORIA S/S LTDA EPP (org.). **RELATÓRIO TÉCNICO DO LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO NO RIO IGUAÇU E AFLUENTES – REGIÃO DO APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO UHE BAIXO IGUAÇU**. 2017.

FARIAS, Leonel Marques; SELITTO, Miguel Afonso. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 101-106, jun. 2011. Disponível em: <http://pce.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/164/154>. Acesso em: 7 nov. 2024.

FISCHMANN, Felipe. **Estimativa da pegada hídrica de aproveitamentos hidrelétricos no Sul do Brasil**. 2016. 142 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

GOMES, Vitor Goline. ESTIMATIVA DA PEGADA HÍDRICA DA USINA HIDRELÉTRICA BARRA GRANDE. 2017. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

HERATH, I. E. A. The water footprint of hydroelectricity: a methodological comparison from a case study in New Zealand. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 14, p. 1582-1589, 2011. ISSN 0959- 73 6526.

HOEKSTRA, A. Y. Perspectives on water: a model-based exploration of the future. International Books, Utrecht, 1998

HOEKSTRA, A. Y. *et al.* Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of water research report series. Institute for Water Education. Holanda: UNESCO-IHE, 2002. 66p.

HOEKSTRA, A.; CHAPAGAIN, A. Integrated Assessment of Water Resources and Global Change. *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change*, n. April, 2007.

HOEKSTRA, A. Y. How sustainable is Europe's water footprint? *Water and Wastewater International*, v.26, p.24-26, 2011.

IEA (2021), *World Energy Outlook 2021*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.

IEA (2024), *World Energy Outlook 2024*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)

LOPES, Mariana Cristina; TAQUES, Fernando Henrique. O desafio da energia sustentável no Brasil. **Revista Cadernos de Economia**, [s. l], v. 20, n. 36, p. 71-96, jan. 2016.

MARACAJÁ, Kettrin Farias Bem *et al.* Pegada Hídrica como Indicador de Sustentabilidade Ambiental. Reunir –**Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p. 113-125, jun. 2012.

MASSING, Júlia Mella. **Avaliação da pegada hídrica de aproveitamentos hidrelétricos brasileiros**. 2016. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MCMAHON, T. A. *et al.* **Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: A pragmatic synthesis**. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 4, p. 1331 1363, 2013.

MEKONNEN, Mesfin M.; GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, Arjen Y.. The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. **Environmental Science: Water Research & Technology**, [S.L.], v. 1, n. 3, p. 285-297, 2015. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c5ew00026b>.

MORETTO, Evandro Mateus; GOMES, Carina Sernaglia; ROQUETTI, Daniel Rondinelli; JORDÃO, Carolina de Oliveira. **Histórico, tendências e perspectivas no planejamento espacial de usinas hidrelétricas brasileiras: a antiga e atual fronteira amazônica**. *Ambiente*

& Sociedade, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 141-164, dez. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1414-753x2012000300009>.

MORTON, F. I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology*, 1983a. MORTON, F. I. Operational estimates of lake evaporation. *Journal of Hydrology*, 1983b.

MORTON, F. I.; RICHARD, F.; FOGARASI, S. **Operational estimates of areal evapotranspiration and lake evaporation – Program WREVAP**. NHRI Paper ed. Ottawa: National Hydrology Research Institute, 1985.

Neoenergia (org.). **Baixo Iguaçu**. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/energia-hidrica/baixo-iguacu>. Acesso em: 12 out. 2024.

ORIGUELA, Letícia Aparecida. **Estudo da influência de eventos sobre a estrutura do mercado brasileiro de ações a partir de redes ponderadas por correlações de Pearson, Spearman e Kendall**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração de Organizações, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2018.

PARANÁ. INSTITUTO ÁGUA E TERRA. (org.). **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Sistema-de-Informacoes-Hidrologicas>. Acesso em: 15 ago. 2024.

PARANÁ. INSTITUTO ÁGUA E TERRA DO PARANÁ. . **Bacia do Rio Iguaçu**. Disponível em: [https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-07/iguacu.pdf](https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/iguacu.pdf). Acesso em: 11 set. 2024.

RICHTER, B.D.; POSTEL, S.; REVENGA, C.; SCUDDER, T.; LEHNER, B.; CHURCHILL, A. and CHOW, M. 2010. Lost in development's shadow: The downstream human consequences of dams. *Water Alternatives* 3(2): 14-42

SCHERER, Laura; PFISTER, Stephan. Global water footprint assessment of hydropower. *Renewable Energy*, [S.L.], v. 99, p. 711-720, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.021>.

SEMERTZIDIS, T.; SPATARU, C.; BLEISCHWITZ, R. The nexus: Estimation of water consumption for hydropower in Brazil. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, v. 7, n. 1, p. 122-138, 2019.

SILVA, Vicente de P. R. da; ALEIXO, Danilo de O.; DANTAS NETO, José; MARACAJÁ, Kettrin F. B.; ARAÚJO, Lincoln E. de. Uma medida de sustentabilidade ambiental: pegada hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 100-105, jan. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662013000100014>.

SOITO, João Leonardo da Silva; FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos. Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 3165-3177, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.006>.

Sousa, Áurea (2019). Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman. O que medem e em que situações devem ser utilizados?. «Correio dos Açores: Matemática», 21 de Março de 2019, p. 19.

TUCCI, Carlos. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 3. Ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 944 p.

TUNDISI, José Galizia. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. Estudos Avançados, [S.L.], v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142008000200002>.

UDA, Patrícia Kazue. **EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA BACIA DO RIO IGUAÇU POR MEIO DO MODELO METRIC**. 2016. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

XAVIER, Alexandre C. *et al.* Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal Of Climatology**, [S.L.], v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4518>.

Xavier, Alexandre C. *et al.* (2017) An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.

XAVIER, Alexandre C. *et al.* New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal Of Climatology**, [S.L.], v. 42, n. 16, p. 8390-8404, jun. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.7731>.

## APÊNDICE A – ESTIMATIVAS DE EVAPORAÇÃO

Figura 39 – Evaporação anual da UHE GBM.

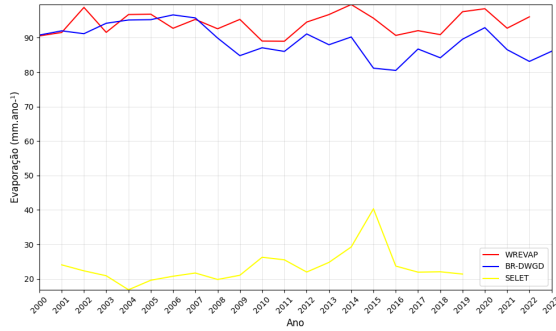


Figura 40 – Evaporação mensal da UHE GBM.

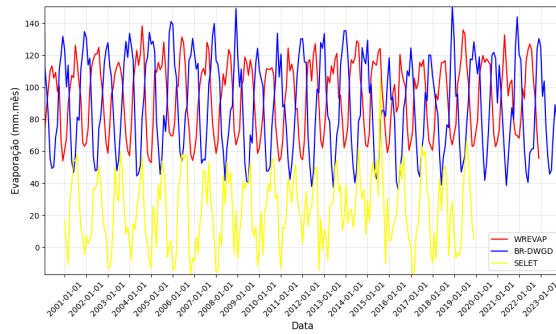


Figura 41 – Evaporação anual UHE GNB.

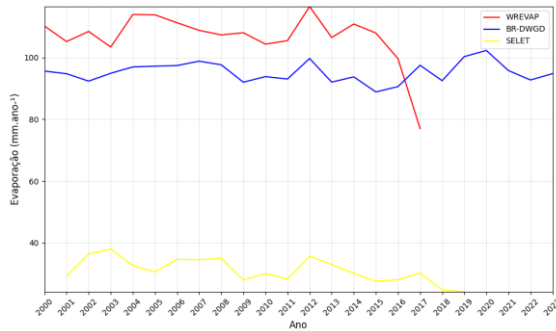


Figura 42 – Evaporação mensal UHE GNB.

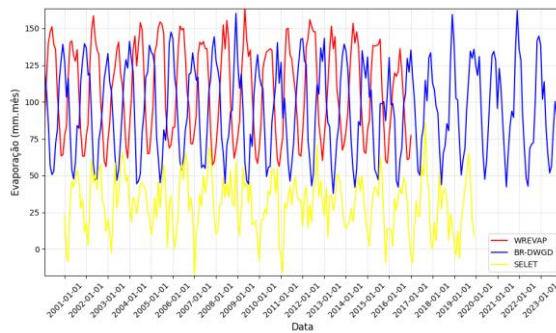


Figura 43 – Evaporação anual UHE SCL.

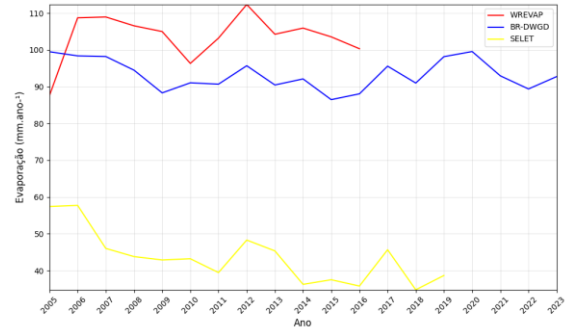


Figura 44 – Evaporação mensal UHE SCL.

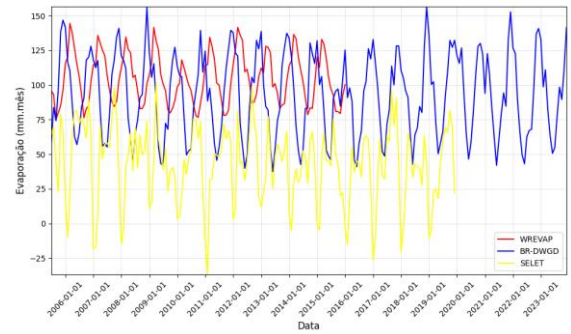


Figura 45 – Evaporação anual UHE FND.

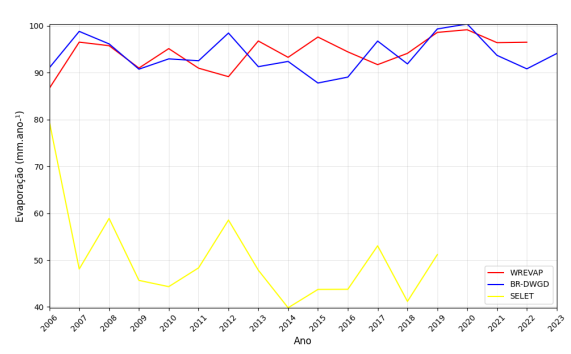


Figura 46 – Evaporação mensal UHE FND.

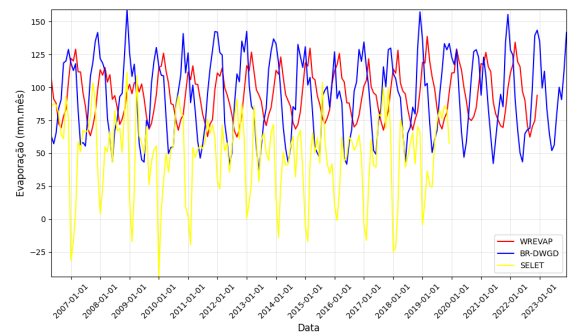


Figura 47 – Evaporação anual UHE SSN.

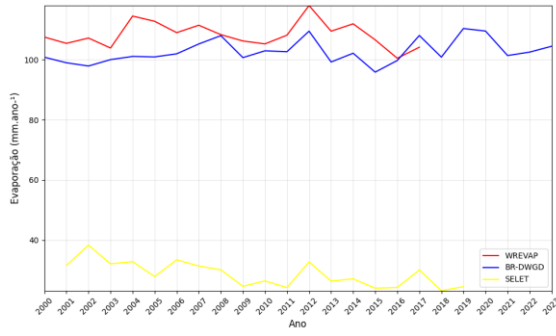


Figura 51 – Evaporação anual UHE GJR.

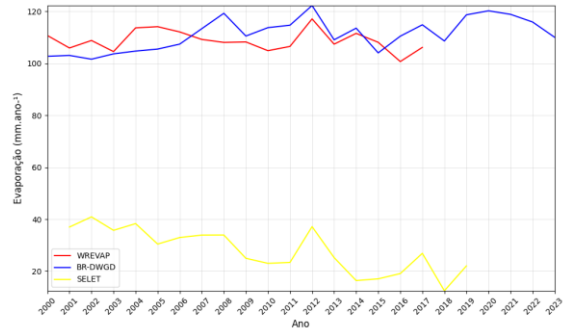


Figura 48 – Evaporação mensal UHE SSN.

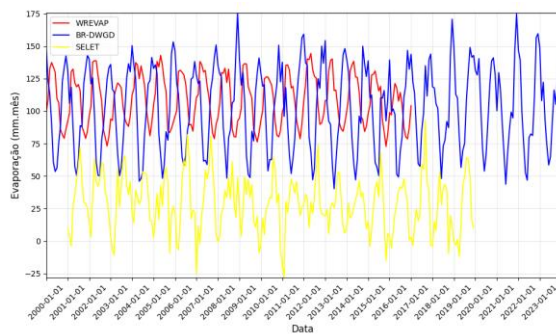


Figura 52 – Evaporação mensal UHE GJR.

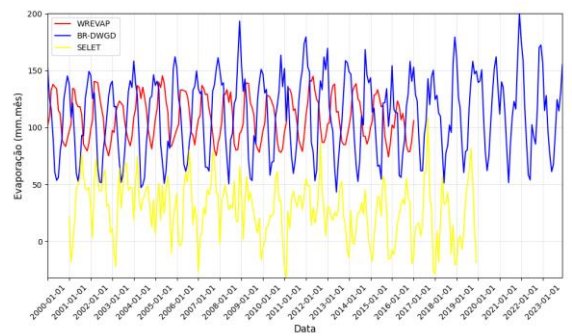


Figura 49 – Evaporação anual UHE SOS.

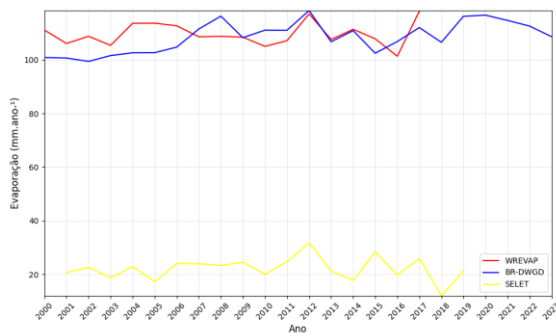


Figura 53 – Evaporação anual UHE BIG.

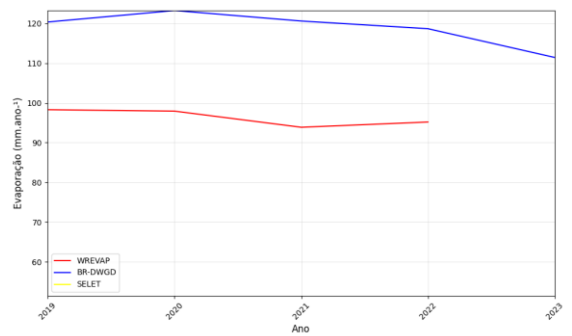


Figura 50 – Evaporação mensal UHE SOS.

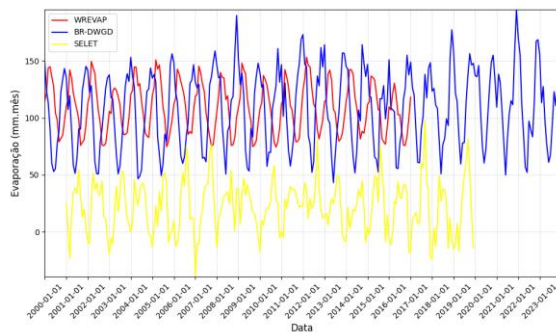
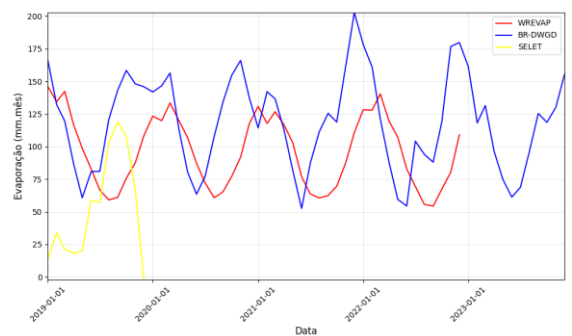


Figura 54 – Evaporação mensal UHE BIG.



## APÊNDICE B – Pegadas Hídricas com Evaporação e Geração de Energia

Figura 55 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE GBM para toda série de dados.

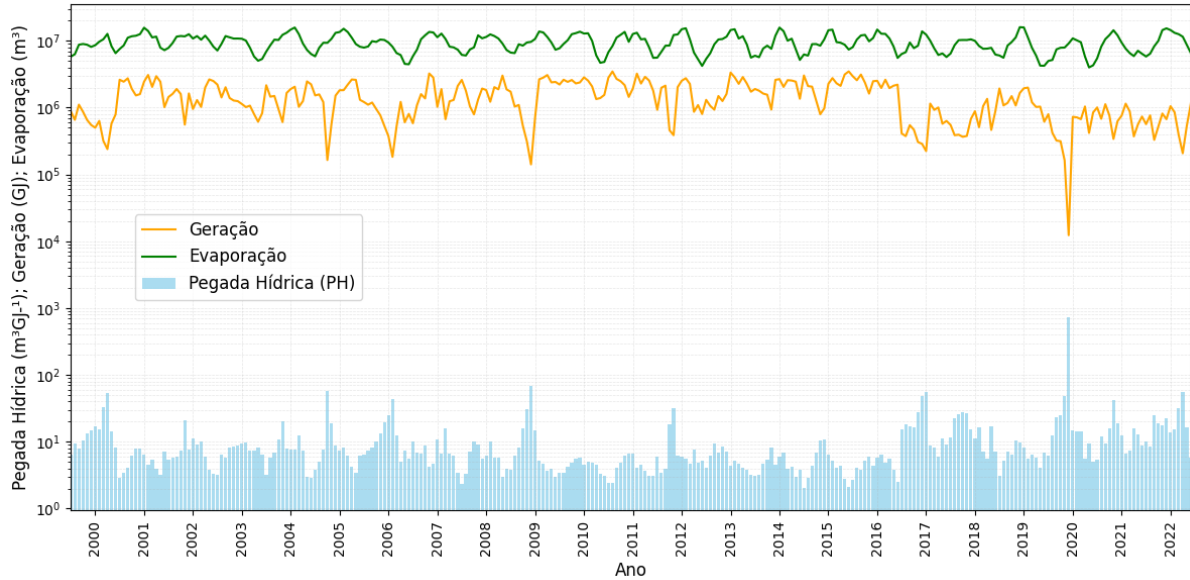


Figura 56 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE GNB para toda série de dados.

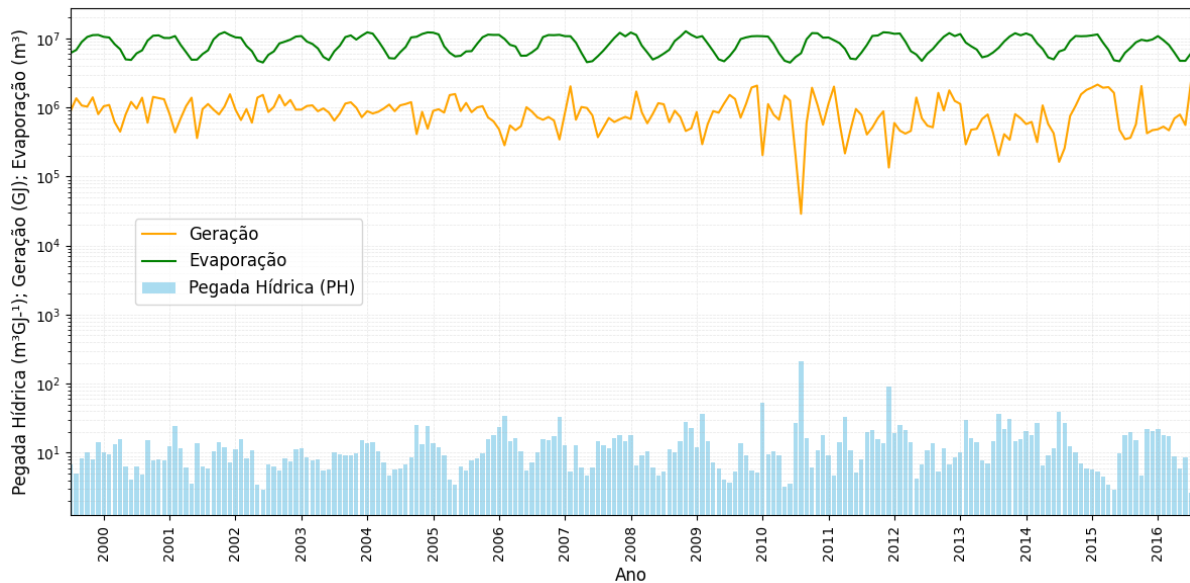




Figura 57 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE SSN para toda série de dados.

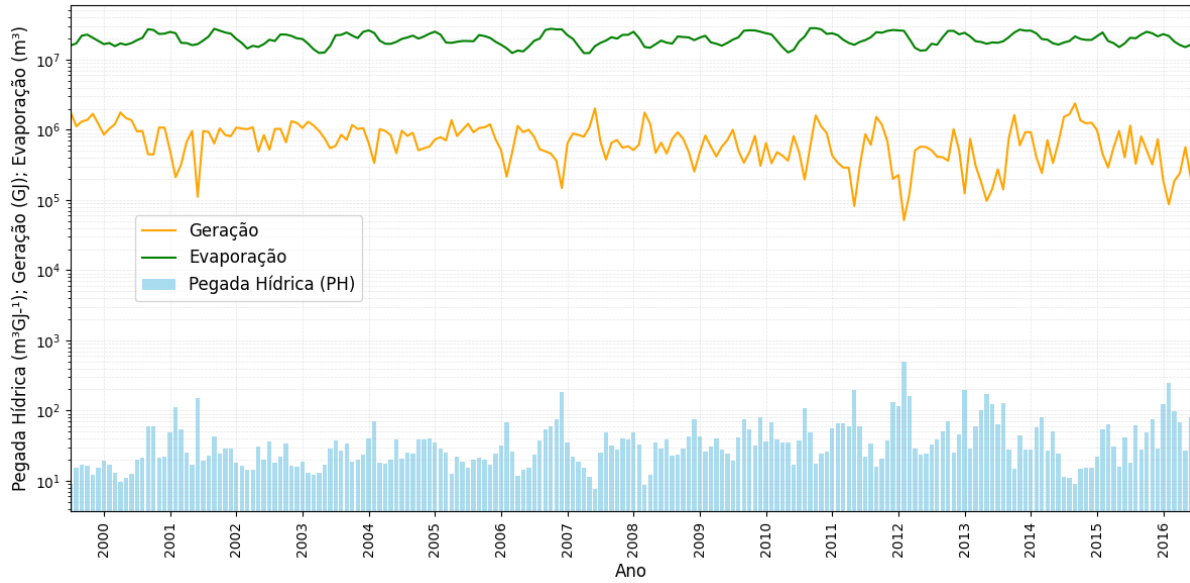


Figura 58 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE SOS para toda série de dados.

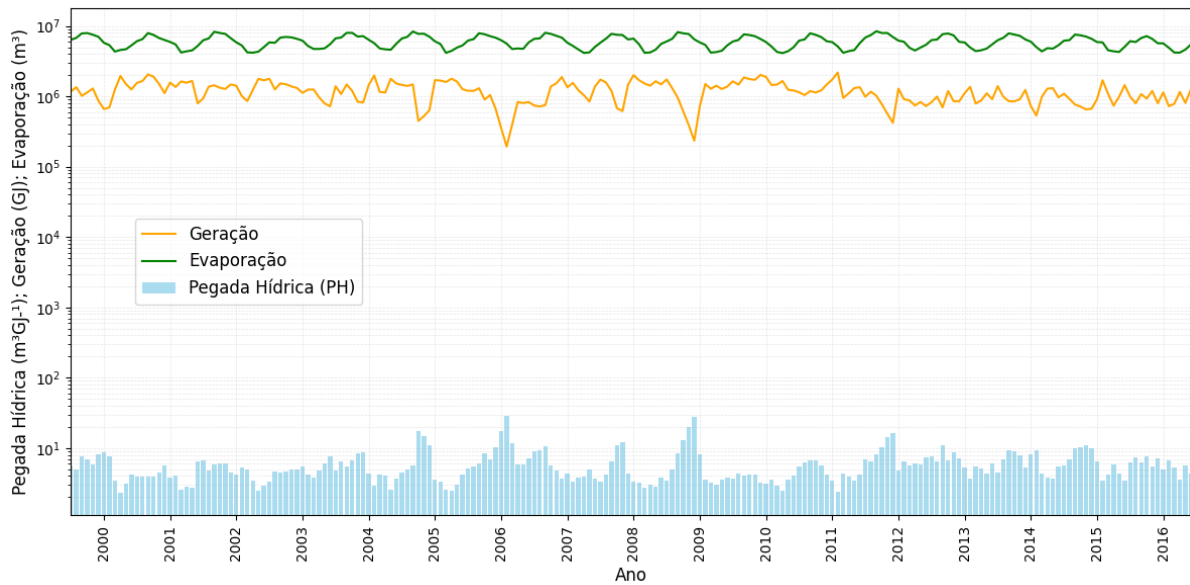
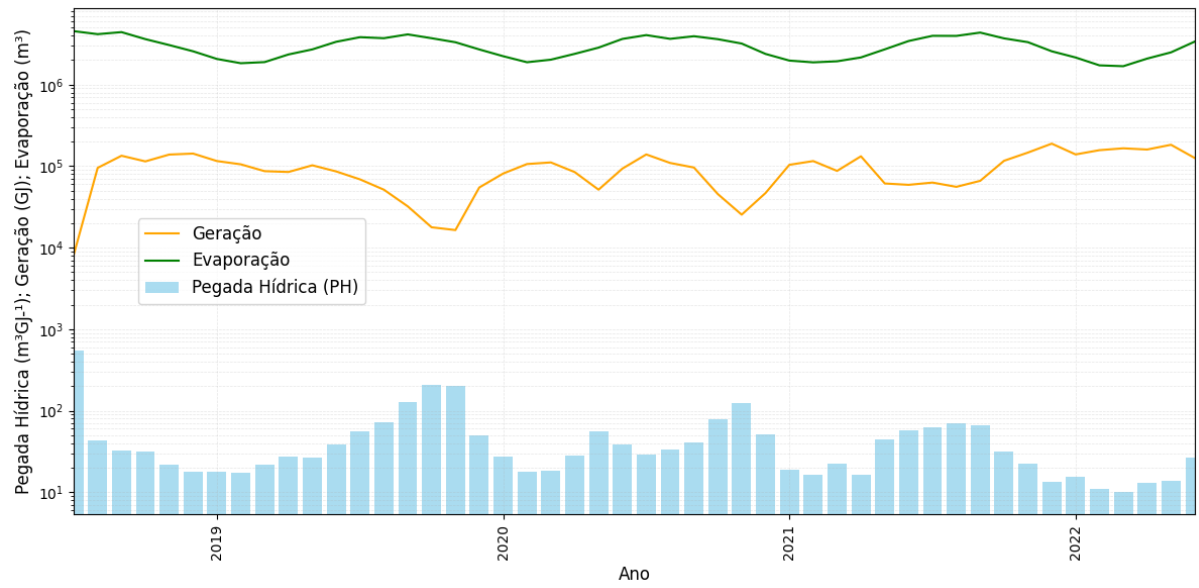


Figura 59 – Pegada hídrica, geração de energia e evaporação mensais da UHE BIG para toda série de dados.



## APÊNDICE C – PEGADAS HÍDRICAS ANUAIS

Figura 60 – Pegada Hídrica anual UHE GBM.

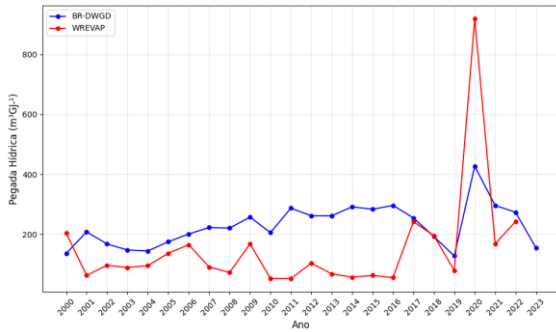


Figura 64 – Pegada hídrica anual UHE SSN.

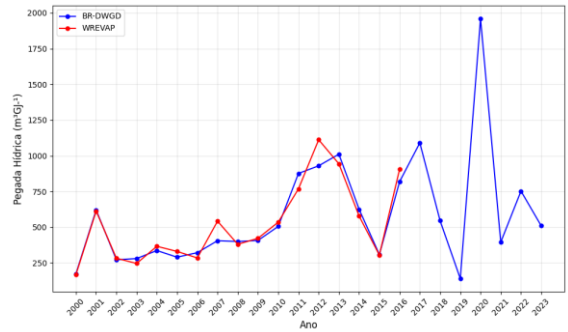


Figura 61 – Pegada hídrica anual UHE GNB.

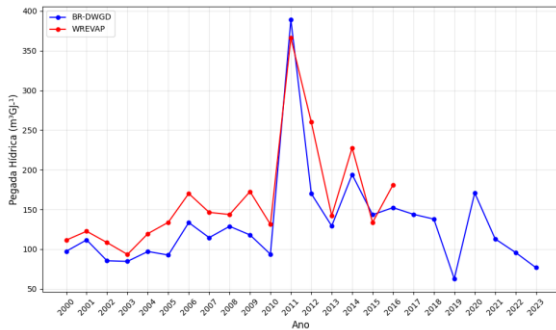


Figura 65 – Pegada hídrica anual UHE SOS.

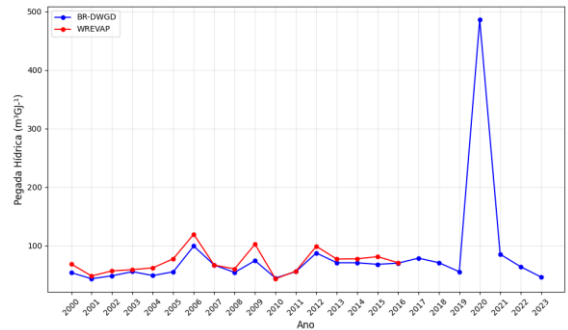


Figura 62 – Pegada hídrica anual UHE SCL.

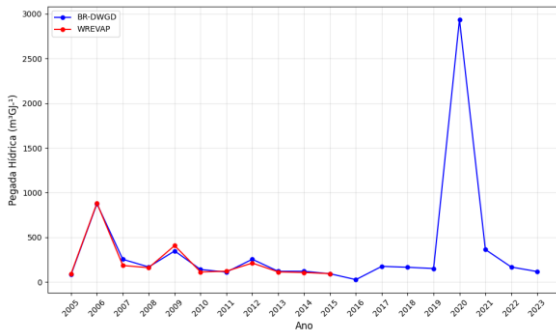


Figura 66 – Pegada hídrica anual UHE GJR sem outlier.

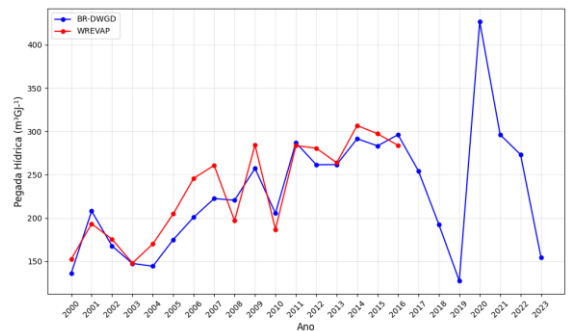


Figura 63 – Pegada hídrica anual UHE FND.

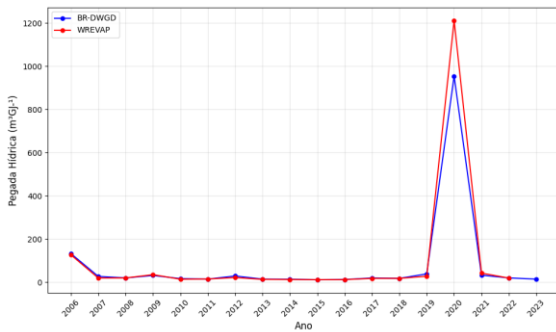


Figura 67 – Pegada hídrica anual UHE GJR com outlier.

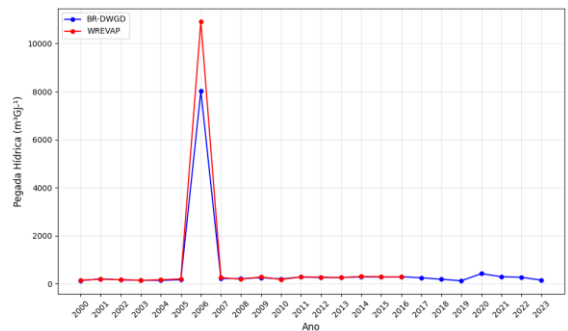
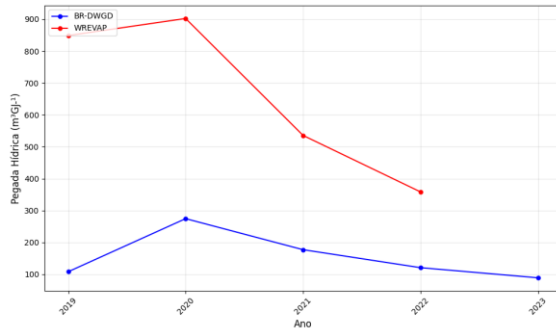


Figura 68 – Pegada hídrica anual UHE BIG.



## APÊNDICE D – PEGADAS HÍDRICAS MENSAIS

Figura 69 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GBM pelo BR-DWGD.

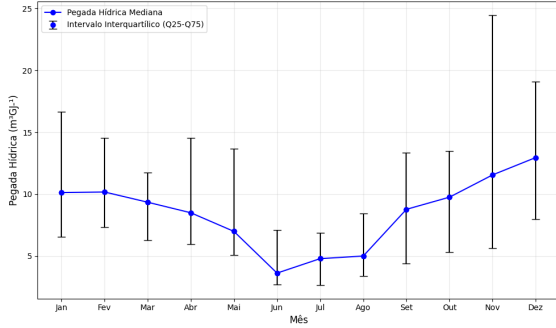


Figura 73 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SSN pelo BR-DWGD.

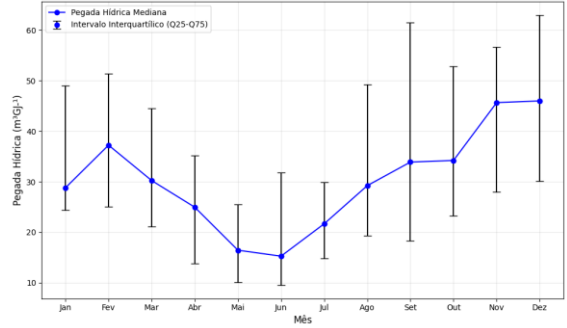


Figura 70 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GNB pelo BR-DWGD.

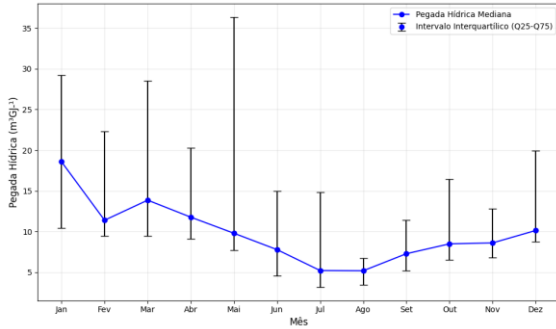


Figura 74 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SOS pelo BR-DWGD.

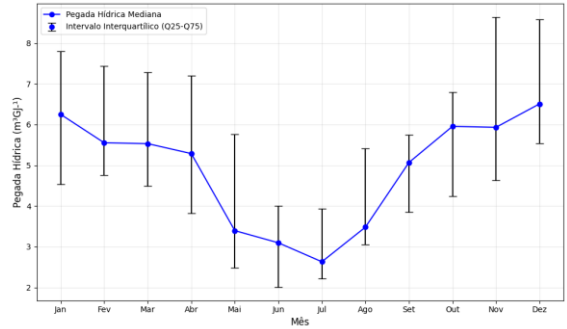


Figura 71 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SCL pelo BR-DWGD.

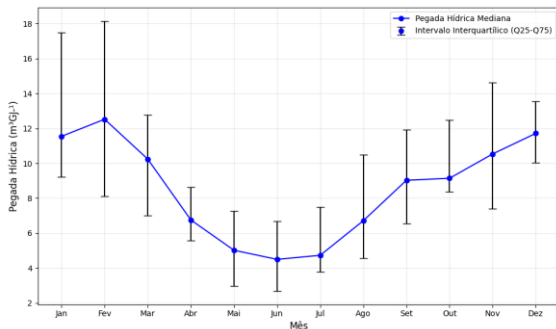


Figura 75 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GJR pelo BR-DWGD.

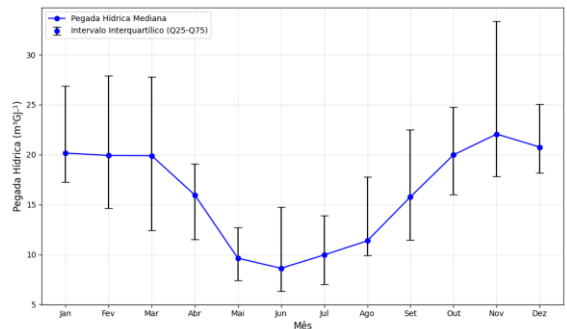


Figura 72 – Média mensal da pegada hídrica da UHE FND pelo BR-DWGD.

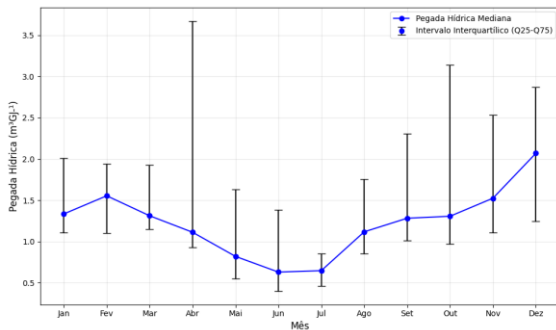


Figura 76 – Média mensal da pegada hídrica da UHE BIG pelo BR-DWGD.

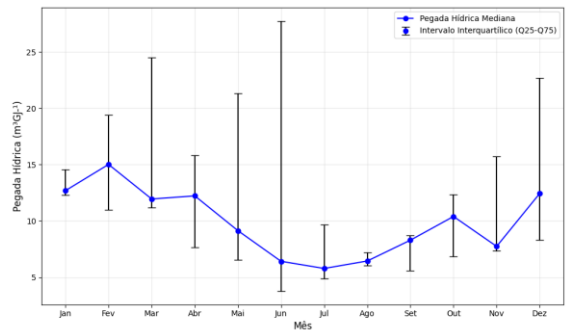


Figura 77 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GBM pelo WREVAP.

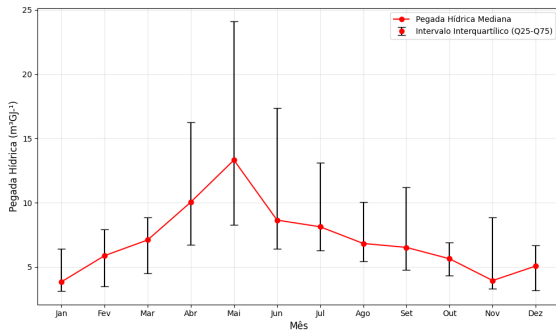


Figura 81 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SSN pelo WREVAP.

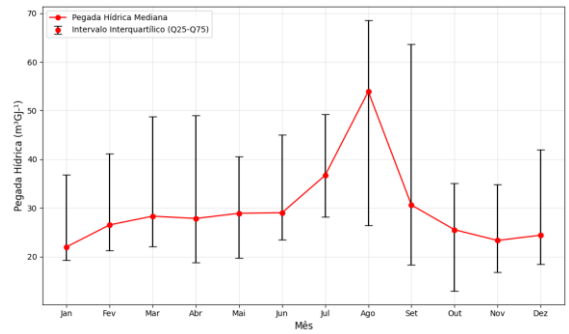


Figura 78 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GNB pelo WREVAP.

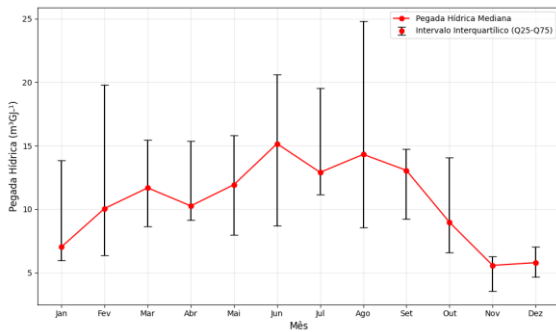


Figura 82 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SOS pelo WREVAP.

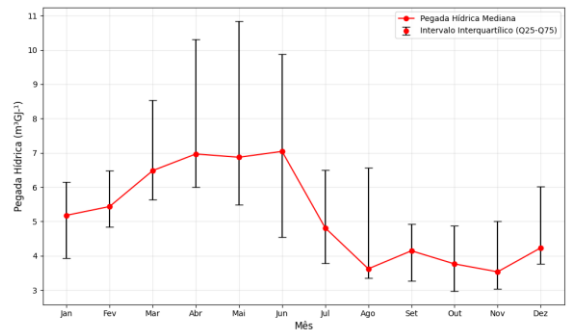


Figura 79 – Média mensal da pegada hídrica da UHE SCL pelo WREVAP.

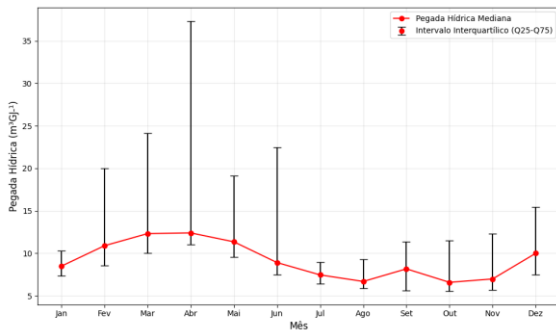


Figura 83 – Média mensal da pegada hídrica da UHE GJR pelo WREVAP.

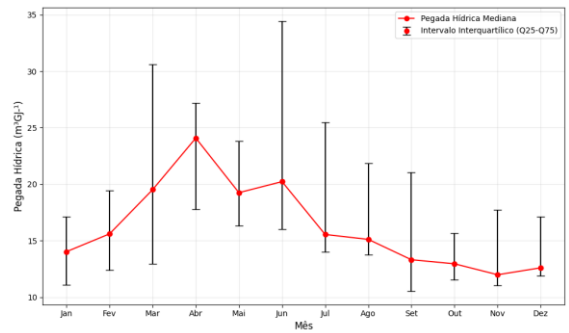


Figura 80 – Média mensal da pegada hídrica da UHE FND pelo WREVAP.

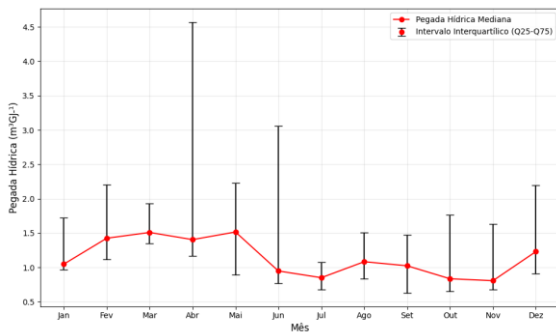


Figura 84 – Média mensal da pegada hídrica da UHE BIG pelo WREVAP.

