



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCO HELBER PEREIRA BERNARDO

**ANÁLISE DAS VAZÕES REGULARIZADAS DOS RESERVATÓRIOS
ESTRATÉGICOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS
POR MEIO DE DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO**

CRATEÚS

2025

FRANCISCO HELBER PEREIRA BERNARDO

ANÁLISE DAS VAZÕES REGULARIZADAS DOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS
DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS POR MEIO DE
DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros
Alexandre.

CRATEÚS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B444a Bernardo, Francisco Helber Pereira.

Análise das vazões regularizadas dos reservatórios estratégicos da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús por meio de diferentes funções objetivo / Francisco Helber Pereira Bernardo. – 2025.
73 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.

1. Função objetivo. 2. SIMRES. 3. SMAP. 4. Vazão regularizada. I. Título.

CDD 620

FRANCISCO HELBER PEREIRA BERNARDO

ANÁLISE DAS VAZÕES REGULARIZADAS DOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS
DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS POR MEIO DE
DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ma. Tatiane Lima Batista
Universidade Federal do Ceará (UFC)

José Kerlly Soares de Araújo (Mestrando)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A Deus, de onde se constrói todas as coisas. E também como nada construímos sozinhos, expresso minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória que vai muito além do conhecimento acadêmico e se torna uma verdadeira construção do que sou.

Agradeço aos meus professores, em especial meu orientador Professor Dr. Alan Michell, que não foram apenas fontes de aprendizado, mas amigos e companheiros de jornada, cada conversa, desafio e troca contribuiu para que eu me reconhecesse um pouco mais a cada dia, ampliando meu horizonte e minha forma de estar no mundo.

Sou grato pela oportunidade de vivenciar esses anos de graduação, um tempo precioso em que o ser se revela não apenas na individualidade, mas sobretudo no encontro com o outro, no reconhecimento mútuo e na partilha constante de experiências que seguem moldando quem me torno. Agradeço em especial aos grandes amigos, Vanutti, Iuri, Eric, Rafaela, Luan, Flávio Renan (Joseph), Michael Douglas, Vildemar, Erinaldo e Wellington, guardarei sempre comigo, de forma carinhosa, os instantes compartilhados, momentos simples que, em sua simplicidade, foram verdadeiros pilares de alegria e força, iluminando os caminhos e tornando a caminhada mais humana e viva, agradeço meu grande amigo Adalberto Felipe, que durante os anos de graduação partilhamos um local que chamávamos de lar.

A meus pais, Aristeu e Edinalva, que estiveram sempre presentes em cada passo, oferecendo apoio, paciência e incentivo, e que sempre tornaram seus também os sonhos que eram meus. Vocês são parte fundamental do que sou, e é por meio desse laço que me fortaleço.

Finalmente, agradeço a mim mesmo, por perseverar, por enfrentar os desafios e por estar aberto a crescer não apenas intelectualmente, mas como ser humano. Que este trabalho seja apenas um capítulo na contínua construção do meu ser - um ser que reconhece, valoriza e celebra cada presença que o fez e o faz existir.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
volta ao seu tamanho original”

Albert Einstein.

RESUMO

Na região semiárida, como o caso do Nordeste brasileiro os recursos hídricos são fundamentais para a sobrevivência e desenvolvimento de uma região, no entanto, a disponibilidade, qualidade e gestão sustentável desses recursos enfrenta desafios crescentes. No Ceará, a Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC) não é diferente, por apresentar alta variabilidade pluviométrica e elevadas taxas de evaporação, o que torna necessário um planejamento eficiente para garantir a segurança hídrica. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar as vazões regularizadas dos reservatórios estratégicos da RHSC, utilizando diferentes funções objetivo, a saber: Índice de Compacidade (IC), Média Absoluta do Erro (MAE), Nash e Sutcliff (NASH), Nash Modificado – Raiz das vazões (NASHraiz) e Raiz do Erro Quadrado Médio (REQM), estas selecionadas levando em consideração a variação de características entre si e pela disponibilidade de dados relacionadas a elas obtidos em estudos anteriores desenvolvidos na região. Utilizando o modelo chuva-vazão SMAP, séries de vazões afluentes dos reservatórios estratégicos da região foram geradas a partir das diferentes funções objetivo, em seguida com auxílio do Software SIMRES foi realizada a simulação de operação destes reservatórios, de modo a se determinar as vazões regularizadas de cada reservatório para os níveis de garantia de 80%, 90%, 95% e 100%. Os resultados indicam para as séries de vazões afluentes variação considerável entre si, sendo as séries da função NASH a mais próxima dos valores médios obtidos através das cinco diferentes séries, e a função REQM apresentando os maiores valores de vazão afluente anual. Na simulação de operação dos reservatórios as cinco funções objetivo mostram resultados satisfatórios, com a função IC apresentando os maiores valores de vazão regularizada, enquanto a função MAE apresenta os menores, as funções REQM e NASH se mostram as mais próximas da média do intervalo obtido através das cinco funções objetivo, sendo REQM a mais próxima.

Palavras-chave: Função objetivo; SIMRES; SMAP; Vazão regularizada.

ABSTRACT

In the semi-arid region, such as the Brazilian Northeast, water resources are essential for the survival and development of the area. However, the availability, quality, and sustainable management of these resources face growing challenges. In Ceará, the Hydrographic Region of the Sertões de Crateús (RHSC) is no exception, as it presents high rainfall variability and elevated evaporation rates, making efficient planning necessary to ensure water security. In this context, the present study aims to analyze the regulated flows of RHSC's strategic reservoirs using different objective functions, namely: Compactness Index (IC), Mean Absolute Error (MAE), Nash and Sutcliffe Efficiency (NASH), Modified Nash – Flow Root (NASHraiz), and Root Mean Square Error (REQM). These functions were selected considering the variation in their characteristics and the availability of related data obtained from previous studies conducted in the region. Using the SMAP rainfall-runoff model, inflow series for the strategic reservoirs in the region were generated based on the different objective functions. Then, with the aid of the SIMRES software, reservoir operation simulations were carried out to determine the regulated flows of each reservoir for reliability levels of 80%, 90%, 95%, and 100%. The results indicate considerable variation among the inflow series, with the NASH function producing values closest to the average obtained from the five different series, and the REQM function presenting the highest annual inflow values. In the reservoir operation simulation, all five objective functions produced satisfactory results, with the IC function yielding the highest regulated flow values, while the MAE function yielded the lowest. The REQM and NASH functions were the closest to the mean of the range obtained from the five objective functions, with REQM being the closest overall.

Keywords: Objective functions; SIMRES; SMAP; Regulated Flow

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquematização do modelo SMAP mensal	19
Figura 2: Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús.....	24
Figura 3: Precipitação média anual para a RHSC.	25
Figura 4: Evapotranspiração potencial para a RHSC.	25
Figura 5: Fluxograma da Metodologia de Pesquisa.	30
Figura 6 - Representação esquemática de uma bacia hidrográfica de um reservatório isolado (item A) e em cascata (item B).	31
Figura 7: Diagramas de Caixa das vazões afluentes anuais.	41
Figura 8: Intervalos de variação das vazões regularizadas dos reservatórios da RHSC.	63
Figura 9: Percentuais das vazões de saída dos reservatórios da RHSC.....	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Erro percentual da média das vazões afluentes.	39
Gráfico 2: Erro percentual do desvio padrão das vazões afluentes.	40
Gráfico 3: Comparação dos Coeficientes de Runoff.	43
Gráfico 4: Comparativo entre os Fatores de Capacidade dos reservatórios.	46
Gráfico 5: Erro percentual dos Fatores de Capacidade.	47
Gráfico 6: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Barra velha.	48
Gráfico 7: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Colina.	49
Gráfico 8: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Cupim.	50
Gráfico 9: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Jaburu II	51
Gráfico 10: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Realejo	52
Gráfico 11: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório São José III.	53
Gráfico 12: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Sucesso.	54
Gráfico 13: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Flor do Campo.	55
Gráfico 14: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Carnaubal.	56
Gráfico 15: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Batalhão.	58
Gráfico 16: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Fronteiras.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Funções objetivo utilizadas no estudo.	32
Tabela 2: SAT e PES referentes a cada função objetivo	35
Tabela 3: Médias anuais de vazões afluentes dos reservatórios em m ³ /s.	38
Tabela 4: Coeficiente de Runoff afluente aos reservatórios.	43
Tabela 5: Deflúvio médio anual dos Reservatórios.	44
Tabela 6: Fatores de capacidade dos Reservatórios.	45
Tabela 7: Resultado da simulação do Reservatório Barra Velha.	47
Tabela 8: Resultado da simulação do reservatório Colina.	48
Tabela 9: Resultado da simulação do reservatório Cupim.	50
Tabela 10: Resultado da simulação reservatório Jaburu II.	51
Tabela 11: Resultado da simulação do reservatório Realejo.	52
Tabela 12: Resultado da simulação do reservatório São José III.	53
Tabela 13: Resultado da simulação reservatório Sucesso.	54
Tabela 14: Resultado da simulação do reservatório Flor do Campo.	55
Tabela 15: Resultado da simulação reservatório Carnaubal.	56
Tabela 16: Resultado da simulação do reservatório Batalhão.	57
Tabela 17: Resultado da simulação do reservatório Fronteiras.	59
Tabela 18: Funções objetivo de mínimas, medianas e máximas vazões regularizadas.	60
Tabela 19: Funções de mínimo, mediano e máximo vertimento dos reservatórios.	61
Tabela 20: Funções de mínima, mediana e máxima evaporação dos reservatórios.	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Delimitação.....	16
1.4	Objetivos.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Disponibilidade Hídrica em Reservatórios Artificiais	17
2.2	Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão	17
2.3	Operação de Reservatórios.....	20
3	ÁREA DE ESTUDO	23
3.1	Caracterização Geográfica e Climática.....	23
3.2	Caracterização dos Reservatórios da RHSC	26
3.2.1	<i>Reservatório Barra Velha</i>	<i>26</i>
3.2.2	<i>Reservatório Colina.....</i>	<i>26</i>
3.2.3	<i>Reservatório Cupim.....</i>	<i>26</i>
3.2.4	<i>Reservatório Jaburu II.....</i>	<i>26</i>
3.2.5	<i>Reservatório Realejo.....</i>	<i>27</i>
3.2.6	<i>Reservatório São José III.....</i>	<i>27</i>
3.2.7	<i>Reservatório Sucesso.....</i>	<i>27</i>
3.2.8	<i>Reservatório Flor do Campo.....</i>	<i>28</i>
3.2.9	<i>Reservatório Carnaubal</i>	<i>28</i>
3.2.10	<i>Reservatório do Batalhão</i>	<i>28</i>
3.2.11	<i>Reservatório Fronteiras.....</i>	<i>28</i>
4	METODOLOGIA.....	30
4.1	Grupos de reservatórios.....	31
4.2	Funções objetivo utilizadas	32
4.3	Levantamento de dados	34
4.3.1	<i>Dados do modelo SMAP.....</i>	<i>34</i>
4.3.2	<i>Dados gerais dos reservatórios.....</i>	<i>35</i>
4.4	Método de Simulação dos reservatórios no SIMRES	36
4.4.1	<i>Geração de Séries sintéticas anuais.....</i>	<i>36</i>
4.4.2	<i>Fragmentação das séries anuais para mensais.....</i>	<i>36</i>
4.4.3	<i>Soma de vazões afluentes</i>	<i>37</i>

4.4.4	<i>Simulação dos reservatórios</i>	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	Simulação chuva-vazão	38
5.2	Simulação da operação dos reservatórios	44
6	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A região Nordeste Brasileira é a terceira maior do país, com uma área de, aproximadamente, 1.520.000 km², constituída por nove estados, sendo, portanto, a região com maior número de unidades federativas, a região é também a segunda com o maior número de habitantes, a população ultrapassa os 56 milhões IBGE (2019), um dos principais problemas enfrentados pela região é a sua elevada vulnerabilidade dos recursos hídricos. As secas são um fenômeno natural, uma alteração do regime hidrometeorológico, e na região elas afetam os habitantes, principalmente os mais vulneráveis do semiárido, criando situações de deficiência hídrica (Eakin et al. 2014).

O Ceará, tal qual outros estados do Nordeste, possui baixa disponibilidade hídrica, devido à combinação de diversos fatores, sobretudo: índices de precipitação inferiores a 900 mm; taxas de evaporação superiores a 2.000mm; irregularidade do regime de precipitação e uma hidrogeologia desfavorável, o estado possui 80% do território sobre rocha cristalina, com camada de solo raso e poucos recursos hídricos subterrâneos (Ceará, 2015).

Deste modo, a grande maioria dos rios são de caráter intermitente, ou seja, são corpos d'água que secam durante o período de seca. As vazões que possam vir a serem encontradas neste período tem como origem a liberação de água dos reservatórios. Os eventos de secas plurianuais exigem que estes reservatórios transportem a água dos anos chuvosos para anos secos subsequentes, este processo caracteriza a regularização plurianual dos reservatórios estratégicos no Estado. A evaporação destes reservatórios impõe perdas de água relevantes neste transporte temporal realizados pelos reservatórios, limitando diretamente a capacidade de regularização (Ceará, 2018).

Na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC) que ocupa uma área de 10.793,80 km² e está localizada na porção ocidental do Estado do Ceará, entre as latitudes 4°36'44"S - 6°07'40"S e longitudes 40°00'00"W - 41°09'16"W COGERH (2021), a situação não é divergente do restante do semiárido nordestino. Segundo a COGERH (2021) o aproveitamento das águas superficiais na RHSC está condicionado à existência de infraestruturas de armazenamento. Sem os reservatórios superficiais, a maior parte do volume afluente no período úmido seria perdido em função da alta variabilidade temporal das vazões, o período chuvoso ocorre em sua maioria entre os meses de fevereiro e maio, ocasionando, portanto, maiores vazões no primeiro semestre, decaindo rapidamente segundo semestre do ano, revelando o caráter intermitente da hidrologia local.

Na RHSC são 10 os reservatórios monitorados pela COGERH sendo eles: Barra Velha, Cupim e Jaburu II, no município de Independência; Realejo, Carnaubal e Batalhão, em Crateús; Colina, em Quiterianópolis; Flor do Campo, em Novo Oriente; São José III, em Iporanga; e Sucesso, no município de Tamboril e mais um em fase de construção, o Fronteiras, no município de Crateús.

1.2 Justificativa

Em regiões semiáridas como os Sertões de Crateús os reservatórios são estruturas de grande importância para abrandar os impactos dos períodos de seca. Durante os anos de 2012 a 2018 os municípios da RHSC enfrentaram uma severa estiagem, o sistema de reservatórios da região chegou a possuir apenas 2,25% da sua capacidade total (Rosa, 2019).

Em julho de 2025, segundo a COGERH os 10 reservatórios estratégicos da RHSC contavam com aproximadamente 17,72% da sua capacidade total de armazenamento. Esse volume reduzido se justificava por conta das características hidrográficas da região e pelas baixas precipitações

A estação de seca exige bastante dos reservatórios da região levando muitos deles a exaustão de suas capacidades, nas quais inúmeras cidades do estado estão suscetíveis a sofrerem com o colapso no seu abastecimento de água.

O município de Crateús durante o período de seca mais recente sofreu com a falta de aporte hídrico por parte dos seus dois principais reservatórios utilizados para o abastecimento urbano, Batalhão e Carnaubal, isso resultou em uma crise de abastecimento de água no município. A solução emergencial foi transposição de água do reservatório Flor do campo, localizado no município de Novo Oriente, a transposição foi feita diretamente pelo leito do rio Poti, mas essa rapidamente se mostrou uma solução ineficiente. Uma nova solução capaz de suprir a necessidade de regularização do sistema veio através da transposição de água do açude Araras, reservatório localizado no município de Varjota com capacidade de 859,53 hm³ através de aproximadamente 150 km de Adutora de Montagem Rápida (AMR).

O conhecimento do regime hidrológico das vazões de regularização dos reservatórios superficiais aumenta extremamente sua importância e relevância quando estes são a principal fonte de recurso hídrico para uma região como os Sertões de Crateús. Assim, as vazões de regularização associadas a um certo nível de garantia necessitam de uma caracterização precisa, fazendo delas uma ferramenta capaz de auxiliar na melhoria do planejamento e gerenciamentos dessas águas para seus diferentes usos a fim de atender os diferentes tipos de demanda da população. Em regiões como a RHSC onde a disponibilidade de dados fluviométricos é escassa,

pode-se utilizar de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, os quais transformam dados pluviométricos, normalmente mais abundantes, em série sintéticas ou pseudo-históricas de vazões. As funções objetivo são equações que mensuram a diferença entre as vazões observadas em uma região e os valores de vazões calculados pelos modelos hidrológicos, gerando assim uma medida que pode ser otimizada (Rosa e Alexandre, 2021).

Desse modo, tornasse perceptível a necessidade de maiores estudos sobre o comportamento dos reservatórios da RHSC e suas capacidades de regularização, de maneira que seja possível identificar suas fragilidades e criar um cenário com uma maior quantidade de dados disponíveis que consigam auxiliar na gestão e na melhoria da tomada de decisões para o sistema, controlando suas demandas, as prioridades de abastecimento ou verificando até mesmo uma possível necessidade de ampliação do sistema.

1.3 Delimitação

Este estudo delimita-se a Região Hidrográfica do Sertões de Crateús compreendendo os 10 reservatórios monitorados pela COGERH e mais 1 em fase de construção. Portanto, sendo objeto deste estudo os reservatórios: Barra Velha, Cupim, Jaburu II, Realejo, Carnaubal, Batalhão, Colina, Flor do Campo, São José III, Sucesso e o Fronteiras que encontrasse em processo de construção.

1.4 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal comparar o regime de vazões afluentes e vazões regularizadas dos reservatórios estratégicos da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús-CE por meio de diferentes funções objetivo.

Os objetivos específicos são:

- Determinar as séries de vazões afluentes dos reservatórios da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús através de diferentes funções objetivos.
- Determinar as vazões regularizadas por meio de diferentes funções objetivo, para diferentes níveis de garantia, dos reservatórios considerando-os de forma isolada e como sistema hídrico integrado.
- Analisar a variação das séries de vazões afluentes e as vazões regularizadas geradas a partir destas séries, quando utilizadas diferentes funções objetivo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Disponibilidade Hídrica em Reservatórios Artificiais

Reservatórios artificiais são estruturas projetadas para armazenar grandes volumes de água, como barragens e açudes, tais estruturas tem como objetivo atender a múltiplos usos, como abastecimento humano, irrigação, agricultura, outras atividades de caráter econômico e lazer. Sua operação e dimensionamento devem considerar a variabilidade das chuvas, o regime dos rios, os impactos ambientais associados e necessidades da região no qual estão inseridos.

Segundo Campos (2005), do ponto de vista da engenharia o processo de dimensionamento de um reservatório artificial conta com duas fases principais, a fase hidrológica, onde serão analisadas alternativas possíveis para capacidade e suas consequências em termos de vazão regularizada e volume acumulado, é também nessa fase que são traçadas as relações entre capacidade, vazão e garantia de abastecimento de água. A segunda fase consiste em incorporar ao processo os conhecimentos hidráulicos, geotécnicos, ambientais e sociais e avaliar custos e benefícios das alternativas.

Em regiões com baixa disponibilidade hídrica, como o caso da região semiárida do Nordeste brasileiro, os recursos hídricos dependem de reservatórios artificiais, visto que são estruturas capazes de armazenar água de períodos chuvosos com intuito de mitigar impactos durante os períodos de seca. A construção de grandes reservatórios ameniza os problemas causados por secas mais severas, porém em si não resolve a falta de água no período de estiagem, principalmente para a população rural. Como forma de buscar solução para esse problema se criou a cultura de construção de pequenos e médios reservatórios, resultando em um grande número de açudes na região Nordeste, muitas vezes de forma emergencial, que não se enquadra dentro de uma política hídrica da bacia hidrográfica, (Campos et al, 2000; Alexandre, 2012).

O dimensionamento de reservatórios na região Nordeste já foi um desafio quase impossível, mas a com a criação, em 1908, da Inspetoria de Obras Contra Secas (IOCS) atualmente Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) iniciou-se um processo de instalação de redes fluviométricas e pluviométricas que permitiram a formação de uma base de dados capazes de subsidiar o dimensionamento e gestão dos reservatórios artificiais na região semiárida.

2.2 Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão

Modelos chuva-vazão são modelos que tentam modelar da forma mais próxima possível do real esse fenômeno hidrológico, mas a realidade complexa desse processo, tornam necessárias diversas aproximações para que seja possível a modelagem. Entretanto, essas aproximações trazem consigo um conjunto de incertezas a essas técnicas. O'Donnel e Canedo (1980 apud Freitas; Porto, 1990), aponta que os registros hidrometeorológicos da bacia em estudo, a estrutura do modelo chuva-vazão e a calibração do modelo são as principais incertezas de modelos deste tipo.

Um exemplo bastante usual de modelo chuva-vazão é o modelo *Soil Moisture Accounting Procedure*, o SMAP. Silva (2019), aponta que o modelo requer como dados mínimos de entrada o histórico de precipitação, dados de evapotranspiração e valores de vazões para a calibração dos parâmetros. Podendo esta ser realizada de forma manual, por meio de tentativas, ou a partir de calibração automática tendo como objetivo chegar em resultados ótimos de uma ou mais equações matemáticas, as denominadas funções objetivo.

Por conta de sua implementação descomplicada, com uma estrutura simples, utilização de poucos parâmetros, e alta capacidade de adaptação, podendo se apresentar nas versões horária, diária e mensal, o SMAP é amplamente utilizado. Em seu modo mensal, o modelo SMAP é composto por dois reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas mensalmente de acordo com as equações 1 e 2:

$$R_{\text{solo}}(i + 1) = R_{\text{solo}}(i) + P - E_s - E_r - \text{Rec} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$R_{\text{sub}}(i + 1) = \text{REC} - E_b \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

R_{solo} = reservatório do solo;

R_{sub} = reservatório subterrâneo;

P = precipitação;

E_s = escoamento superficial;

E_r = evapotranspiração real;

Rec = recarga subterrânea;

E_b = escoamento básico

Para o modelo SMAP, existem seis parâmetros necessários para sua calibração, quatro parâmetros referentes as características da bacia e dois de inicialização. Têm-se que Sat é a capacidade máxima de armazenamento do solo em mm, sendo expressa pela saturação, Pes é o resultado da precipitação subtraída da parcela transferida ao escoamento superficial esse parâmetro é um valor adimensional, $CRec$ é o coeficiente de recarga do solo sendo um valor adimensional, K é a constante de recessão do reservatório subterrâneo, $Tuin$ é a taxa de umidade

inicial do solo e E_{bin} é o escoamento de base inicial. Portanto, sua inicialização se mostra da seguinte forma:

$$R_{solo}(1) = T_{uin} * Sat \quad (\text{Eq. 3})$$

$$R_{sub}(1) = \frac{E_{bin}}{\frac{(1-K)}{Ad * 2630}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

T_{uin} = teor de umidade inicial (adimensional);

Sat = capacidade de saturação do solo;

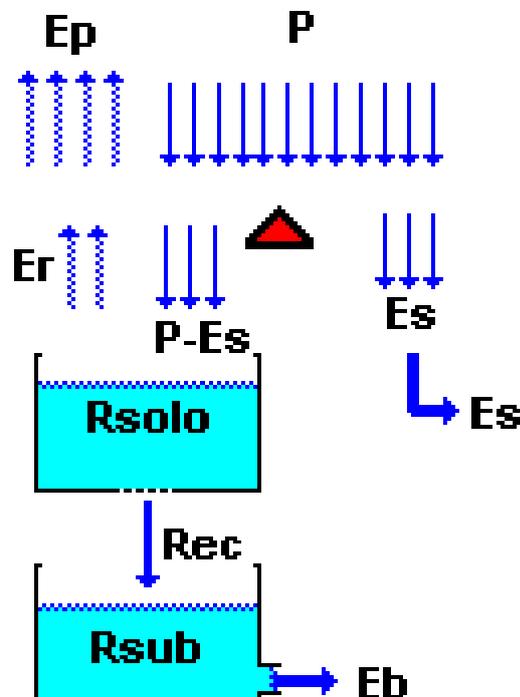
E_{bin} = vazão básica inicial;

K = constante de recessão;

Ad = área de drenagem.

A Figura 1 apresenta a esquematização do modelo SMAP para o regime mensal.

Figura 1: Esquematização do modelo SMAP mensal



Fonte: Alexandre, Sousa Filho e Campos, 2013

Com as variáveis determinadas da seguinte forma:

$$Es(i) = (Tu(i))PEs \times P(i) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$Er(i) = Tu(i) \times Ep(i) \quad (\text{Eq. 6})$$

$$Rec(i) = CRec \times (Tu(i))^4 \times Rsolo(i) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$Eb(i) = (1 - Kk) \times Rsub(i) \quad (\text{Eq. 8})$$

Sendo:

$$Tu(i) = Rsolo(i) / Sat \quad (\text{Eq. 9})$$

A vazão efluente da bacia (Q) é obtida conforme a equação 10, onde Ad é a área da bacia em km²

$$Q = \frac{(Ed+Es)*Ad}{2630} \quad (\text{Eq. 10})$$

A medida de eficiência do ajuste do modelo é medida se buscando valores ótimos resultantes do nível de acerto entre os valores de vazões calculadas pelo modelo e as vazões observadas ou medidas. Esse ajuste se dá através do processo de calibração onde a equação utilizada será maximizada ou minimizada, buscando-se parâmetros que minimizem os erros entre as duas séries de vazões mencionadas, essas equações que medem a precisão do modelo são ditas como funções objetivo. Que tendo como base as suas características algumas podem ser mais indicadas quando se deseja um melhor ajuste para as vazões mais elevadas, assim elas penalizam mais fortemente os erros nos picos, outras possuem como características penalizar as vazões com menores valores, logo elas são indicadas para estudos onde as vazões mínimas teriam maior relevância. Algumas funções contabilizam os erros por igual independente de ser uma vazão de pico, intermediária ou mínimas, por vezes essas acabam por ser mais efetivas para determinação de valores médios.

2.3 Operação de Reservatórios

De acordo com a definição proposta por (Stuart e Campos, 2001) um reservatório entendesse como um sistema aberto, onde ocorre a entrada e saída de volumes de água. Os volumes que entram no reservatório são representados pelas vazões afluentes definidas pela hidrografia natural da sua área de contribuição ou bacia hidrográfica. A operação desses reservatórios consiste em gerir e determinar de forma ordenada o armazenamento e liberação de recursos, de forma que possa suprir cada um dos diversos usos. Uma tarefa bem mais

desafiadora do que aparenta, visto o grau de complexidade de uma correta operação, principalmente em sistemas de múltiplos reservatórios. Com o passar do tempo, os avanços tecnológicos, e desenvolvimento de novas ferramentas computacionais possibilitaram o aprimoramento desses sistemas e a capacidade de reproduzir de forma mais próxima da realidade seus regimes de operação. Yeh (1995), define que a capacidade máxima e mínima de armazenamento, as dimensões das tubulações ou outros equipamentos e a equação de balanço de massa são as principais restrições dos sistemas, para que se atinja as metas de abastecimento.

Portanto, a operação de reservatórios pode ser classificada como uma tarefa sob incertezas, dentre essas podendo se citar as vazões afluentes aos reservatórios, que podem ser obtidas de maneira sintética, seguindo a hipótese de que os parâmetros para a criação dessas séries sintéticas se mantêm ao longo do tempo. Outra incerteza que impacta diretamente na operação, é a geometria do reservatório, esse fator é observado por meio da curva de cota – área - volume (CAV), mas a CAV de projeto de um reservatório e a real podem divergir, essa diferença se agrava com o passar dos anos, devido ao processo de assoreamento do reservatório.

No contexto da região semiárida, como casos de regiões do estado do Ceará que possui solos rasos e compactos, o que dificulta a infiltração da água armazenada em um reservatório, tornando esse volume praticamente nulo. Nesses casos, podemos considerar que as águas de um reservatório efluem apenas de três formas possíveis: evaporação a partir da superfície do lago (espelho d'água), o vertimento (sangria) da água através do sangradouro, e o volume que passa pela tomada de água (retirada) para o suprimento das demandas (Campos, 2015). Ainda de acordo com o mesmo autor, as águas evaporadas por possuírem como destino a atmosfera, são consideradas como perdas para os reservatórios, já as águas vertidas são águas excedentes, que o reservatório não suportaria acumular sem causar danos a sua estrutura, as quais retornam ao curso natural do rio. No caso de não haver reservatórios à jusante ou o aproveitamento de 100% desse volume, de certa forma, ele pode ser considerado como perda de água, pois estas deixariam de fazer parte de um sistema controlado, tendo por destino final o retorno aos oceanos.

A água retirada para usos, também chamada de vazão regularizada, pode ser entendida como o volume que será utilizado para suprir as necessidades de abastecimento, ou seja, é basicamente a disponibilidade de água do reservatório, estando diretamente ligada ao nível de garantia que se pretende para o suprimento d'água. O nível de garantia é definido como sendo a probabilidade de o reservatório prover sem restrições, em um ano qualquer, a vazão regularizada, já a probabilidade do reservatório de não dispor da vazão regularizada é definido como falha (Studart e Campos, 2001). O nível de garantia normalmente utilizado para a

operação dos reservatórios é de 90%. Mas, de acordo com Almeida (2016) se deve trabalhar com mais níveis de garantias para situações mais ou menos restritivas de disponibilidade hídrica, como: 100%, 95%, 85% e 80%.

Como dito, a operação de reservatórios é uma tarefa complexa que deve levar em consideração diversos fatores de incerteza, e ferramentas computacionais se fazem necessárias para simular a operação destes reservatórios de modo a diminuir a possibilidade de crises por falhas no abastecimento, nesse contexto podendo se citar o Simulador de Reservatórios (SIMRES), um modelo computacional elaborado pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, DEHA - UFC, caracterizado por Campos e Studart (2009) como um recurso para ensaio com estoque de águas em reservatórios artificiais superficiais. O SIMRES utiliza dos seguintes recursos:

- Produção de séries sintéticas anuais, modelo conjunto e reciprocamente exclusivo, em funções gama, log-normal e normal;
- Fragmentação da série anual em séries mensais, ou sazonais;
- Simulação de operação de reservatórios para N séries sintéticas de milhares anos, sendo possível representar até dez capacidades diferentes e dez diferentes garantias no fornecimento de água;
- Simulação de reservatórios para séries de até 5000 anos;
- Métodos de estatísticas e histogramas das vazões afluentes;
- Recursos de operações lineares com arquivos para permitir somar deflúvios e vertimentos e operar reservatórios em sistemas em série;
- Ferramentas para avaliar as estatísticas dos deflúvios.

Podemos dividir o processo de simulação de um reservatório por meio do software SIMRES em etapas, sendo elas: Dados de Entrada, Geração de Série Sintética de Vazões Anuais, Fragmentação da Série Sintética de Vazões Sazonais, e por último a simulação do Reservatório.

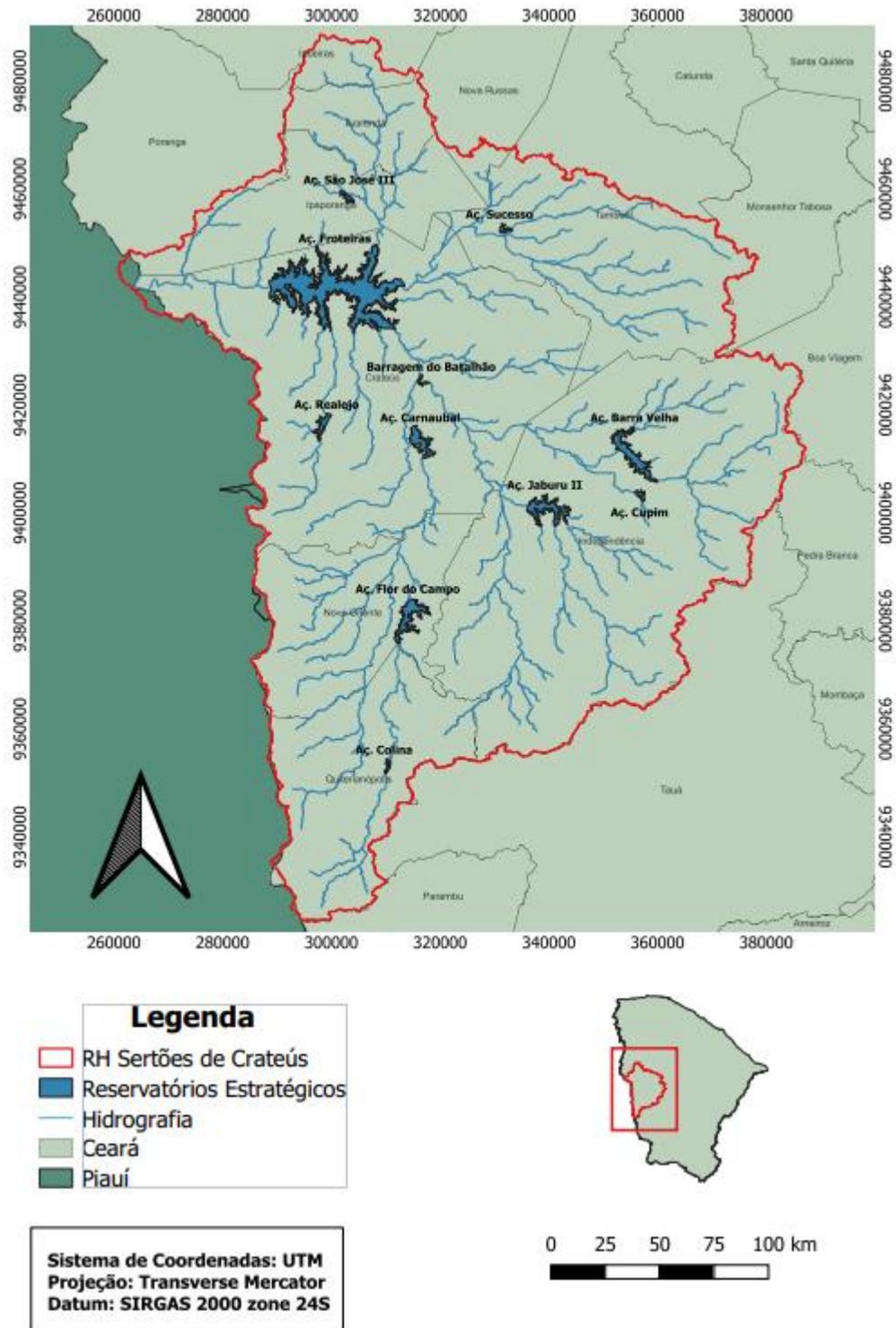
3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 Caracterização Geográfica e Climática

De acordo com dados da COGERH a Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), localizada no estado do Ceará, delimita-se ao norte pela Região Hidrográfica da Serra da Ibiapaba e a Região Hidrográfica do Acaraú, a sul pela Região Hidrográfica do Alto Jaguaribe, oeste pelo estado do Piauí e ao leste pela Região Hidrográfica do Banabuiú. A RHSC tem sua delimitação situada na rede de drenagem do Rio Poti, o que o torna o rio principal da bacia, e tem como principais afluentes o Riacho do Meio, Riacho de Dentro, Riacho dos Cavalos, Rio Diamante, Riacho Cachoeira, Rio Pinheiros e Riacho dos Campos. No total, a região possui atualmente 10 reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH, e mais 1 em fase de construção, sendo eles: São José III, Sucesso, Realejo, Barra Velha, Cupim, Jaburu II, Colina, Flor do Campo, Carnaubal e Do Batalhão, sendo o Fronteiras o reservatório que ainda se encontra em fase de construção.

A RHSC atualmente conta com uma área total de aproximadamente 10.821km², composta por 10 municípios, sendo eles: Ararendá, Crateús, Independência, Ipaporanga, Novo Oriente, Quiterianópolis, Tamboril, Ipueiras, Nova Russas e Poranga. De acordo com censo de 2021 do IBGE, os municípios da RHSC totalizam junto uma população de 283.113 habitantes, sendo o município de Crateús o mais populoso, o abastecimento dessa população é a principal designação do uso dos reservatórios da RHSC. A Figura 2 apresenta a distribuição dos reservatórios dentro da RHSC.

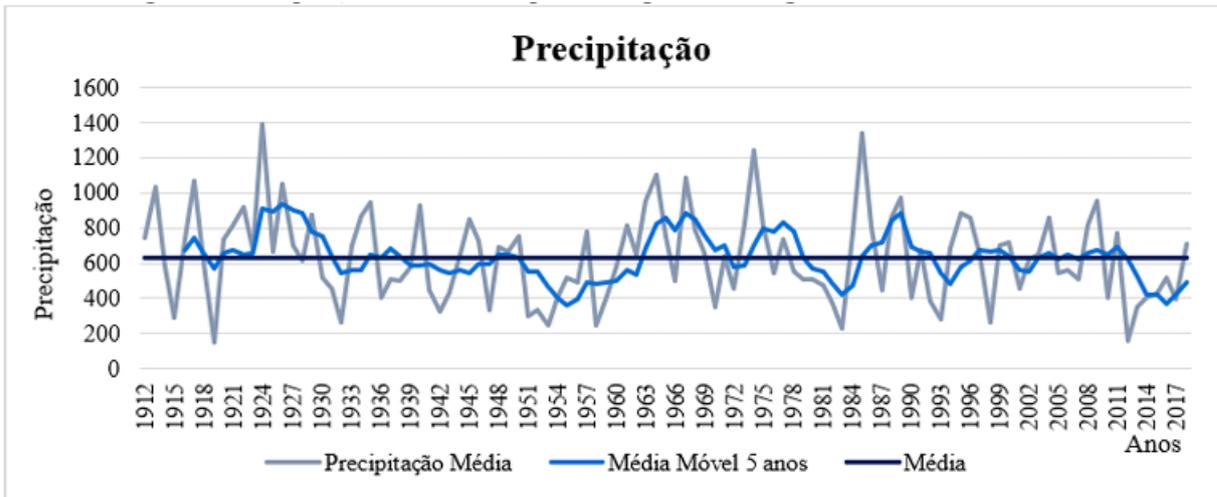
Figura 2: Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús.



Fonte: Autor (2025).

A RHSC por se tratar de uma região situada no semiárido cearense, apresenta baixos índices de precipitação anual com alta variabilidade. A Figura 3 apresenta a série histórica de precipitação entre 1912 e 2017, sua média anual e a média móvel de 5 anos da RHSC.

Figura 3: Precipitação média anual para a RHSC.



Fonte: Rosa (2019).

É perceptível a partir da média móvel o regime de precipitação e seus períodos de variação em torno da média. Entre 1998 e 2011 a média móvel possui um período bem próximo da média, já o período entre 2012 e 2018 marca a última grande seca na região.

Figura 4: Evapotranspiração potencial para a RHSC.



Fonte: Rosa (2019)

A figura 4 mostra que a evapotranspiração na região, varia de níveis de 1500mm à 4800mm por ano, sendo em média de 3000mm por ano, os dados de precipitação e evapotranspiração expostos foram obtidos através da estação 34750000.

3.2 Caracterização dos Reservatórios da RHSC

Esta subseção descreve cada um dos reservatórios da região com base em dados levantados e disponibilizados pela COGERH.

3.2.1 Reservatório Barra Velha

O Barra velha está localizado no município de Independência, sua conclusão ocorreu no ano de 1999, sendo o terceiro maior reservatório construído da RHSC, possui uma bacia hidrográfica de 856,96 km² e capacidade máxima de 99,56 hm³, situa-se no barramento do Riacho Santa Cruz, não tendo nenhum outro reservatório estratégico à montante e possuindo apenas a barragem do Batalhão a sua jusante. Os principais usos das águas do Barra velha são voltados a dessedentação animal, usos domésticos locais, agricultura de vazante e usos públicos concessionários.

3.2.2 Reservatório Colina

Situado do município de Quiterianópolis-CE, o Colina conta com uma bacia hidrográfica de 367,4 km² e capacidade de 4,3 hm³, e é o primeiro de uma sequência de barramentos do Rio Poti, tendo o Flor do campo a sua jusante. Construído em 1988 o Colina tem suas águas utilizadas para fins de uso doméstico, dessedentação animal, agricultura de vazante, recreação, pesca artesanal e usos públicos concessionários.

3.2.3 Reservatório Cupim

Fica localizado no município de Independência-CE, estando situado no barramento do Rio Cupim, com uma bacia hidrográfica de 229,73 km² e capacidade máxima de 4,6 hm³, não possui reservatórios à montante e situa-se a jusante do reservatório do Batalhão, suas águas são destinadas ao abastecimento do município ao qual está localizada, uma vez que o Barra velha, o outro reservatório do município não possui capacidade de suprir a demanda anual do município.

3.2.4 Reservatório Jaburu II

O Reservatório Jaburu II está situado no município de Independência-CE, o terceiro situado no município, possui uma bacia hidrográfica de 913,5 km² e capacidade máxima de 101,64 hm³, sendo o segundo maior reservatório construído da região, tendo sido finalizado no ano de 1984 no barramento do Riacho Jaburu, não possuindo reservatórios estratégicos à montante e estando a sua jusante o reservatório do Batalhão, seus recursos são destinados a dessedentação animal, usos domésticos locais, usos públicos concessionários, pesca artesanal e agricultura de vazante.

3.2.5 Reservatório Realejo

O reservatório Realejo possui capacidade máxima de 31,47 hm³ e uma bacia hidrográfica de 216,65 km², estando situado no município de Crateús, tendo sido finalizada sua construção no ano de 1980 no barramento do Riacho Carrapateiras. O Realejo não possui reservatórios estratégicos à montante e a sua jusante está apenas o Reservatório Fronteiras, os recursos do reservatório são utilizados para fins recreativos, usos públicos concessionários, dessedentação animal, usos domésticos locais, irrigação, pesca artesanal, agricultura de vazante e balneário.

3.2.6 Reservatório São José III

O reservatório São José III está situado no município de Ipaporanga-CE, no barramento do Riacho São José, possui capacidade de 7,96 hm³ e uma bacia hidrográfica de 98,6 km², podendo ser classificado como um reservatório de médio porte, não possui reservatório relevantes à montante.

3.2.7 Reservatório Sucesso

Construído no ano de 1988 no município de Tamboril-CE, o reservatório Sucesso possui uma capacidade de 6,6 hm³ e uma bacia hidrográfica de 278,74 km², estando situado no barramento do Riacho Casimiro, não possui reservatório à montante e sua jusante está situado o Fronteiras, ainda em fase de construção. Os recursos do reservatório sucesso são utilizados para fins de para a dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, usos públicos concessionários, irrigação, pesca artesanal, agricultura de vazante e balneário.

3.2.8 Reservatório Flor do Campo

O Flor do Campo é o responsável pelo abastecimento do município de Novo Oriente, sua capacidade é de 107,6 hm³ e possuindo uma bacia hidrográfica de 647,8 km², situado no barramento do Rio Poti, conta com o reservatório Colina à montante e com o reservatório Carnaubal a jusante. Suas águas são destinadas para uso doméstico, irrigação, dessedentação animal, recreação, usos públicos concessionários, pesca artesanal, balneário e agricultura de vazante.

3.2.9 Reservatório Carnaubal

Construído em 1990, o reservatório Carnaubal é o principal reservatório do município de Crateús-CE, sendo responsável por quase 30 abastecimentos locais. Tem capacidade de 46,62 hm³, e sua bacia possui área de 2090,64 km², situado no barramento do Rio Poti, estando à montante do reservatório do Batalhão. O Carnaubal, segundo a COGERH, é usado para oito tipos de atividades, sendo elas: indústria e agricultura de vazante, recreação, irrigação, pesca artesanal, usos públicos por concessionárias, dessedentação animal e usos domésticos locais.

3.2.10 Reservatório do Batalhão

O reservatório do Batalhão situa-se dentro da sede municipal de Crateús-CE, e conta com uma bacia de 5894 km² e capacidade de 1,64hm³, estando situado no encontro entre o Riacho do Meio e o Rio Poti. A princípio foi construído apenas para abastecimento do contingente militar, porém devido casos de crise hídrica, sua funcionalidade ampliou-se com objetivo de abastecer também a população urbana. O reservatório do Batalhão possui a montante os reservatórios Carnaubal, Jaburu II, Barra Velha e Cupim, a jusante está apenas o Fronteiras, que se encontra em fase de construção. O Reservatório do Batalhão pode ser classificada como um reservatório de nível, cujo principal objetivo é facilitar a captação de água dos riachos de seu barramento, para uso no abastecimento urbano, é o menor reservatório da RHSC.

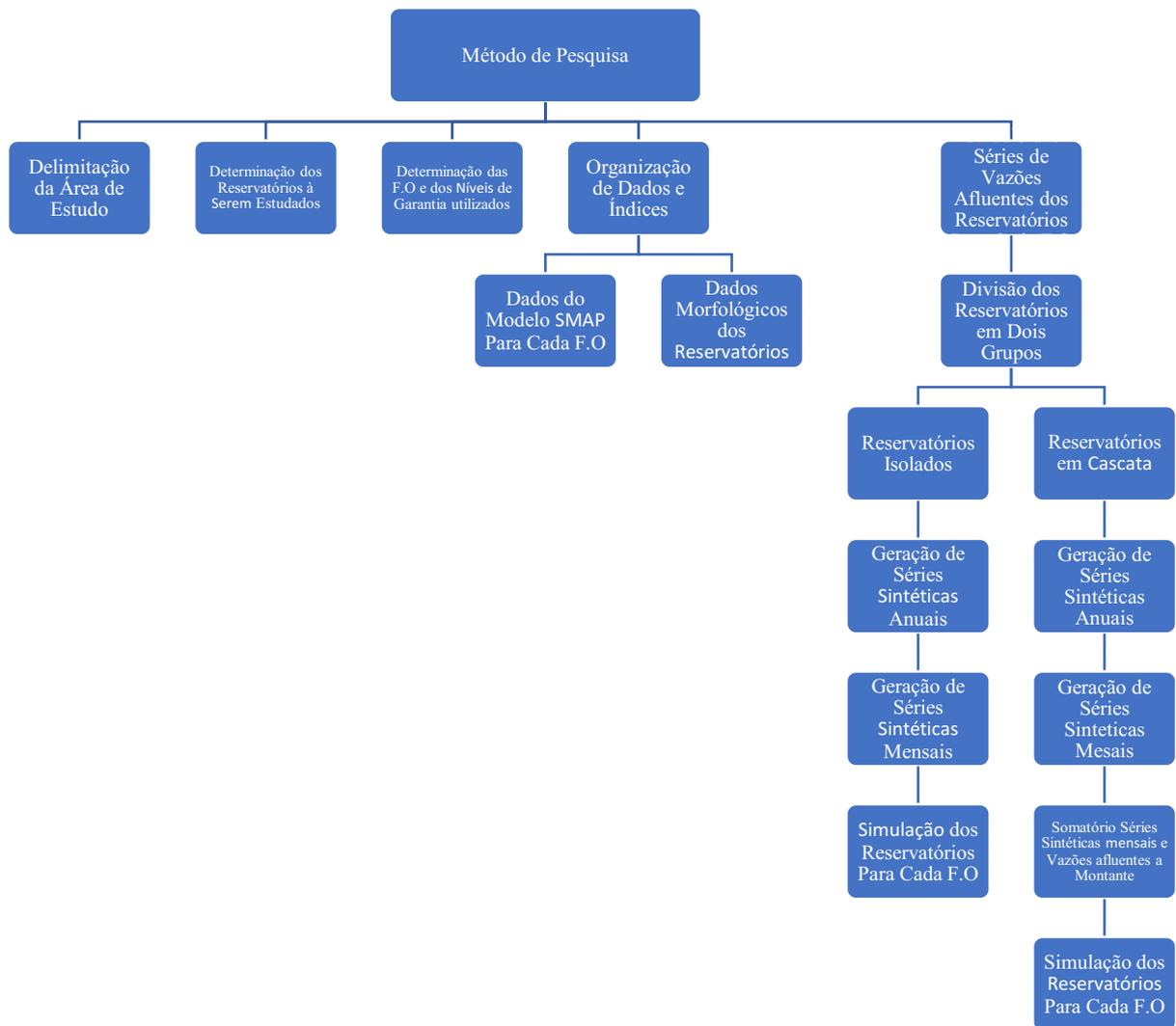
3.2.11 Reservatório Fronteiras

O Fronteiras é um reservatório estratégico em fase de construção, que terá capacidade máxima de 488,18 hm³, superior a atual da RHSC. O reservatório situa-se a 27 km da sede do município de Crateús, estando localizado próximo à fronteira dos estados do Ceará e Piauí. O reservatório Fronteiras terá a finalidade de abastecimento dos distritos de Ibiapaba, Poty, Assis, Curral Velho e a localidade de Cabaças, no município de Crateús, e para a irrigação de 5.000 ha de solo, além de outras finalidades visando o desenvolvimento da região, possibilitando o estabelecimento de indústrias, criação de novos perímetros irrigados e criação extensiva de animais. Por ser o último barramento do Rio Poti dentro do estado do Ceará, sua bacia hidrográfica total é formada quase que por toda RHSC, possuindo uma área de 10.248,84 km².

4 METOLOGIA

Nesta seção apresenta-se os procedimentos metodológicos utilizados para o alcance dos objetivos propostos. No fluxograma apresentado na Figura 4, tem-se o detalhamento das atividades desenvolvidas na elaboração deste estudo.

Figura 5: Fluxograma da Metodologia de Pesquisa.



Fonte: Autor (2025).

O estudo trata-se de uma pesquisa quantitativa, de carácter descritivo e explicativo, delimitada dentro da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús, tendo como objeto de estudo os 11 reservatórios estratégicos da região, monitorados pela COGERH. Os reservatórios foram organizados em dois grupos referente a existência de outros dentro da sua bacia hidrográfica, o

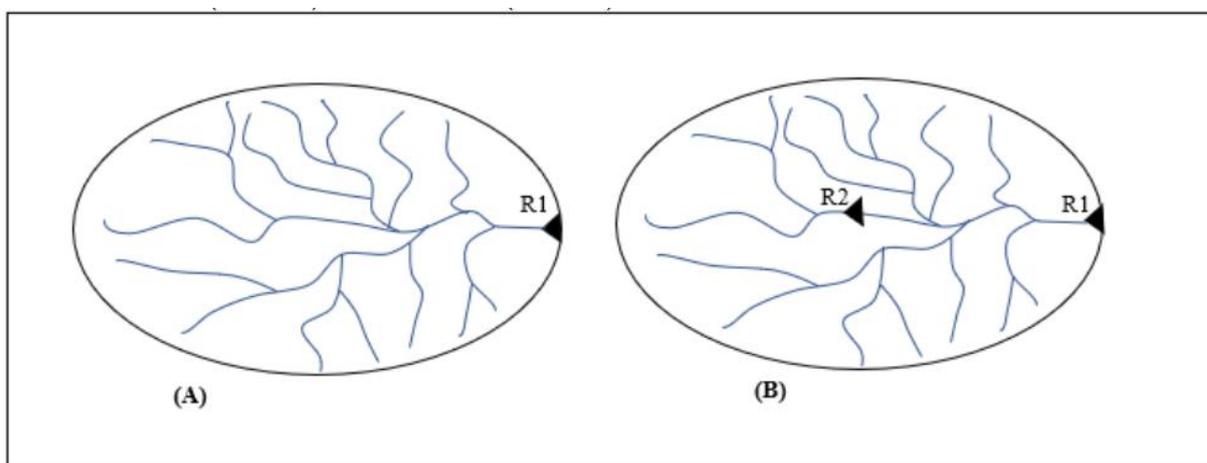
que interfere de forma significativa no método utilizado para o cálculo de vazões afluentes e no método de simulação destes reservatórios. Em seguida são apresentados os métodos de cálculo das vazões regularizadas, vertimento médio e evaporação média com auxílio do software SIMRES, assim como a base de dados utilizada.

4.1 Grupos de reservatórios

A bacia hidrográfica de um reservatório, representa a soma das áreas contribuintes dos cursos dos rios que se encontram à montante da seção do rio principal onde se encontra o barramento do reservatório.

A divisão dos reservatórios em dois grupos foi realizada utilizando como critério a sua bacia hidrográfica, onde reservatórios que não possuem nenhum outro reservatório estratégico dentro de sua bacia hidrográfica são chamados de reservatórios isolados e os que possuem outros reservatórios estratégicos inseridos em sua bacia hidrográfica são chamados de reservatórios em cascata. A Figura 5 apresenta de modo esquemático essa classificação.

Figura 6 - Representação esquemática de uma bacia hidrográfica de um reservatório isolado (item A) e em cascata (item B).



Fonte: Sousa (2022)

Portanto, seguindo esta definição, a divisão dos reservatórios estratégicos resultou em dois grupos. Grupo I, composto pelos reservatórios isolados, a saber: São José III, Sucesso, Realejo, Barra velha, Cupim, Jaburu II e Colina. Grupo II composto pelos reservatórios em cascata, a saber: Flor do campo, Carnaubal, Barragem do Batalhão e Fronteiras.

4.2 Funções objetivo utilizadas

Os dois grupos de reservatórios foram simulados tendo em vista dados relacionados a cinco diferentes funções objetivo, a tabela 1 apresenta as funções objetivo utilizadas nesse estudo.

Tabela 1: Funções objetivo utilizadas no estudo.

Índice	Função Objetivo
Nash e Sutcliff	$NASH = 1 - \frac{\sum(Q_{calc} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$
Média Absoluta do Erro	$MAE = \frac{\sum Q_{calc} - Q_{obs} }{n}$
Raiz do Erro Quadrado Médio	$REQM = \sqrt{\frac{\sum(Q_{calc} - Q_{obs})^2}{n}}$
Nash modificado – Raiz das vazões	$NASH_{raiz} = 1 - \frac{\sum(\sqrt{Q_{calc}} - \sqrt{Q_{obs}})^2}{\sum(\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2}$
Índice de Concordância	$IC = 1 - \frac{\sum Q_{calc} - Q_{obs} ^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{calc}} + Q_{calc} - \overline{Q_{calc}})^2}$

Onde: Q_{calc} = Vazão calculada, Q_{obs} = Vazão observada, n = número de meses

Fonte: Autor (2025).

Cada uma das FOs apresentam características próprias, que podem fazer com que elas se ajustem melhor a um determinado objetivo de estudo, algumas sendo mais indicadas quando se deseja um melhor ajuste para as vazões mais elevadas, assim elas penalizam mais fortemente os erros nos picos. Outras possuem como característica penalizar as vazões com menores

valores, portanto sendo indicadas para estudos onde as vazões mínimas são mais importantes. Algumas funções contabilizam os erros por igual, sem considerar se é uma vazão de pico, intermediária ou mínima, por vezes essas acabam por serem mais efetivas para determinação de valores médios.

O modelo proposto por Nash e Sutcliff é amplamente utilizado na calibração de modelos hidrológicos, este representa uma estatística normalizada da razão entre a magnitude relativa da variância residual e a variância dos dados medidos. NASH varia entre menos infinito e uma unidade, onde o valor unitário representa o ideal. O valor nulo de NASH representa que a vazão prevista depois da determinação dos parâmetros do modelo hidrológico não é mais precisa que a média das vazões observadas. Valores negativos indicam inaptidão do modelo para previsões de vazões (Moriasi et al. 2007).

Com o passar dos anos diversas versões do modelo original de NASH surgiram a partir da manutenção de sua estrutura e modificações nas variáveis visando dar maior foco a outros aspectos de um hidrograma, como por exemplo as vazões mínimas onde se utiliza o inverso das vazões ou logaritmo destas. Nesse estudo será utilizado o NASHraiz que tem como característica utilizar a raiz quadrada das vazões visando amenizar os impactos das vazões máximas.

As funções MAE e REQM estão entre as melhores medidas de desempenho de um modelo, por resumirem bem a diferença média nas unidades observadas e calculada. MAE é menos sensível a valores extremos do que REQM, o que pode torná-la intuitivamente mais atraente por dar pesos iguais as vazões com diferentes ordens de grandeza (Willmott, 1982).

No entanto, quando se necessita dar ênfase ao ajuste de valores extremos ou vazões de pico de um hidrograma, a função REQM se apresenta como uma melhor alternativa, devido ao artifício de elevar o erro das medidas ao quadrado. Desse modo a diferença entre vazões de grande magnitude tornam-se muito mais influentes do que as de vazões pequenas quando o objetivo é a minimização da soma desses valores. Assim como em MAE, grandes valores de REQM indicam grandes erros no ajuste das vazões calculadas às vazões observadas, a situação ideal é a obtenção de valores próximo a zero.

Ainda segundo Willmott (1982), a função IC é uma medida que pode ser amplamente aplicada para realizar comparações cruzadas entre modelos. Um bom modelo deve representar as principais tendências ou padrões presentes na série de vazões observadas. Esse índice foi desenvolvido de modo a minimizar as dificuldades ou a diferença sistemática das medidas dos erros, elementos estes presentes e não mensurados no REQM, por exemplo.

Em resumo, funções como NASH, REQM e IC são recomendados quando se deseja priorizar o ajuste das vazões de maiores magnitudes, pois há uma maior sensibilidade as ordens de grandezas das vazões devido ao erro ser elevado ao quadrado. Os valores de NASHraiz que utilizam a raiz dos valores das vazões, amenizam os efeitos das vazões máximas da função original. MAE não possui sensibilidade a diferença de magnitude das vazões, devido sua formulação usar os valores em sua escala natural.

Tendo como base essas características de cada função, a justificativa de escolha destas se dá pela variabilidade entre elas, e também pela disponibilidade de dados e índices já calibrados relacionados a estas, obtidos por Rosa e Alexandre (2021) em estudo desenvolvido na RHSC.

4.3 Levantamento de dados

4.3.1 *Dados do modelo SMAP*

Para a obtenção das séries pseudo-históricas de vazões afluentes de cada reservatório de acordo com cada uma das funções objetivo, se fazem necessários dados a respeito da precipitação e evapotranspiração para as sub-bacias dos reservatórios da RHSC, tais dados foram obtidos a partir do estudo realizado por Rosa (2019), através do modelo SMAP-mensal.

O processo de geração das séries pseudo-históricas de vazões afluentes necessita ainda de parâmetros definidos para cada uma das funções objetivo, são estes: Capacidade de saturação do solo – SAT, parâmetro de controle do escoamento superficial – PES, coeficiente de carga do reservatório subterrâneo – CRec e constante de recessão do hidrograma – K, os valores destes parâmetros foram definidos no estudo de (Rosa e Alexandre, 2021), e serão estes os utilizados no presente estudo. Com base ainda em Rosa e Alexandre (2021), pela RHSC está situada no semiárido com predominância de embasamento cristalino, o parâmetro CRec pode ser considerado igual a zero e o parâmetro K por se mostrar pouco sensível é definido como um valor constante igual a 3 para todas as funções objetivo, desse modo, apenas os parâmetros SAT e PES são variáveis, a Tabela 2 apresenta os valores de SAT e PES referente a cada função objetivo utilizada.

Tabela 2: SAT e PES referentes a cada função objetivo

Função Objetivo	SAT	PES
IC	1638	2,6
MAE	1094	3,6
NASH	1736	2,7
NASHraiz	1508	3,1
REQM	1150	3,0

Fonte: Adaptado de Rosa e Alexandre (2021).

No processo de geração das séries pseudo-históricas de vazões afluentes é necessário levar em consideração também a área da bacia dos reservatórios que neste estudo serão considerados os valores utilizados por Rosa e Alexandre (2021) no processo de calibração dos parâmetros SAT e PES. Nesta etapa alguns autores podem utilizar de dois valores distintos de área para os reservatórios em sistema de cascata, considerando dois cenários, um com o reservatório isolado e outro com o reservatório em cascata, gerando assim duas séries de vazões afluentes diferentes para o mesmo reservatório, no presente estudo os reservatórios em cascata serão considerados apenas neste cenário de operação, visto que já se irá obter uma quantidade considerável de diferentes séries de vazões afluentes para o mesmo reservatório variando as funções objetivo, e também por este ser o cenário real de operação destes reservatórios.

A partir destes dados, é possível a criação das séries pseudo-históricas de vazões afluentes para cada um dos reservatórios estratégicos, onde serão obtidas com auxílio de planilhas eletrônicas cinco diferentes séries de vazões afluentes para cada reservatório, cada série referente a uma função objetivo, as séries pseudo-históricas de vazões afluentes serão obtidas para o intervalo de tempo de 107 anos do período de 1912 a 2018 que é o mesmo para o qual existem valores de precipitação e evapotranspiração.

4.3.2 Dados gerais dos reservatórios

Para cada reservatório estratégico da RHSC foi criado um arquivo com seus dados gerais que serão necessários na realização das simulações destes reservatórios por meio do software

SIMRES, foram utilizadas as informações de capacidade máxima dos reservatórios e a valores presentes na curva CAV levantados pela COGERH.

Os reservatórios possuem ainda valores referentes a modulação sazonal das evaporações e evaporação líquida.

4.4 Método de Simulação dos reservatórios no SIMRES

Com as séries pseudo-históricas de vazões afluentes de 107 anos e dados gerais dos reservatórios é possível realizar a simulação dos reservatórios, que foram simulados com as seguintes especificações: O tipo de simulação é com garantia fixa anual, o volume inicial dos reservatórios é de 50% da capacidade máxima, a reserva de segurança ou volume morto é considerada zero, os níveis de garantia das simulações são 80%, 90%, 95% e 100%, a modulação sazonal das retiradas serão distribuídas de maneira uniforme e os reservatórios serão simulados para uma capacidade que será a sua capacidade máxima.

4.4.1 Geração de Séries sintéticas anuais

As séries pseudo-históricas de vazões afluentes obtidas se limitam a 107 anos, e o método de Monte Carlos necessita de uma grande série de dados para sua viabilidade, para resolver este impasse é utilizado o módulo GERAR VAZÕES ANUAIS do software SIMRES.

Utilizando uma distribuição de probabilidade do tipo GAMA II, e com parâmetros de média anual e desvio padrão referentes a série pseudo-histórica de vazões afluentes de cada reservatório calculadas por meio das cinco diferentes funções objetivo, empregando a mesma semente (12345678), é gerada uma série de vazões sintéticas de 5000 anos.

4.4.2 Fragmentação das séries anuais para mensais

As séries de 5000 anos geradas são anuais, e o interesse do estudo é voltado para um período mensal, então se faz necessário transformar as séries anuais em mensais, isso é possível por meio do módulo FRAGMENTAR SÉRIE do software SIMRES. Através da série sintética anual e da própria série pseudo-histórica de vazões afluentes é possível se obter a série sintética de vazões fragmentada para um período mensal que corresponde a vazão afluente ao reservatório.

4.4.3 Soma de vazões afluentes

Exclusivo da simulação dos reservatórios do Grupo II, que devem ser simulados como um sistema em série, a soma de vazões afluentes do reservatório consiste em adicionar à série de vazões mensais as séries de vazões de vertimento dos reservatórios a montante já simulados.

Para cada nível de garantia simulado se obtém uma série diferente de vertimento, mas como neste estudo já serão realizados um número considerável de simulações diferentes para cada reservatório, optou-se por realizar a soma considerando a série correspondente ao nível de 90% de garantia dos reservatórios à montante, que é o nível de garantia mais usual para estudos deste tipo, para cálculo do fluxo que entra no reservatório a ser simulado.

4.4.4 Simulação dos reservatórios

Por meio do módulo SIMULAR RESERVATÓRIO e utilizando dos dados gerais dos reservatórios e das séries de vazões sazonais é possível realizar a simulação para cada um dos reservatórios onde cada reservatório passará por cinco simulações, uma para cada função objetivo. É necessário se atentar que para os reservatórios do Grupo I as séries de vazões sazonais serão as séries mensais obtidas através do processo de fragmentação, já para os reservatórios do Grupo II as séries sazonais serão as séries resultantes do processo de soma de vazões.

Os principais arquivos de saída do processo de simulação para este trabalho incluem o relatório das simulações, a série de vazões mensais descarregadas e média das vazões ajustadas para cada nível de garantia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos para as séries pseudo-históricas de vazões afluentes obtidas por meio de cada função objetivo e os resultados das simulações dos reservatórios através destas séries, apresentando os valores encontrados para vazão regularizada, vertimento médio e evaporação média para cada reservatório da RHSC, traçando um comparativo entre as vazões desses reservatórios de acordo com cada função objetivo.

5.1 Simulação chuva-vazão

Através do modelo hidrológico chuva-vazão foi possível gerar séries pseudo-históricas de vazões afluentes dos reservatórios da RHSC por meio das funções objetivo IC, MAE, NASH, NASHraiz e REQM. As séries obtidas para cada uma das funções contam com um intervalo de 107 anos de dados compreendidos de 1912 a 2018, o mesmo intervalo para qual se possui dados de precipitação e evapotranspiração. Esta subseção apresenta os resultados das séries obtidas por meio de cada função objetivo e traça um comparativo entre elas para cada reservatório. A Tabela 3 apresenta os valores das médias anuais das vazões afluentes dos reservatórios e seus desvios padrão.

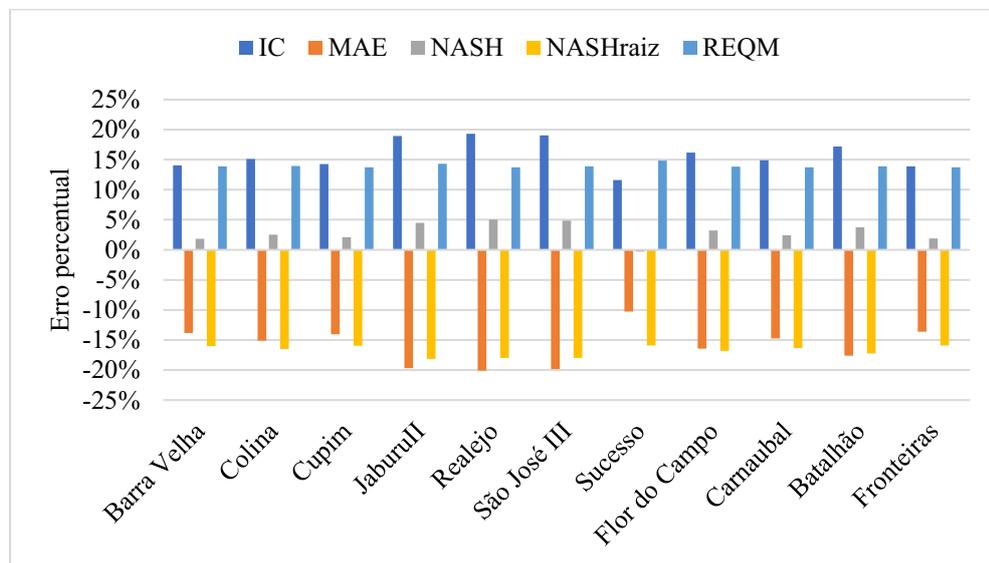
Tabela 3: Médias anuais de vazões afluentes dos reservatórios em m³/s.

Reservatório	IC		MAE		NASH		NASHraiz		REQM	
	MÉDIA	DP	MÉDIA	DP	MÉDIA	DP	MÉDIA	DP	MÉDIA	DP
Barra Velha	1,20	1,67	0,91	1,47	1,07	1,48	0,89	1,29	1,20	1,84
Colina	0,42	0,60	0,31	0,53	0,37	0,54	0,30	0,46	0,41	0,67
Cupim	0,10	0,14	0,08	0,12	0,09	0,13	0,07	0,11	0,10	0,16
Jaburu II	0,70	0,95	0,48	0,75	0,62	0,83	0,48	0,69	0,68	1,02
Realejo	0,18	0,24	0,12	0,19	0,15	0,21	0,12	0,17	0,17	0,25
São José III	0,09	0,12	0,06	0,10	0,08	0,11	0,06	0,09	0,08	0,13
Sucesso	0,35	0,51	0,28	0,47	0,31	0,45	0,26	0,40	0,36	0,58
Flor do Campo	0,33	0,47	0,24	0,40	0,29	0,42	0,24	0,36	0,32	0,51
Carnaubal	1,73	2,49	1,28	2,20	1,54	2,21	1,26	1,93	1,71	2,76
Batalhão	1,97	2,77	1,39	2,30	1,75	2,44	1,39	2,07	1,92	3,00
Fronteiras	5,32	7,65	4,04	6,76	4,76	6,81	3,93	5,96	5,32	8,46

Fonte: Autor (2025)

A partir dos dados da Tabela 3, se pode observar que as médias anuais de vazões afluentes apresentam variações percentuais entre os maiores e menores volumes compreendidas entre 26% e 36% tendo os menores valores anuais expressos em todos os reservatórios pela função NASHraiz e os maiores variando entre a função IC e REQM. Diante das vazões afluentes podemos traçar um comparativo entre as cinco funções objetivo para o sistema de reservatórios. Os Gráfico 1 e 2 apresentam respectivamente o erro percentual da média entre as FOs e do desvio padrão das vazões.

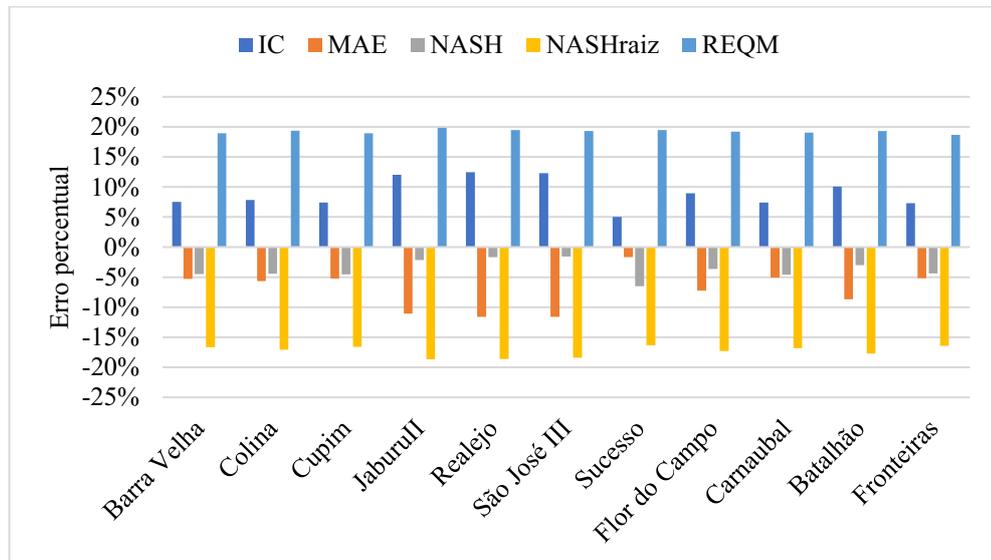
Gráfico 1: Erro percentual da média das vazões afluentes.



Fonte: Autor (2025).

A partir do Gráfico 1 podemos concluir que as funções apresentam comportamentos diferentes em torno da média das vazões afluentes, com as funções MAE e NASHraiz apresentando um subdimensionamento dessas vazões, com erros percentuais compreendidos respectivamente nos intervalos de 14% a 20% e de 16% a 18% para os reservatórios, enquanto as funções IC, NASH e REQM dimensionam valores acima da média, com a função NASH sendo a que mais se aproxima dos valores médios para todos os reservatórios, com erro inferior a 5%, enquanto as funções IC e REQM apresentam respectivamente variabilidade de 14% a 17% e de 14% a 15%.

Gráfico 2: Erro percentual do desvio padrão das vazões afluentes.

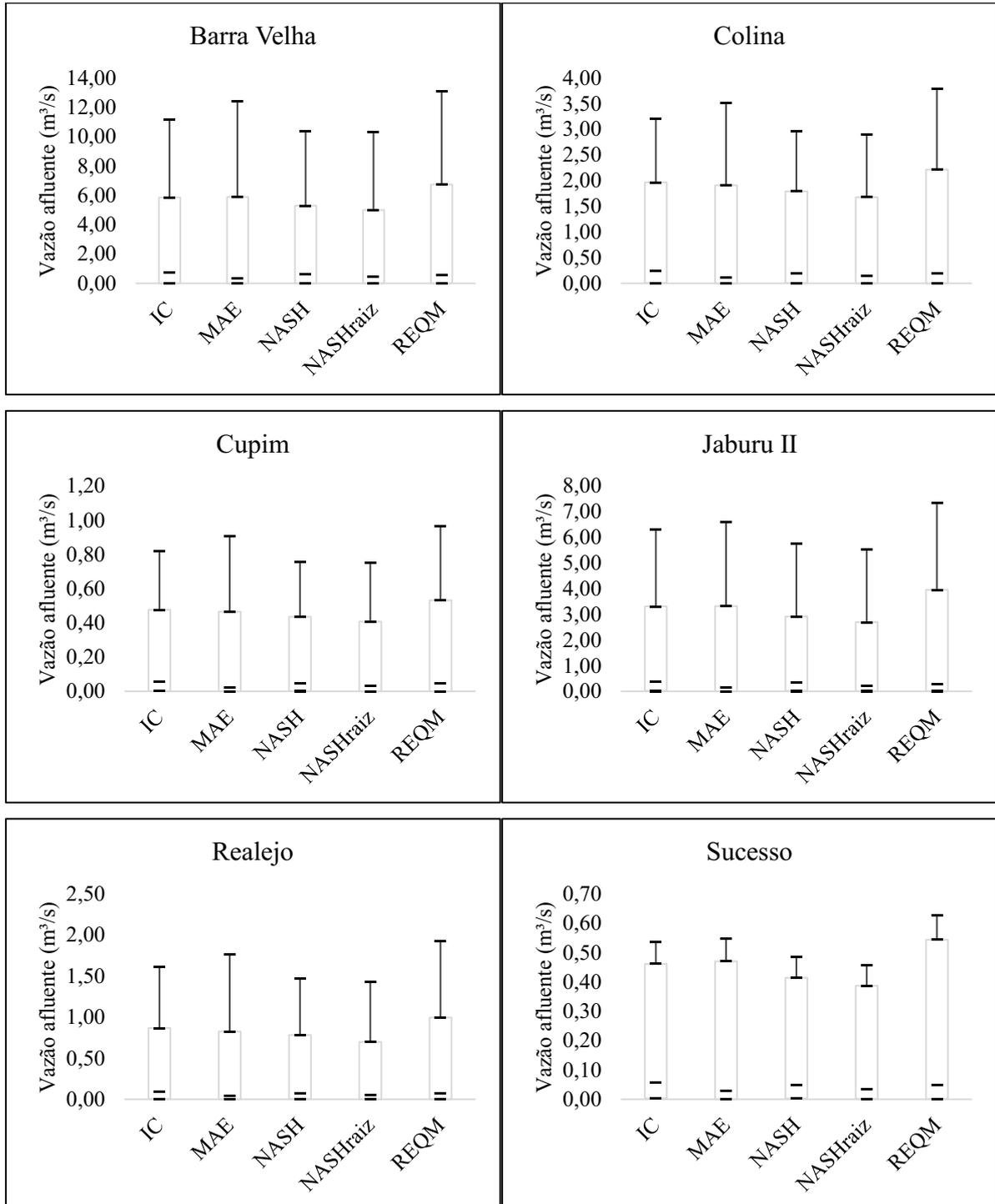


Fonte: Autor (2025).

O Gráfico 2 torna possível perceber que o erro percentual do desvio padrão apresenta comportamento semelhante ao da média, novamente com as funções MAE e NASHraiz dimensionando valores abaixo e as funções IC e REQM valores acima, com os maiores valores positivos e negativos sendo apresentados respectivamente pelas funções REQM e NASHraiz, e novamente a função NASH apresentando maior proximidade com os valores médios, mas agora com valores abaixo dessa média.

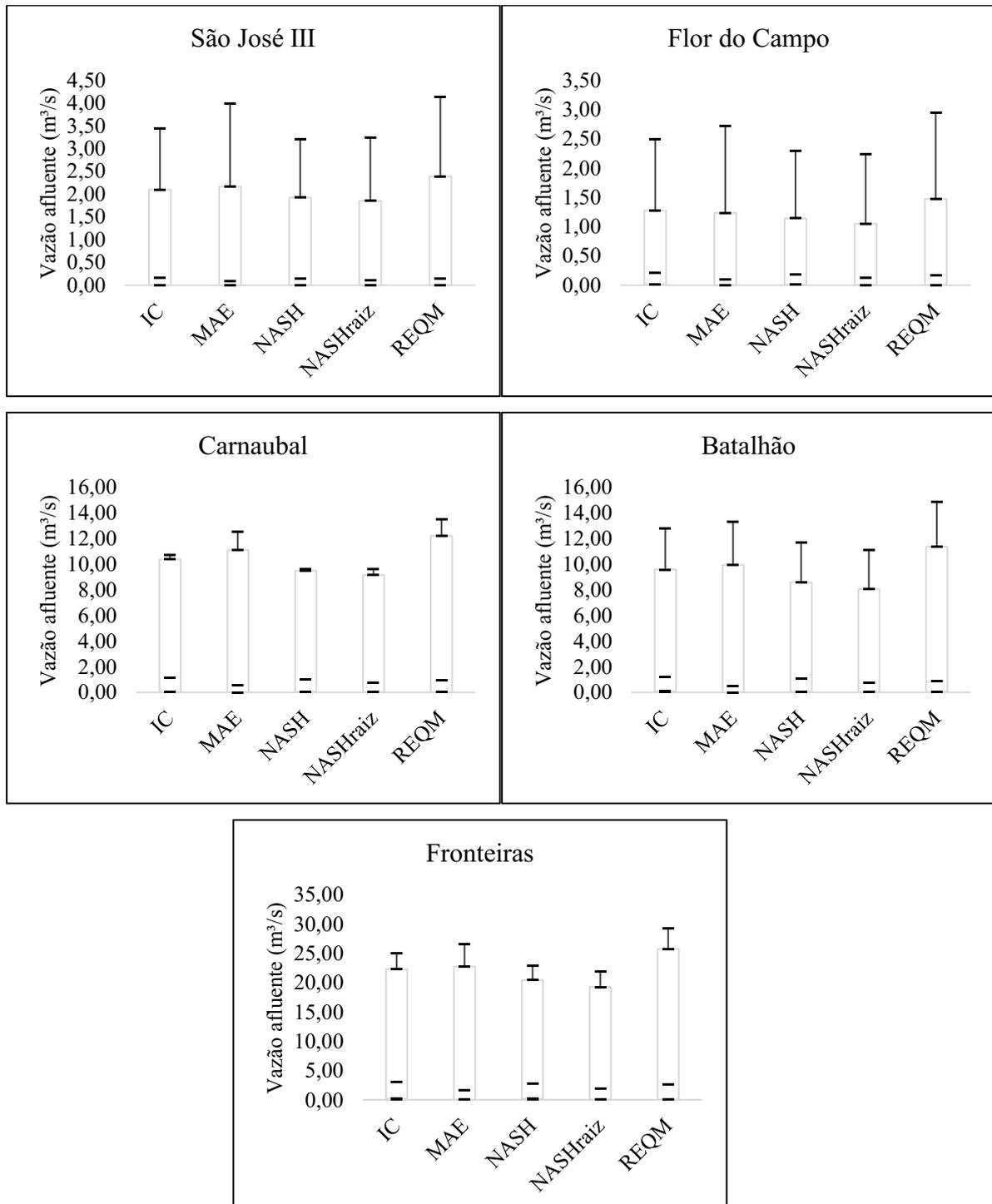
A fim de tornar ainda mais simples a percepção das diferenças entre as vazões afluentes geradas, podemos ainda realizar uma comparação visual dos valores de vazões anuais, utilizando-se de valores mínimos, máximos e percentis 25, 50 e 75%, a Figura 6 apresenta por meio de diagramas de caixa esse comparativo para cada reservatório.

Figura 7: Diagramas de Caixa das vazões afluentes anuais.



(Continua)

Figura 7: Diagramas de Caixa das vazões afluentes anuais.



Fonte: Autor (2025)

No processo de geração das vazões afluentes dos reservatórios utiliza-se da precipitação média na bacia daquele reservatório e se calcula um valor para o coeficiente de escoamento superficial, a partir disso é possível se obter o coeficiente de Runoff, que também pode ser utilizado como critério de comparação destas séries, a Tabela 5 apresenta os valores

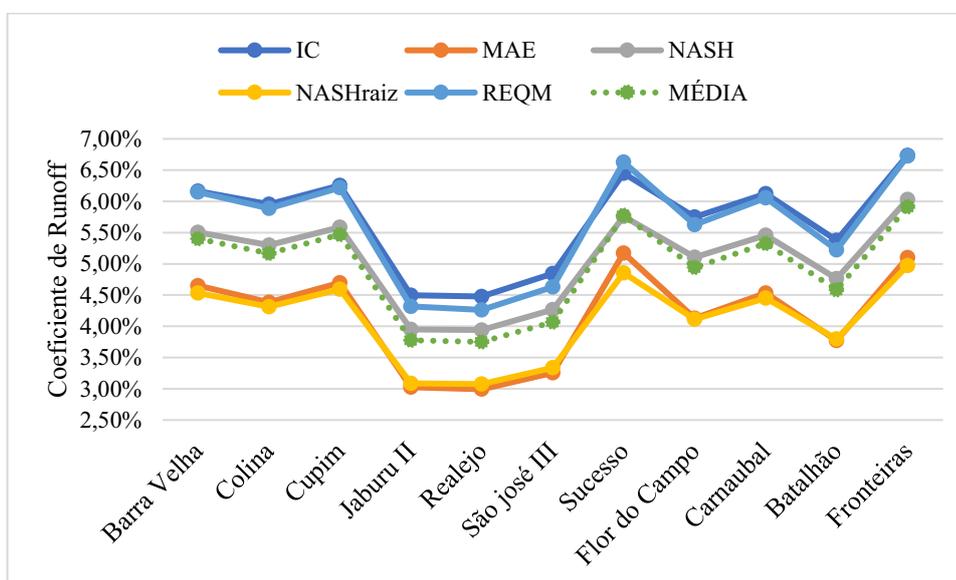
encontrados para os coeficientes dos reservatórios por meio de cada função objetivo e o Gráfico 3 apresenta este comparativo.

Tabela 4: Coeficiente de Runoff afluyente aos reservatórios.

Reservatório	IC	MAE	NASH	NASHraiz	REQM	MÉDIA
Barra Velha	6,2%	4,6%	5,5%	4,5%	6,2%	5,4%
Colina	6,0%	4,4%	5,3%	4,3%	5,9%	5,2%
Cupim	6,3%	4,7%	5,6%	4,6%	6,2%	5,5%
Jaburu II	4,5%	3,0%	3,9%	3,1%	4,3%	3,8%
Realejo	4,5%	3,0%	3,9%	3,1%	4,3%	3,8%
São José III	4,8%	3,3%	4,3%	3,3%	4,6%	4,1%
Sucesso	6,4%	5,2%	5,8%	4,9%	6,6%	5,8%
Flor do Campo	5,7%	4,1%	5,1%	4,1%	5,6%	4,9%
Carnaubal	6,1%	4,5%	5,5%	4,5%	6,1%	5,3%
Batalhão	5,4%	3,8%	4,8%	3,8%	5,2%	4,6%
Fronteiras	6,7%	5,1%	6,0%	5,0%	6,7%	5,9%

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 3: Comparação dos Coeficientes de Runoff.



Fonte: Autor (2025)

As curvas do comportamento das funções acerca do coeficiente de Runoff apresentam grande semelhança entre si, mas os valores possuem variação considerável entre as funções, com os mínimos sendo descritos de modo variável entre as funções NASHraiz e MAE e os valores máximos sendo descritos também de forma variável entre funções IC e REQM, com a

função NASH sendo a que apresenta valores mais próximos a média desses coeficientes de Runoff. Os reservatórios Jaburu II, Realejo e São José III apresentam os menores coeficientes de Runoff dentre os reservatórios da RHSC.

5.2 Simulação da operação dos reservatórios

Com base nas características físicas dos reservatórios e na série de vazões afluentes obtidas através do modelo hidrológico chuva-vazão, foi possível realizar a simulação de operação dos reservatórios da RHSC para um intervalo de 5000 anos, através das cinco diferentes funções objetivo selecionadas neste estudo. Apresentando para cada função resultados de vazões regularizadas, vertimento médio e evaporação média para os níveis de garantia de 80%, 90%, 95% e 100%.

Por meio das características físicas, dos deflúvios médios anuais e das vazões de saída do reservatório, pode-se traçar o balanço hídrico de cada reservatório para cada uma das funções objetivo ao longo do horizonte de simulação, a Tabela 5 apresenta para cada reservatório a sua capacidade, assim como o deflúvio médio anual ao longo do horizonte de simulação.

Tabela 5: Deflúvio médio anual dos Reservatórios.

Reservatório	Capacidade (hm ³)	IC	Deflúvio Médio Anual (hm ³)			
			MAE	NASH	NASHraiz	REQM
Barra Velha	99,56	38,72	27,99	35,24	27,87	39,27
Colina	4,3	13,14	9,91	11,73	9,68	12,80
Cupim	4,6	3,15	2,30	2,86	2,19	3,04
Jaburu II	101,64	21,92	14,22	19,13	15,09	21,36
Realejo	31,47	5,41	3,66	4,72	3,87	5,17
São José III	7,96	2,72	1,82	2,42	1,89	2,60
Sucesso	6,6	11,20	8,70	10,26	8,40	11,29
Flor do Campo	107,6	20,52	16,90	18,08	14,61	20,18
Carnaubal	46,62	55,39	40,97	49,39	39,77	52,75
Batalhão	1,64	102,88	77,07	88,33	69,56	109,08
Fronteiras	488,18	275,87	209,71	246,23	195,78	282,59

Fonte: Autor (2025).

Estes deflúvios são obtidos considerando a bacia incremental do reservatório somados ao vertimento dos reservatórios imediatamente a montantes, quando existem. É possível perceber que os deflúvios médios anuais ao longo do horizonte de simulação, quando

comparados com os deflúvios das séries históricas de 107 anos apresentadas na subseção anterior, apresentam pequena variação, significando que o atual regime hidrológico da região será preservado ao longo do horizonte de simulação. Diante da capacidade dos reservatórios e dos deflúvios médios anuais é possível se determinar os fatores de capacidade (fk), obtidos aqui pela razão entre capacidade e vazão afluente, para cada uma das diferentes funções objetivo. a Tabela 6 apresenta esses fatores de capacidade, tal qual suas médias e seus desvios padrão.

Tabela 6: Fatores de capacidade dos Reservatórios.

Reservatório	Fator de Capacidade						
	IC	MAE	NASH	NASHraiz	REQM	MÉDIA	DP
Barra Velha	2,57	3,56	2,83	3,57	2,54	3,01	0,52
Colina	0,33	0,43	0,37	0,44	0,34	0,38	0,05
Cupim	1,46	2,00	1,61	2,10	1,51	1,74	0,29
Jaburu II	4,64	7,15	5,31	6,74	4,76	5,72	1,15
Realejo	5,81	8,60	6,66	8,12	6,08	7,06	1,24
São José III	2,93	4,37	3,29	4,22	3,06	3,58	0,67
Sucesso	0,59	0,76	0,64	0,79	0,58	0,67	0,09
Flor do Campo	5,24	6,37	5,95	7,37	5,33	6,05	0,87
Carnaubal	0,84	1,14	0,94	1,17	0,88	1,00	0,15
Batalhão	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
Fronteiras	1,77	2,33	1,98	2,49	1,73	2,06	0,34

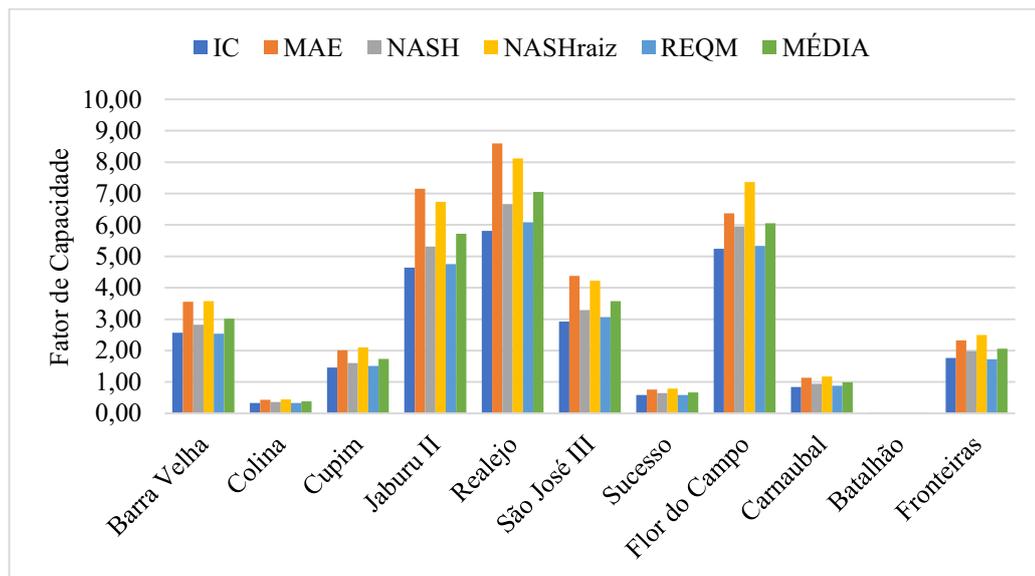
Fonte: Autor (2025).

Um grande número de reservatórios projetados pelo DNOCS possui valores de fk em torno de 2,0, levando em conta a lógica de dimensionamento de capacidade de 2 vezes o volume afluente, sendo este adotado como um valor de referência ao longo dos anos para a construção de novos reservatórios, o que resulta em reservatórios que nem sangram com alta frequência, quase anual, e nem baixa frequência, um a cada cinco anos ou mais, com indícios de superdimensionamento (Campos, 2005).

Dentro dessa lógica, pode-se admitir que valores de fk menores que 1,50 indicariam um baixo uso do potencial de acumulação, e valores entre 1,50 e 2,5 indicam um bom uso, e acima de 2,5 que a capacidade de reserva está próxima da exaustão tendendo a um superdimensionamento do reservatório. Com base nesta definição, tomando a média dos fk obtidos para cada reservatório, temos que os reservatórios Barra velha, Jaburu II, Realejo, São José III e Flor do Campo, 5 dos reservatórios da RHSC, apresentam um superdimensionamento de suas capacidades, os reservatórios Colina, Sucesso, Carnaubal e Batalhão, 4 dos

reservatórios da RHSC apresentam valores de f_k inferiores a 1,5, ou seja, possuem baixo potencial de acumulação, e apenas 2 reservatórios da RHSC, Cupim e Fronteiras possuem um bom uso do potencial de acumulação, sendo o Fronteiras o que mais se aproxima de 2. O Gráfico 4 traça um comparativo entre esses diferentes fatores de capacidade e seu valor médio.

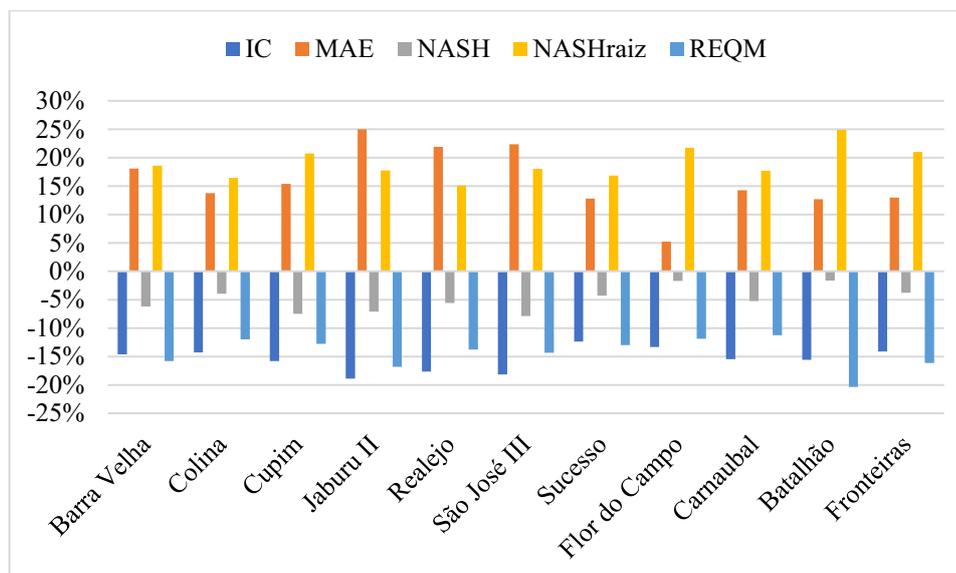
Gráfico 4: Comparativo entre os Fatores de Capacidade dos reservatórios.



Fonte: Autor (2025).

Diante da comparação apresentada, pode-se perceber que as funções objetivo expressam valores variáveis entre si para o fator de capacidade de cada reservatório, com as funções MAE e NASHraiz apresentando valores maiores e acima da média, principalmente em reservatórios de maior capacidade, enquanto as funções IC e REQM apresentam valores menores e abaixo da média, sendo a função NASH a que mais se aproxima dessa média. O Gráfico 5 apresenta o erro percentual desses fatores de capacidade com relação à média destes.

Gráfico 5: Erro percentual dos Fatores de Capacidade.



Fonte: Autor (2025).

A função NASH se mostra novamente a mais próxima dos valores médios, com erro percentual máximo de 7%. Enquanto a depender do reservatório, os maiores erros percentuais negativos alternam entre as funções IC e REQM, com máximo de 20%, e os maiores erros percentuais positivos são expressos por MAE e NASHraiz, com valor máximo de 25%.

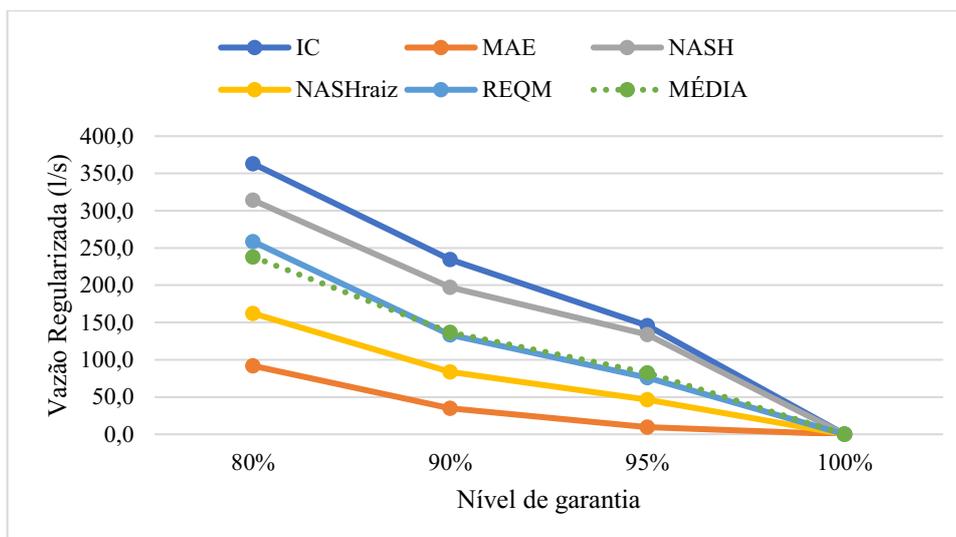
O principal objetivo da simulação através do SIMRES é determinar para os reservatórios da RHSC, suas vazões de saída (vazão regularizada, vertimento e evaporação), e avaliar se a operação destes ocorre de forma eficiente, as tabelas e gráficos subsequentes apresentam para cada um dos reservatórios, os resultados obtidos para essas vazões por meio de cada FO para os níveis de garantia adotados de 80%, 90%, 95% e 100%.

Tabela 7: Resultado da simulação do Reservatório Barra Velha.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	363,0	91,8	314,0	162,1	258,6	234,6	34,9	197,1	83,8	133,5
Vert (l/s)	256,5	240,2	213,3	165,1	369,0	294,8	251,6	242,2	179,4	408,2
Evap (l/s)	635,5	563,1	612,8	569,3	638,4	707,1	602,3	684,3	623,6	707,8
	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	146,0	9,4	133,8	46,5	76,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vert (l/s)	325,5	251,6	260,7	187,4	428,8	386,8	259,5	308,0	198,6	459,4
Evap (l/s)	758,8	602,3	724,8	651,0	741,3	841,1	628,0	809,4	685,6	785,6

Fonte: Autor (2025)

Gráfico 6: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Barra velha.



Fonte: Autor (2025)

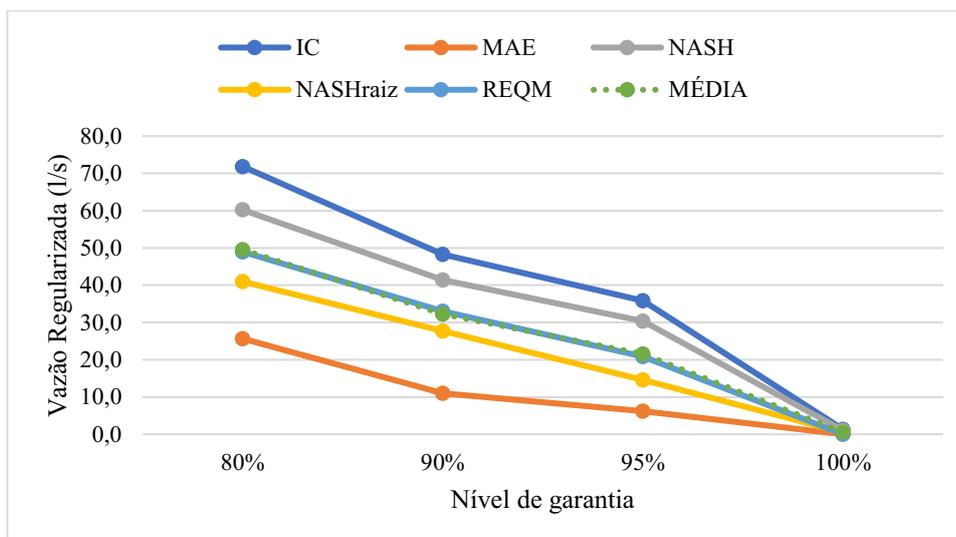
De acordo com a Tabela 7 e Gráfico 6, têm-se que os valores mínimos e máximos de vazão regularizada são expressos respectivamente pelas funções MAE e IC em todos os níveis de garantia, enquanto o vertimento mínimo e máximo são expressos pelas funções NASHraiz e REQM, as mínimas e máximas evaporações médias são expressas por diferentes funções, dependendo do nível de garantia, valores máximos sendo expressos pelas funções IC para os níveis de garantia de 80% e 90% e a função REQM para os níveis de 95% e 100%, os valores mínimos são expressos pela função MAE em todos os níveis de garantia. Ocorre também que para o nível de garantia de 100%, todos os valores de vazão regularizada são nulos, significando que o reservatório é incapaz de operar sem falhas, a função REQM é a que apresenta valores mais próximos da média para as vazões regularizadas.

Tabela 8: Resultado da simulação do reservatório Colina.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	71,9	25,7	60,2	41,0	49,0	48,2	11,0	41,4	27,7	33,0
Vert (l/s)	297,0	239,2	261,8	217,1	307,2	311,2	246,9	273,0	224,2	316,4
Evap (l/s)	52,4	51,2	53,4	51,6	52,9	58,7	56,6	58,8	55,9	57,7
	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	35,8	6,2	30,3	14,6	20,8	1,3	0,0	1,0	0,5	0,0
Vert (l/s)	319,5	249,6	280,3	232,2	324,3	346,0	253,5	302,3	241,7	339,4
Evap (l/s)	61,9	58,3	61,8	60,3	61,2	69,4	60,6	68,7	64,6	66,6

Fonte: Autor (2025)

Gráfico 7: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Colina.



Fonte: Autor (2025).

De acordo com a Tabela 8 e o Gráfico 7, os maiores valores de vazão regularizada são obtidos por meio da função IC e os menores pela função MAE para todos os níveis de garantia, o vertimento se delimita entre as funções NASHraiz e REQM para os níveis de 80%, 90% e 95% de garantia, mas para a garantia de 100% o valor máximo de vertimento é expresso pela função IC, que nos outros níveis de garantia aparece como segundo maior valor. A evaporação média do reservatório colina apresenta baixa variação, tendo seus valores mínimos na função MAE, exceto na garantia de 90%, onde o mínimo é obtido pela função NASHraiz, enquanto os seus valores de máximo se delimitam pela função IC nas garantias de 80% e 90% e pela função NASH nas garantias de 95% e 100%, mas com ambas funções apresentando grande proximidade em todos os níveis de garantia. Têm-se ainda que para o nível de garantia de 100% o reservatório é capaz de regularizar pequenas vazões nas funções IC, NASH e NASHraiz, a função REQM é a que mais se aproxima dos valores médios de vazão regularizada.

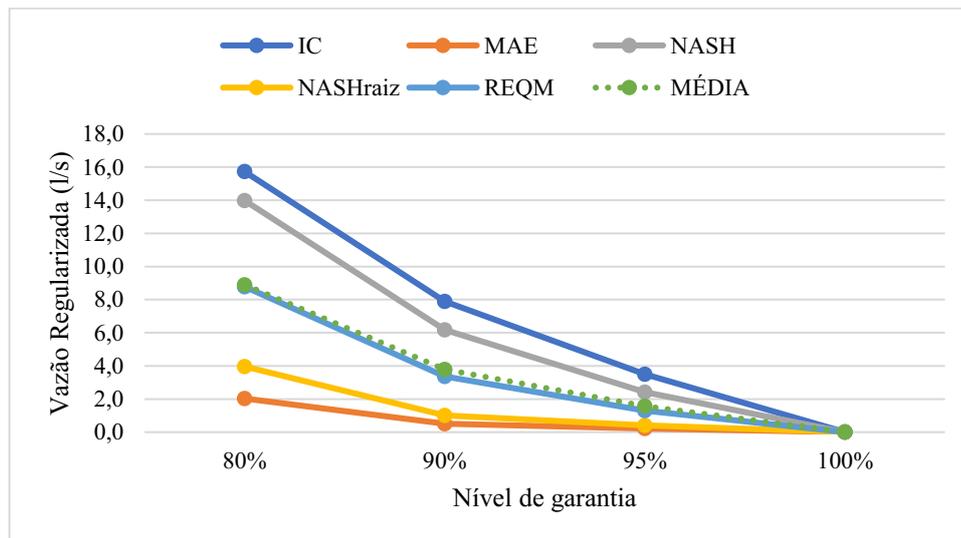
Tabela 9: Resultado da simulação do reservatório Cupim.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	15,7	2,0	14,0	4,0	8,8	7,9	0,5	6,2	1,0	3,4
Vert (l/s)	34,8	27,0	28,8	21,1	37,6	37,3	27,3	31,1	21,7	39,2
Evap (l/s)	50,4	43,9	49,0	44,8	50,6	55,0	45,0	53,7	46,9	53,9

	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	3,5	0,2	2,4	0,4	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vert (l/s)	38,8	27,4	32,3	21,8	39,9	40,2	27,5	33,1	22,0	40,4
Evap (l/s)	57,7	45,2	56,1	47,3	55,2	59,8	45,3	57,7	47,6	56,1

Fonte: Autor (2025)

Gráfico 8: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Cupim.



Fonte: Autor (2025).

O reservatório Cupim, através dos dados da Tabela 9 e do Gráfico 8, apresenta seus valores mínimos de vazão regularizada por meio da função MAE e máximos na função IC para todos os níveis de garantia. O vertimento para todos os níveis de garantia, delimita-se no intervalo formado pelas funções NASHraiz e REQM, enquanto a evaporação média do reservatório possui mínimos e máximos respectivamente nas funções MAE e IC, exceto no nível de 80% de garantia, que embora apresente grande proximidade com a função IC tem valor máximo expresso pela função REQM, com uma superioridade da ordem de 0,02 l/s, uma diferença insignificante. O reservatório se mostra também incapaz de operar sem a ocorrência de falhas, visto que possui valores nulos de vazão regularizada em todas as funções estudadas,

a função REQM apresenta-se como a mais próxima da média para os valores de vazão regularizada.

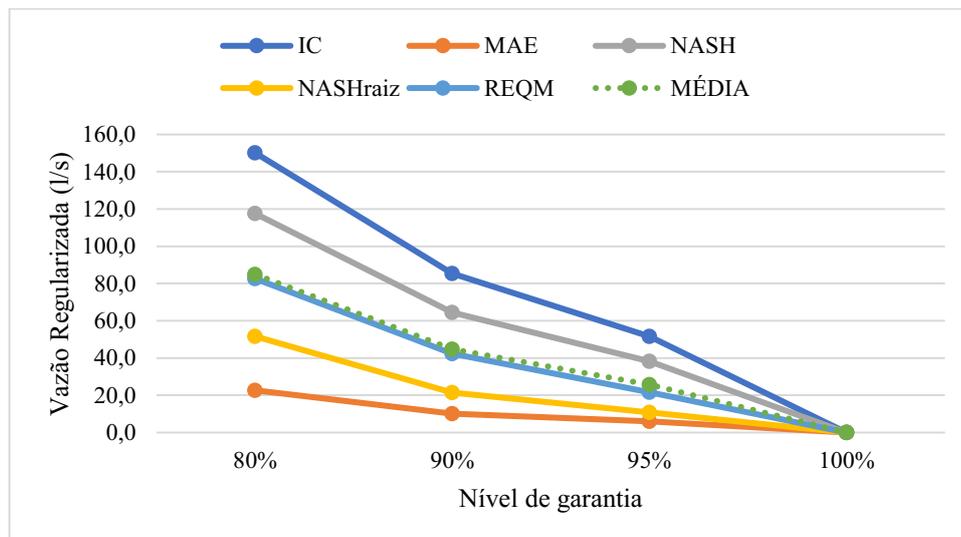
Tabela 10: Resultado da simulação reservatório Jaburu II.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	150,1	22,7	117,5	51,6	82,6	85,4	10,2	64,5	21,5	42,4
Vert (l/s)	41,7	25,9	24,6	15,9	68,9	45,7	26,3	27,0	16,6	71,9
Evap (l/s)	513,9	404,1	473,3	415,6	531,8	566,7	414,9	517,4	441,5	564,7

	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	51,7	6,0	38,3	10,9	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vert (l/s)	48,1	26,4	28,3	17,0	73,6	52,3	26,6	30,5	17,3	75,6
Evap (l/s)	596,1	418,7	540,8	451,2	582,6	642,9	424,4	576,3	461,6	601,8

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 9: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Jaburu II



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 10 e o Gráfico 9 apresentam que para o reservatório Jaburu II, têm-se os valores de vazão regularizada compreendidos no intervalo delimitado pelas funções MAE e IC para todos os níveis de garantia simulados, o vertimento possui seus valores mínimos na função NASHraiz e máximos na REQM, apresentando grande superioridade às demais, com valores em média 55% maiores que a função IC, que é a segunda com maiores valores de vertimento. A evaporação média do reservatório Jaburu II, possui seus valores mínimos na função MAE para todos os níveis de garantia e máximos na função REQM para a garantia de 80% e na função

IC para os níveis de 90%, 95% e 100%. No nível máximo de garantia o reservatório possui em todas as funções valores nulos para vazão regularizada, ou seja, é incapaz de operar sem a ocorrência de falhas, a função que mais se aproxima da média das vazões regularizadas é a REQM.

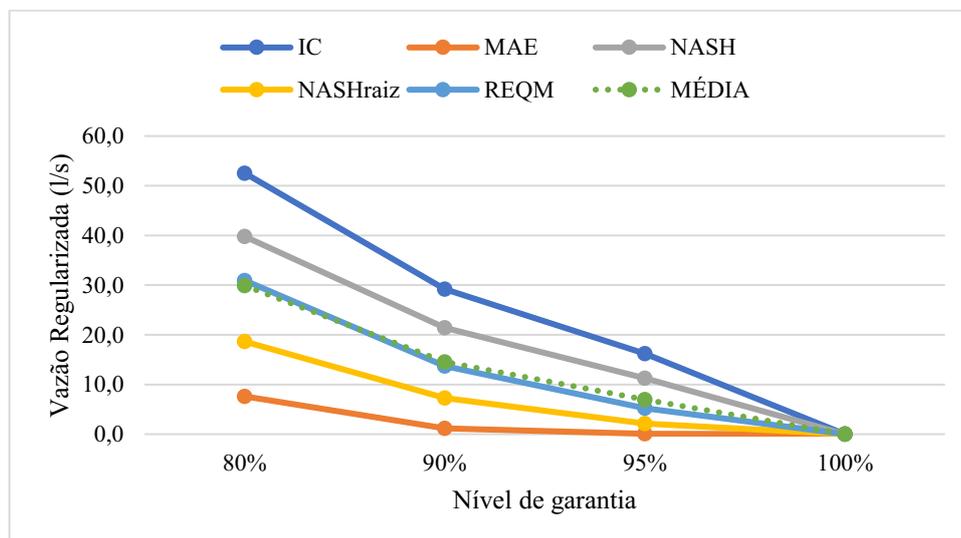
Tabela 11: Resultado da simulação do reservatório Realejo.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	52,5	7,6	39,8	18,6	30,9	29,2	1,2	21,4	7,3	13,7
Vert (l/s)	6,9	6,2	3,0	3,8	13,8	8,5	6,5	3,7	4,2	15,6
Evap (l/s)	119,0	103,0	110,3	102,1	121,9	135,1	108,4	125,4	111,8	135,3

	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	16,2	0,1	11,3	2,1	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vert (l/s)	9,8	6,6	4,3	4,4	16,6	11,8	6,6	5,0	4,5	17,3
Evap (l/s)	146,0	109,4	134,5	116,4	142,3	159,9	109,5	144,9	118,4	146,8

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 10: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Realejo



Fonte: Autor (2025).

O reservatório Realejo, apresenta através dos dados da Tabela 11 e Gráfico 10, valores de vazão regularizada com mínimos e máximos respectivamente expressos nas funções MAE e IC, enquanto os valores de vertimento médio possuem valores mínimos na função NASH para as garantias de 80%, 90% e 95% e na função NASHraiz para a garantia de 100%, com ambas

as funções apresentado grande proximidade nos valores de vertimento em todos os níveis de garantia, os valores máximos se dão pela função REQM para todos os níveis de garantia. A evaporação média do reservatório apresenta pequena variação entres as funções objetivo estudadas, com valores mínimos que se dão pela função NASHraiz no nível de 80% de garantia e pela função MAE para os níveis de 90%, 95% e 100%, enquanto seus valores máximos são expressos pela função REQM nas garantias de 80% e 90% e pela função IC nas garantias de 95% e 100%. O reservatório se mostra mais também como incapaz de operar sem falhas, possuindo vazão regularizada nula para todas as funções objetivo no nível de 100% de garantia, a função REQM apresenta-se como mais próximas dos valores médios de vazão regularizada.

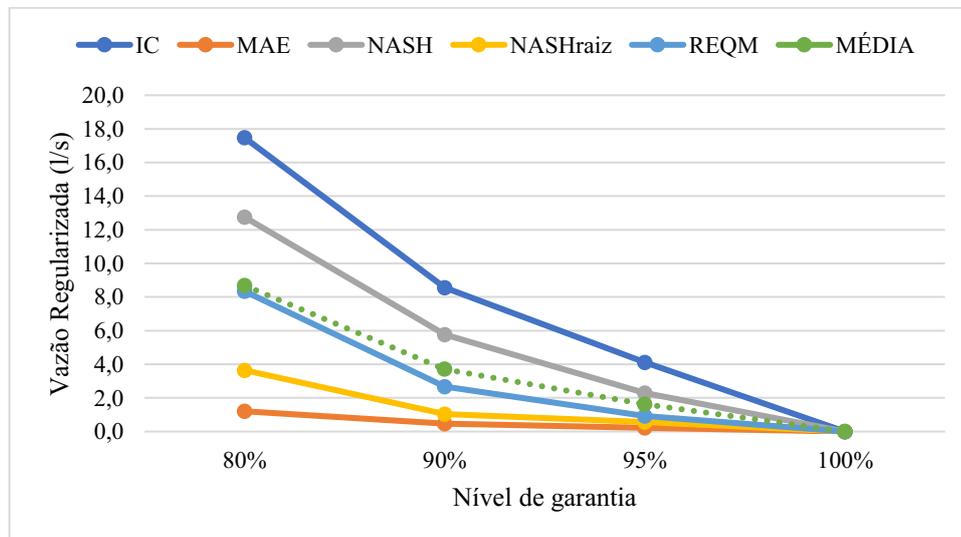
Tabela 12: Resultado da simulação do reservatório São José III.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	17,5	1,2	12,7	3,6	8,3	8,6	0,5	5,8	1,0	2,7
Vert (l/s)	8,6	6,5	6,4	3,7	13,3	10,0	6,6	7,2	3,9	14,2
Evap (l/s)	61,4	50,0	58,3	52,8	61,5	68,1	50,7	63,8	55,0	65,8

	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	4,1	0,2	2,3	0,6	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vert (l/s)	10,8	6,6	7,7	4,0	14,5	11,6	6,7	8,1	4,0	14,7
Evap (l/s)	73,7	50,9	66,7	55,4	67,1	74,8	51,1	68,6	55,9	67,9

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 11: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório São José III.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 12 e o Gráfico 11 mostram que para o reservatório São José III, a vazão regularizada encontra para todos os níveis seus valores de mínimos e máximos nas funções MAE e IC respectivamente, com a função IC apresentando valores bem acima das demais funções, com valores até duas vezes maiores que a média entre as cinco funções objetivo, mas ainda assim apresentando junto a todas as outras, vazão nula para o nível de 100% de garantia. Quanto ao vertimento do reservatório São José III, o intervalo de variação se limita entre as funções NASHraiz e REQM em todos os níveis de garantia. E a evaporação média possui mínimas na função MAE e máximas na IC, a função REQM é a que mais se aproxima aos valores médios de vazão regularizada.

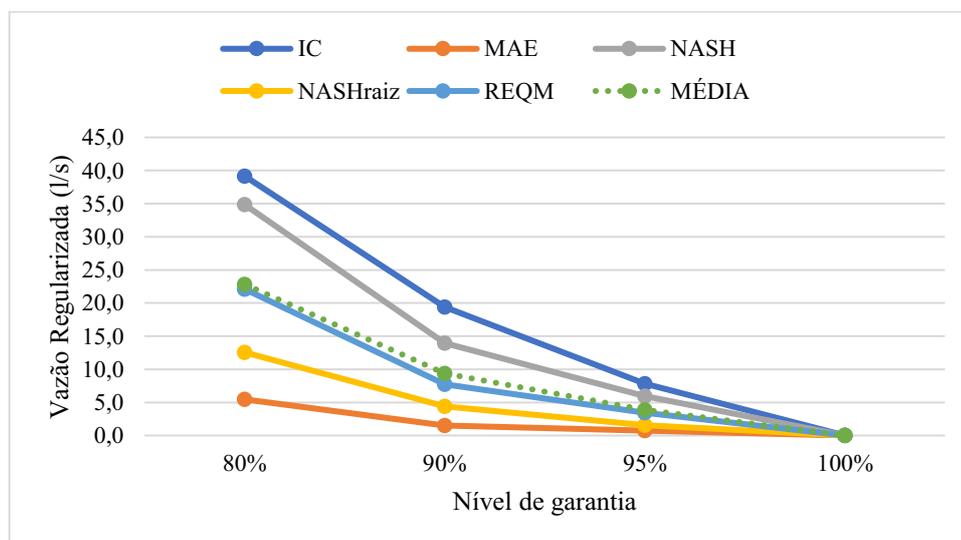
Tabela 13: Resultado da simulação reservatório Sucesso.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	39,2	5,5	34,8	12,6	22,1	19,4	1,5	13,9	4,4	7,7
Vert (l/s)	226,8	188,4	202,8	168,8	247,4	236,1	189,8	212,2	171,9	253,7
Evap (l/s)	92,1	82,6	90,3	86,0	89,9	100,4	84,8	99,6	90,3	96,7

	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	7,8	0,7	5,9	1,6	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vert (l/s)	242,2	190,0	216,2	173,0	255,8	246,6	190,3	219,3	173,7	257,5
Evap (l/s)	105,4	85,3	103,3	91,8	98,8	108,7	85,7	106,0	92,7	100,5

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 12: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Sucesso.



Fonte: Autor (2025)

O reservatório Sucesso através de dados da Tabela 13 e do Gráfico 12 apresenta para todos os níveis de garantia vazão regularizada mínima na função MAE e máxima na função IC, o vertimento do reservatório possui valores mínimos e máximos nas funções NASHraiz e REQM respectivamente, já a evaporação média apresenta mínimas na função MAE e máximas na função IC. O reservatório Sucesso é ainda mais um da RHSC incapaz de operar sem a ocorrência de falhas, uma vez que apresenta vazão regularizada nula para todas as funções na garantia de 100%, a função REQM apresenta os valores mais próximos da média para as vazões regularizadas.

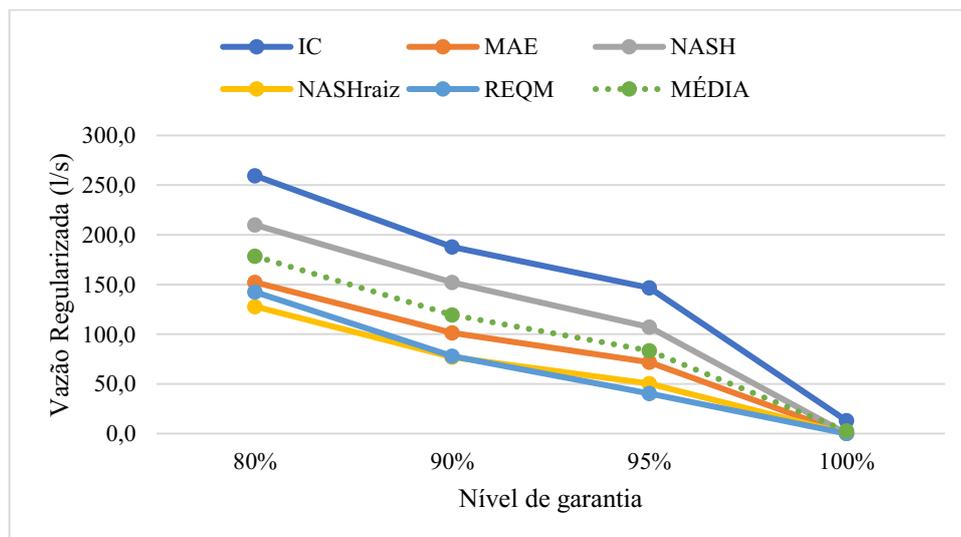
Tabela 14: Resultado da simulação do reservatório Flor do Campo.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	259,5	152,3	210,0	127,9	142,4	187,9	101,3	152,1	77,0	78,0
Vert (l/s)	5,4	6,4	2,8	1,8	11,3	7,3	7,7	3,7	2,3	13,8
Evap (l/s)	401,3	386,0	373,8	342,4	496,8	460,6	428,8	422,5	386,5	551,1

	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	146,8	71,7	107,2	50,4	40,3	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vert (l/s)	8,9	8,6	4,6	2,5	15,6	17,4	11,4	7,8	3,3	17,9
Evap (l/s)	497,2	456,8	463,5	411,4	584,9	620,5	524,7	566,0	460,3	622,2

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 13: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Flor do Campo.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 14 e o Gráfico 13 mostram que o reservatório Flor do Campo, o primeiro a ser simulado como um sistema em cascata, tendo o reservatório Colina a montante, apresenta vazão regularizada considerável, com seus valores mínimos na função NASHraiz para as garantias de 80%, 90% e 100%, na de 95% a mínima é a função REQM, máximos na IC para todos os níveis de garantia, sendo a função IC a única vazão regularizada não nula. O vertimento do reservatório é consideravelmente menor que as outras saídas nas garantias de 80%, 90% e 95%, mas possui para todos os níveis de garantia simulados o mesmo comportamento de distribuição, com mínimas na função NASHraiz e máximas na função REQM, a evaporação do reservatório se delimita entre as mesmas funções do vertimento, a função MAE é a que se apresenta como a mais próxima da média para os valores de vazão regularizada.

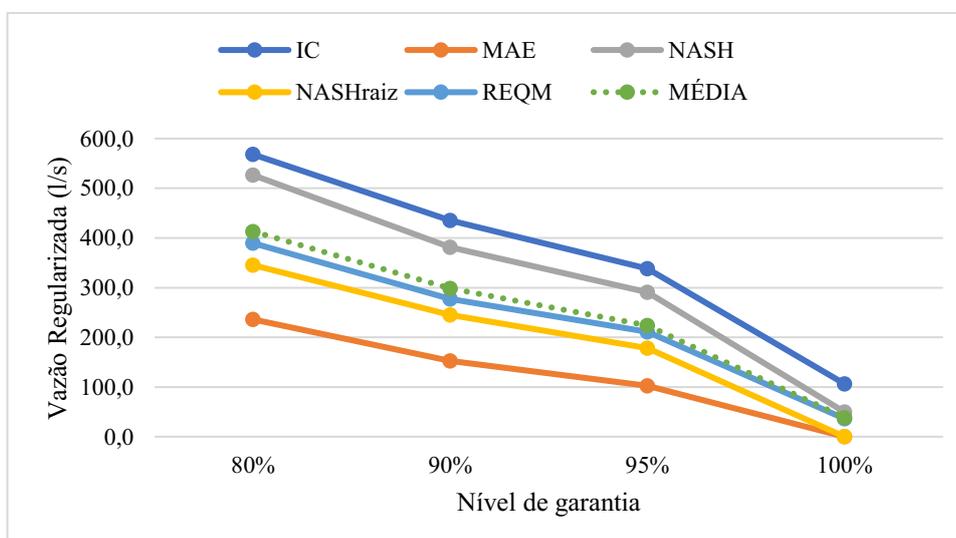
Tabela 15: Resultado da simulação reservatório Carnaubal.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	568,1	236,0	526,4	345,2	389,4	435,3	152,3	381,5	245,2	277,2
Vert (l/s)	851,5	728,0	717,1	581,3	937,5	918,6	763,8	786,7	625,6	992,9
Evap (l/s)	375,0	353,8	362,8	360,4	373,9	416,7	388,8	411,3	399,0	412,1

	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	338,2	102,5	290,4	178,1	211,1	106,5	0,0	49,7	0,0	36,2
Vert (l/s)	975,5	787,8	837,4	659,5	1029,6	1130,1	843,5	993,5	764,4	1139,4
Evap (l/s)	447,8	410,6	443,2	426,4	435,9	519,9	455,4	523,1	496,7	497,3

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 14: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Carnaubal.



Fonte: Autor (2025).

O reservatório Carnaubal que também faz parte de um sistema em cascata possuindo o sistema do reservatório Flor do Campo a montante, através de dados da Tabela 15 e do Gráfico 14 apresenta vazão regularizada considerável para todas as funções, tendo mínimas na função MAE e máximas na função IC para todos os níveis de garantia, apresentando capacidade de operar com 100% de garantia nas simulações das funções IC, NASH e REQM. O vertimento do reservatório Carnaubal representa a maior parcela de sua vazão de saída, apresentando respectivamente seus valores mínimos e máximos nas funções NASHraiz e REQM em todos os níveis de garantia, já a evaporação média no reservatório em algumas simulações aparece como a menor parcela da vazão de saída, possuindo seus menores valores na função MAE e maiores na função IC nas garantias de 80%, 90% e 95%, na garantia de 100% a evaporação máxima é obtida pela função NASH com a função IC aparecendo com o segundo maior valor e com grande proximidade à primeira, a média das vazões regularizadas apresenta maior proximidade com os valores da função REQM.

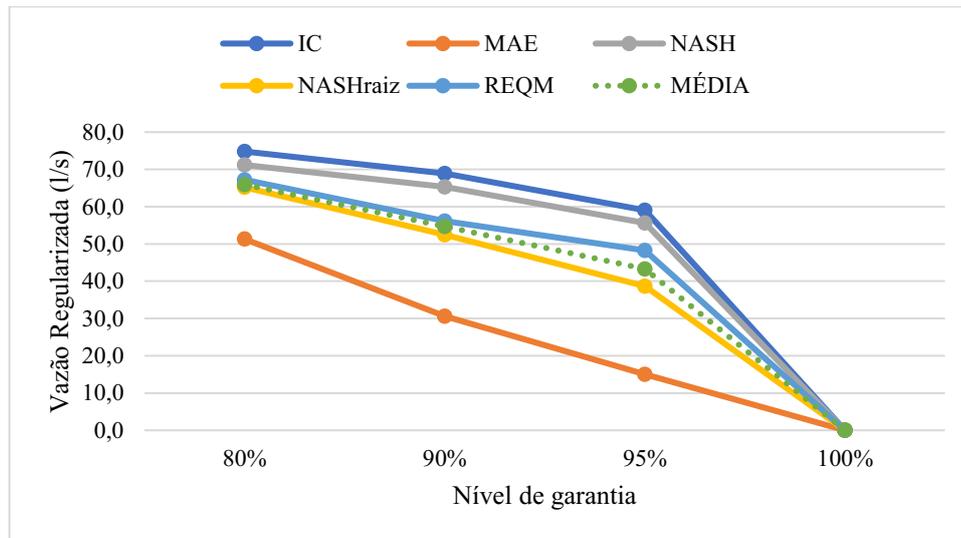
Tabela 16: Resultado da simulação do reservatório Batalhão.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	74,8	51,3	71,2	65,2	67,2	68,9	30,6	65,3	52,4	56,1
Vert (l/s)	3161,5	2371,0	2704,3	2117,3	3367,8	3166,3	2386,6	2709,1	2127,2	3376,4
Evap (l/s)	26,8	24,6	26,7	25,6	25,5	27,6	27,7	27,3	27,3	27,2

	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	59,0	15,0	55,7	38,7	48,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vert (l/s)	3174,8	2399,5	2717,3	2138,8	3383,0	3230,1	2412,9	2768,9	2173,9	3427,1
Evap (l/s)	28,6	29,6	28,4	28,8	28,2	32,0	31,0	31,9	31,7	31,7

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 15: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Batalhão.



Fonte: Autor (2025).

O reservatório Batalhão é um reservatório pequeno, possui apenas 1,64 hm³ de capacidade, mas que recebe grandes volumes de água por possuir a montante o sistema do Carnaubal e os reservatórios Cupim, Jaburu II e Barra Velha, tendo assim grandes volumes de vertimento médio. A Tabela 16 e o Gráfico 15 mostram que para a vazão regularizada o reservatório Batalhão possui mínimas na função MAE e máximas na IC para todos os níveis de garantia, com incapacidade de operar sem falhas, o vertimento do reservatório que chega a representar mais de 95% da sua vazão de saída, possui valores mínimos na função NASHraiz e máximos na função REQM, enquanto a evaporação média possui mínimas na função MAE nos níveis de 80% e 100% de garantia e na função REQM nas garantias de 90% e 95%, as máximas são obtidas pelas funções IC e MAE, mas apresentando pequena variação entre as funções em todos os níveis de garantia simulados, a função REQM é a que se mostra mais próxima aos valores de média da vazão regularizada.

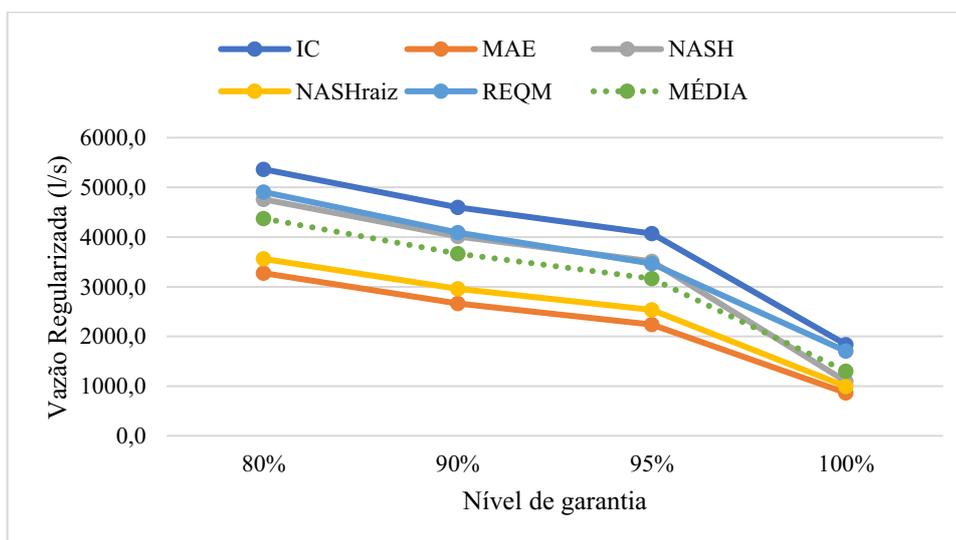
Tabela 17: Resultado da simulação do reservatório Fronteiras.

	80%					90%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	5364,3	3273,8	4759,1	3559,7	4907,6	4593,7	2661,5	4009,8	2960,5	4090,9
Vert (l/s)	932,7	888,9	686,1	455,7	1382,6	1149,7	1039,4	870,0	557,2	1647,3
Evap (l/s)	2636,4	2619,9	2546,3	2343,3	2858,7	3080,6	2997,8	2994,6	2747,7	3293,6

	95%					100%				
	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM	IC	MAE	NASH	NHrz	REQM
Qreg (l/s)	4067,8	2240,7	3511,4	2533,7	3466,8	1837,1	864,5	1093,1	993,3	1702,6
Vert (l/s)	1328,6	1162,0	1015,2	644,8	1885,3	2307,7	1678,0	2023,7	1112,2	2724,4
Evap (l/s)	3387,5	3268,5	3310,6	3053,5	3634,5	4603,8	4107,7	4691,4	4103,6	4534,5

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 16: Comparativo das vazões regularizadas do reservatório Fronteiras.



Fonte: Autor (2025).

A partir da Tabela 17 e do Gráfico 16, têm-se os valores de vazões para o reservatório Fronteiras, o maior da RHSC e projetado para receber as águas que vertem do sistema do Batalhão e dos reservatórios Sucesso, Realejo e São José III. Para todos os níveis de garantia simulados, os valores de vazão regularizada pelo reservatório possuem mínimas obtidas na função MAE e máximas na IC, o vertimento mínimo e máximo são expressos através das funções NASHraiz e REQM respectivamente, e a evaporação média possui mínimas na função NASHraiz e máximas na função REQM nas garantias de 80%, 90% e 95%, enquanto na garantia de 100% a evaporação máxima é expressa pela função IC. O reservatório Fronteiras se mostrou ainda como o único capaz de operar sem a ocorrência de falhas, visto que possui

valores consideráveis de vazão regularizada para todas as simulações com 100% de garantia, a função NASH é que se mostra mais próxima dos valores de média das vazões regularizadas.

Diante dos resultados das simulações de operação dos reservatórios por meio de cada uma das funções objetivo, podemos determinar para cada vazão de saída (vazão regularizada, vertimento médio e evaporação média) qual função mais se ajusta aos valores de máximos, mínimos e medianos, considerando cada um dos níveis de garantia simulados. A Tabela 19 apresenta as funções que expressam esses valores da vazão regularizada dos reservatórios.

Tabela 18: Funções objetivo de mínimas, medianas e máximas vazões regularizadas.

Reservatório	Vazão Regularizada											
	80%			90%			95%			100%		
	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx
Barra Velha	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
Colina	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	NHrz	IC
Cupim	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
Jaburu II	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
Realejo	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
São José III	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
Sucesso	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
Flor do Campo	NHrz	RQ	IC	NHrz	RQ	IC	RQ	MAE	IC	NHrz	RQ	IC
Carnaubal	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
Batalhão	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
Fronteiras	MAE	NH	IC	MAE	NH	IC	MAE	RQ	IC	MAE	NH	IC

Fonte: Autor (2025).

De acordo com a Tabela 19 a função objetivo que mais se ajusta aos valores mínimos da vazão regularizada dos reservatórios da RHSC é a função MAE, aparecendo como valor mínimo em 91% das simulações possíveis, a função IC é a que mais se ajusta aos valores máximos de vazão regularizada, aparecendo como função de máximo em 100% das simulações, a função REQM aparece como valor mediano em 88,6% das simulações. A Tabela 20 apresenta as funções de mínimo, mediano e máximo vertimento dos reservatórios.

Tabela 19: Funções de mínimo, mediano e máximo vertimento dos reservatórios.

Reservatório	Vertimento											
	80%			90%			95%			100%		
	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx
Barra Velha	NHrz	MAE	RQ	NHrz	MAE	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ
Colina	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	IC
Cupim	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ
Jaburu II	NHrz	MAE	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ
Realejo	NH	MAE	RQ	NH	MAE	RQ	NH	MAE	RQ	NHrz	MAE	RQ
São José III	NHrz	MAE	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ
Sucesso	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ
Flor do Campo	NHrz	IC	RQ	NHrz	IC	RQ	NHrz	MAE	RQ	NHrz	MAE	RQ
Carnaubal	NHrz	MAE	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ
Batalhão	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	NH	RQ
Fronteiras	NHrz	MAE	RQ	NHrz	MAE	RQ	NHrz	MAE	RQ	NHrz	NH	RQ

Fonte: Autor (2025).

A Tabela 19 mostra que para o vertimento os valores mínimos são expressos em 93% das simulações pela função NASHraiz, enquanto os valores máximos são expressos pela função REQM em 98% das simulações possíveis, os valores medianos de vertimento são expressos pela função NASH em 63,6% das simulações, pela função MAE em 31,8% e por IC em 4,5%. A Tabela 20 apresenta as funções de mínima, mediana e máxima evaporação dos reservatórios.

Tabela 20: Funções de mínima, mediana e máxima evaporação dos reservatórios.

Reservatório	Evaporação											
	80%			90%			95%			100%		
	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx
Barra Velha	MAE	NH	IC	MAE	NH	IC	MAE	NH	RQ	MAE	RQ	RQ
Colina	MAE	RQ	IC	NHrz	RQ	IC	MAE	RQ	NH	MAE	RQ	NH
Cupim	MAE	NH	RQ	MAE	NH	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
Jaburu II	MAE	NH	RQ	MAE	NH	IC	MAE	NH	IC	MAE	NH	IC
Realejo	NHrz	NH	RQ	MAE	NH	RQ	MAE	NH	IC	MAE	NH	IC
São José III	MAE	NH	IC	MAE	NH	IC	MAE	NH	IC	MAE	RQ	IC
Sucesso	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	IC
Flor do Campo	NHrz	MAE	RQ	NHrz	MAE	RQ	MAE	NH	RQ	NHrz	NH	RQ
Carnaubal	MAE	NH	IC	MAE	NH	IC	MAE	RQ	IC	MAE	RQ	NH
Batalhão	MAE	NHrz	IC	RQ	NHrz	MAE	RQ	NHrz	MAE	MAE	NHrz	IC
Fronteiras	NHrz	MAE	RQ	NHrz	MAE	RQ	NHrz	NH	RQ	NHrz	RQ	NH

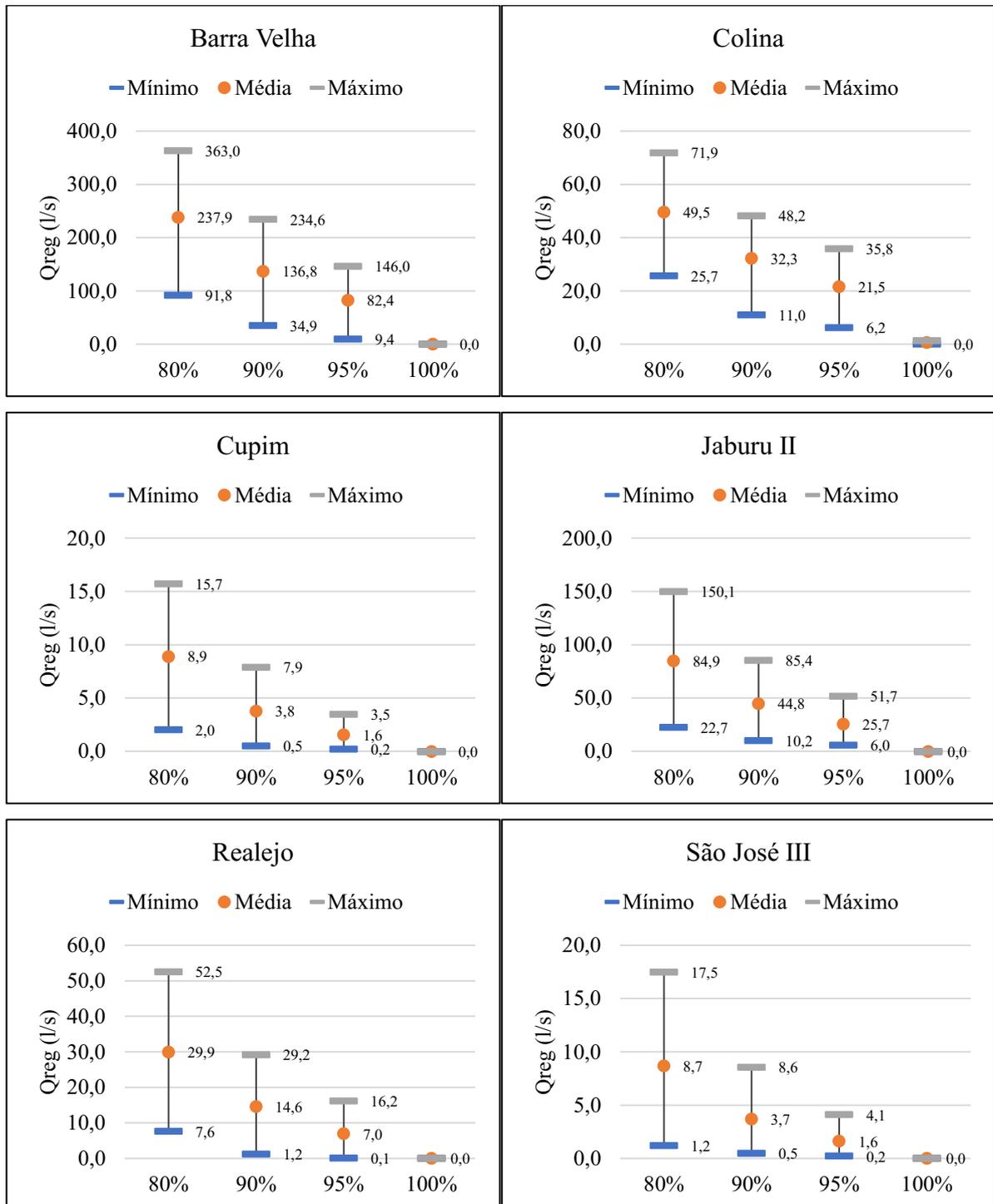
Fonte: Autor (2025).

Os dados da Tabela 20 mostram que a evaporação, dentre as vazões de saída dos reservatórios é a que apresenta maior variação nas funções de mínimas, medianos e máximas,

sendo os valores mínimos expressos pela função MAE em 81,8% das simulações, pela função NASHraiz em 13,6% e pela função REQM em 4,5% das simulações, os valores máximos ocorre uma variação ainda maior nas funções de pico, sendo expressos por meio da função IC em 59,1% das simulações, pela função REQM em 29,5%, a NASH em 6,8% e pela função MAE em 4,5% das simulações, com a função NASHraiz sendo a única que não aparece em nenhuma simulação como valor máximo de evaporação, a mediana é expressa pela função NASH em 47,7% das simulações, pela REQM em 34,1% e as funções MAE e NASHraiz aparecem como valor mediano em 9,1%.

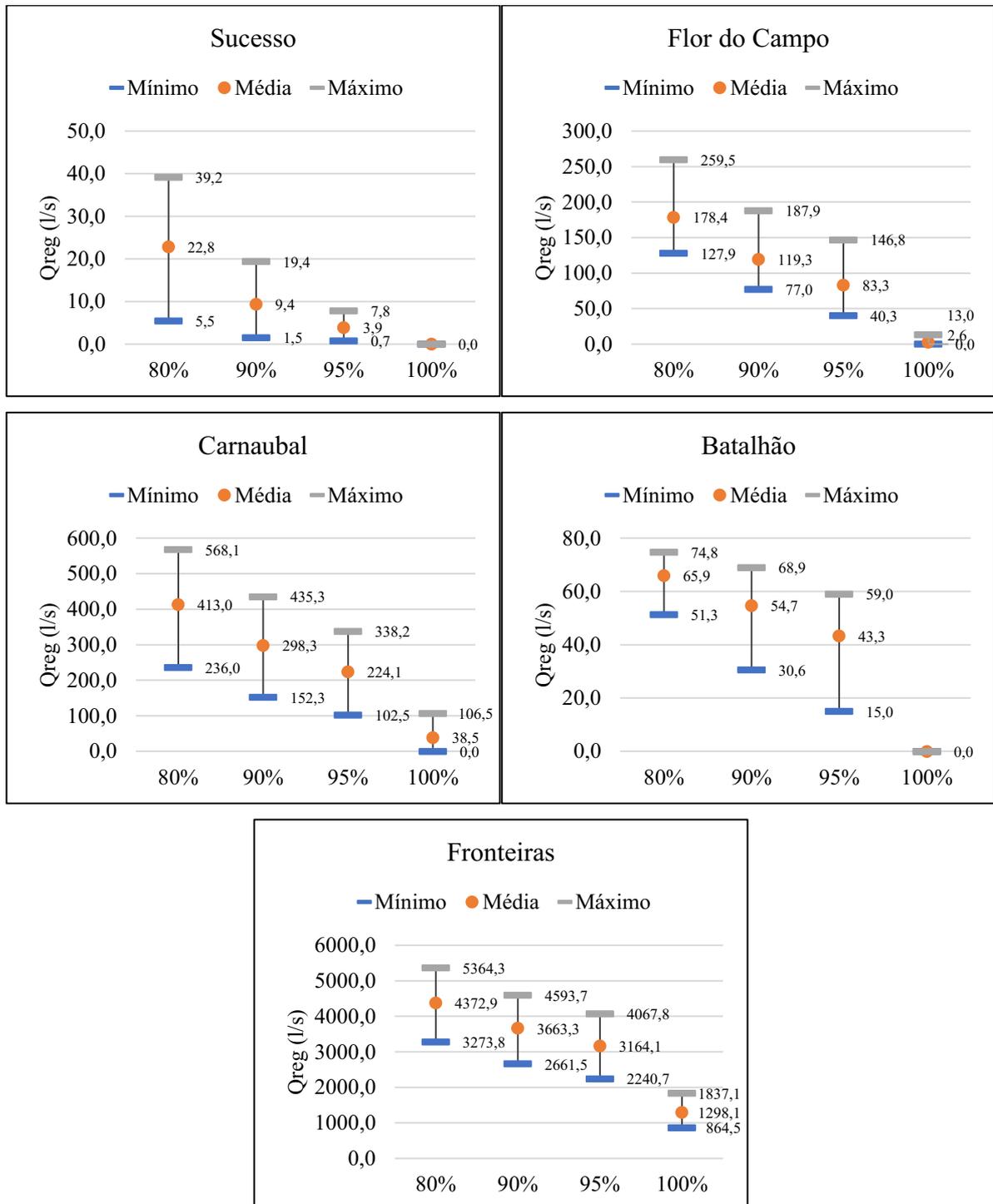
As simulações dos reservatórios da RHSC por meio de cada função objetivo nos permitem ainda criar intervalos de variação para as vazões regularizadas para cada um dos níveis de garantia, e determinar nível de garantia apresenta maior intervalo de variação para funções estudadas. A Figura 8 apresenta de forma gráfica os intervalos de variação para as vazões de saída dos reservatórios para cada nível de garantia.

Figura 8: Intervalos de variação das vazões regularizadas dos reservatórios da RHSC.



(Continua)

Figura 8: Intervalos de variação das vazões regularizadas dos reservatórios da RHSC.

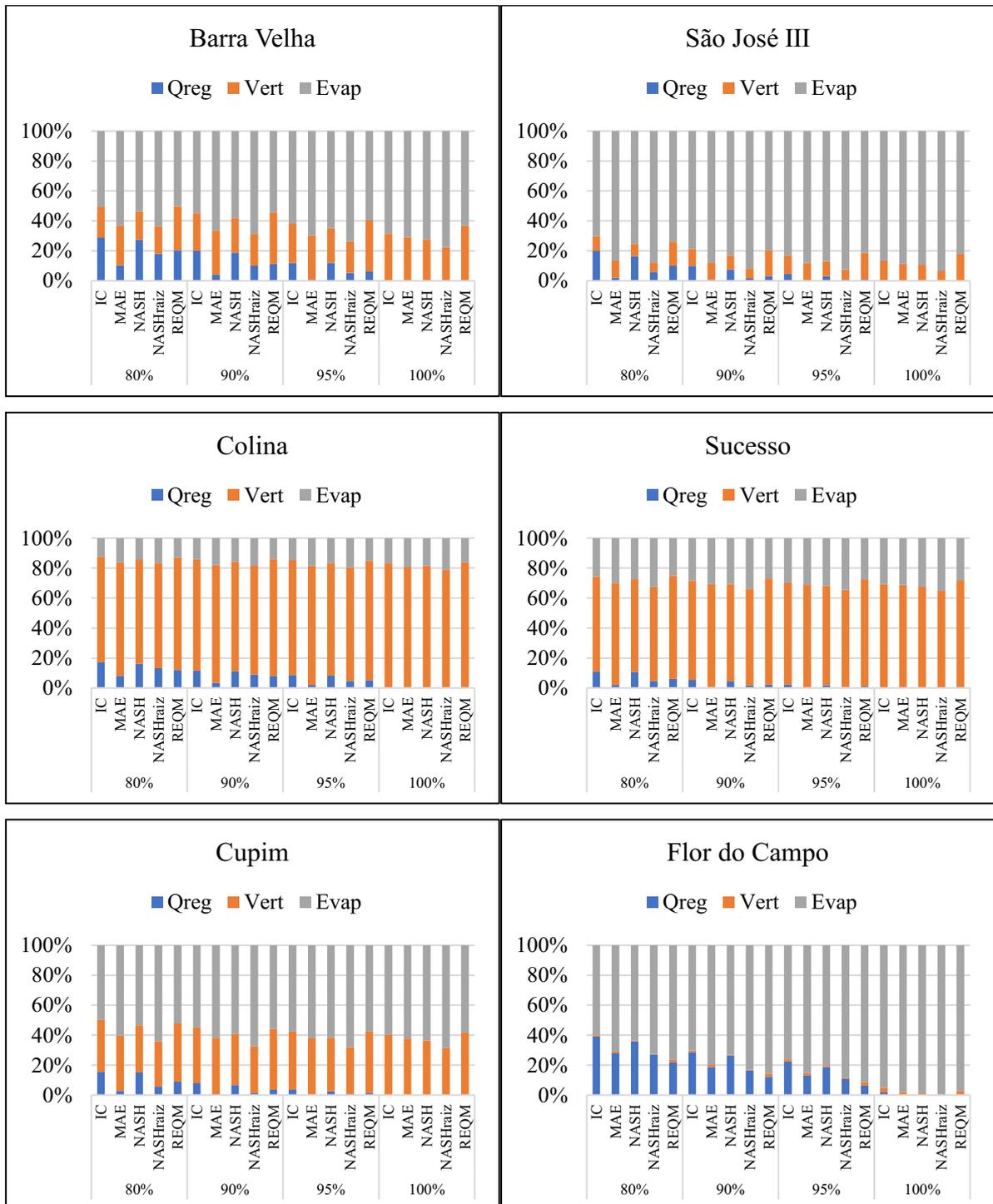


Fonte: Autor (2025).

A Figura 8 mostra para cada um dos reservatórios o intervalo de variação da vazão regularizada diminui com o aumento do nível de garantia, apresentando-se como o menor possível na garantia de 100%, onde a maioria dos reservatórios para este tipo de simulação irão apresentar vazão regularizada nula. As particularidades físicas e de operação de cada

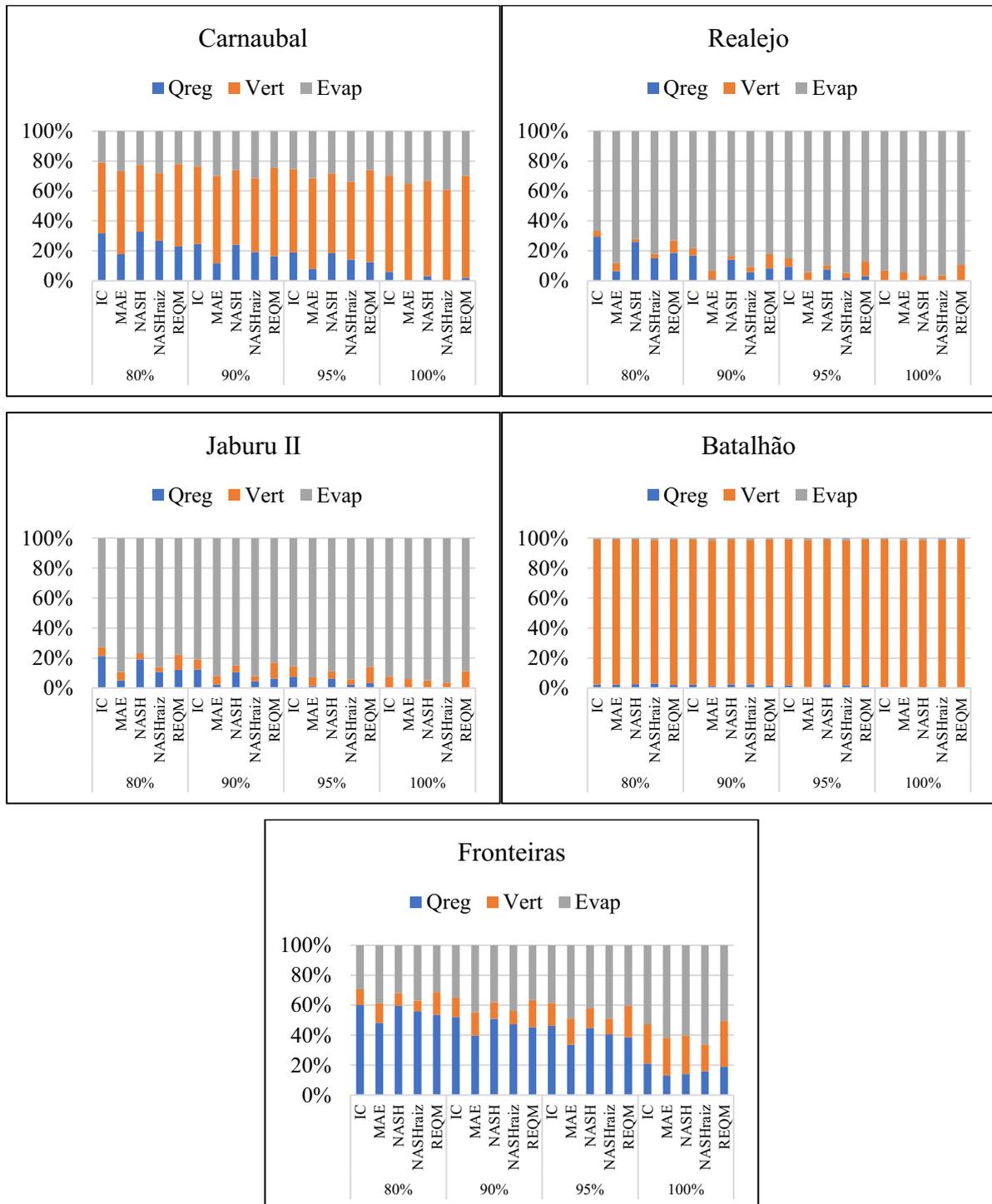
reservatório, também são responsáveis por essa variação, onde a depender da função objetivo utilizada teremos intervalos maiores também para o vertimento e evaporação do volume de água desses reservatórios, como por exemplo, o reservatório do Batalhão apresenta grandes intervalos de variação no vertimento médio, isso se deve ao fato do reservatório ser pequeno e ter a maior parcela de seu volume útil vertido, por outro lado o Fronteiras que é um reservatório projetado para maximizar a capacidade de regularizar vazão, apresenta maiores intervalos de variação nestes valores de vazão regularizada, que representa uma parcela considerável da água que sai do reservatório, por tanto, o tamanho desses intervalos de variação está diretamente ligado as particularidades de cada reservatório, onde se espera que reservatórios menores que captam grandes volumes de água, apresentem maior variação no vertimento médio, reservatórios com regime de operação menos eficientes apresentem maior variação na evaporação média, e reservatórios com boa capacidade de abastecimento apresentem variações mais perceptíveis na vazão regularizada. Com intuito de visualizar a operação dos reservatórios da RHSC, pode-se verificar para cada reservatório que percentual cada vazão de saída representa do volume útil daquele reservatório, a Figura 9 apresenta de forma gráfica os valores percentuais das vazões de saída de cada reservatório para as funções objetivos e os níveis de garantia simulados.

Figura 9: Percentuais das vazões de saída dos reservatórios da RHSC.



(Continua)

Figura 9: Percentuais das vazões de saída dos reservatórios da RHSC.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 9 mostra que cada reservatório da RHSC opera de modo particular, mas que se mantém para todas as funções objetivo estudadas e utilizadas na simulação de operação dos reservatórios, as simulações realizadas neste estudo demonstram que os reservatórios da RHSC possuem grande parte do seu volume perdido através de evaporação, representando essa a maior

parcela de saída de água dos reservatórios: Barra Velha, São José III, Cupim, Flor do Campo, Realejo e Jaburu II, totalizando seis dos onze reservatórios estratégicos da região, o que se deve bastante as características climáticas e as necessidades da região. As simulações demonstram ainda que o vertimento representa a maior parcela de saída de água dos reservatórios: Colina, Sucesso, Carnaubal e Batalhão, quatro dos onze reservatórios estratégicos da RHSC, pelo funcionamento em sistema de cascata e disposição dos reservatórios da região todos estes acabam por compor as águas que chegam ao reservatório Fronteiras, que é o único indicado nas simulações como tendo capacidade de operar sem a ocorrência de falhas no abastecimento, ou seja, apresenta vazão regularizada considerável para o nível de 100% de garantia para todas as funções objetivo.

6 CONCLUSÃO

O Presente estudo buscou determinar e analisar através de cinco diferentes funções objetivo as séries de vazões afluentes dos reservatórios da RHSC, e simular através destas séries obtidas a operação destes reservatórios, dando ênfase principalmente a suas capacidades de regularizar vazões, o que no contexto atual de mudanças climáticas e necessidades de recursos hídricos se mostra de grande relevância.

Através do modelo chuva-vazão foi possível determinar por cada função objetivo as séries de vazões afluentes dos reservatórios contendo 107 anos de dados, onde para cada reservatório determinou-se 5 diferentes séries, uma para cada função objetivo. Posteriormente por meio destas séries, obtidas através das funções objetivo, simulou-se a operação destes reservatórios com auxílio do Software SIMRES para os níveis de garantia de 80%, 90%, 95% e 100%. Vale ressaltar que a escolha das funções objetivo utilizadas neste estudo se deram mediante suas variações de características, em que funções como NASH, REQM e IC são recomendados quando se deseja priorizar o ajuste das vazões de maiores magnitudes, pois há uma maior sensibilidade as ordens de grandezas das vazões, NASHraiz ameniza os efeitos das vazões máximas, e MAE não possui sensibilidade a diferença de magnitude das vazões, além disso essas funções já haviam sido calibradas em estudo desenvolvido por Rosa e Alexandre (2021) na RHSC.

As séries de vazões afluentes obtidas para cada reservatórios apresentam variações entre si, sendo a REQM a que apresenta os maiores intervalos de variação nas médias de vazões anuais. Comparando entre si as 5 diferentes séries, as da função NASH apresentam-se como a mais próxima dos valores médios obtidos, com variação inferior a 5% em torno dessa média, possuindo também o menor desvio padrão, inferior a 7%, para todos os reservatórios. Como modo de analisar estas séries, determinou-se os coeficientes de Runoff a partir destas, onde as 5 apresentam comportamentos semelhantes para o coeficiente de Runoff, sendo novamente a função NASH a mais próxima dos valores médios, e todas as funções apontando os reservatórios Jaburu II, Realejo e São José III com os menores coeficientes. As simulações de operação dos reservatórios da RHSC por meio das séries obtidas, mostrou que as cinco funções simulam de modo satisfatório a operação desses, apresentando comportamentos semelhantes, mas com variações consideráveis nos valores de vazão regularizada, vertimento e evaporação dependendo do nível de garantia da operação.

Comparando as simulações relacionadas a cada função objetivo para os reservatórios, a função IC apresentou para todos os reservatórios da RHSC os maiores valores de vazão

regularizada, enquanto função MAE apresenta na maior parte os menores valores, junta com a função NASHraiz. A função REQM e NASH se mostram como as mais próximas dos valores médios, sendo a REQM a mais próxima. A partir destas séries foi possível construir intervalos de variação para a vazão regularizada de cada reservatório, intervalos esses que se mostram cada vez menores a medida que o nível de garantia da simulação de operação aumenta, sendo o maior possível na garantia de 80% e o menor na de 100%, onde a maioria dos reservatórios apresenta vazões regularizadas iguais a zero, ou seja, com intervalo nulo, apenas com reservatório Fronteiras, ainda em fase de construção, apresentou um intervalo de variação considerável, para as vazões regularizadas no nível de 100% de garantia.

As cinco funções mostram ainda que a maioria dos reservatórios da RHSC perdem a maior parcela de suas águas pelo processo de evaporação, sendo os reservatórios Barra Velha, São José III, Cupim, Flor do Campo, Realejo e Jaburu II, seis dos reservatórios da região, os que apresentam a maior parcela de suas águas perdidas pelo processo de evaporação, o que mostra um regime de operação ineficiente destes reservatórios, e da região hidrográfica como um todo, já que estes representam mais da metade dos reservatórios estratégicos da região com Barra Velha e Jaburu II figurando entre os maiores da região.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, A. M. B., MARTINS, E. S., CLARKE, R. T., REIS, D. S. JR. **Regionalização de Parâmetros de Modelos Hidrológicos**. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, João Pessoa – PB, 2005.

ALEXANDRE, Deborah Mithya Barros. **Gestão de pequenos sistemas hídricos no semiárido nordestino**. 2012. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012

ALMEIDA, Pedro Victor de. **Garantias de abastecimento de águas dos reservatórios Castanhão e Banabuiú e implicações na Outorga**. 2016. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Construção Civil) - Departamento de Construção Civil, Universidade Regional do Cariri, p. 24, 2016.

BRANDÃO, J. L. B. **Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos**. 160f. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

CAMPOS, José Nilson. **Dimensionamento de Reservatórios: O Método do Diagrama Triângulo de Regularização**/ Nilson Campos. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2015.

CAMPOS, José Nilson. STUDART, Ticiania Marinho de Carvalho. **Método Monte Carlo e SimRes: Laboratório Computacional para Análise de Reservatórios**. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009. Campo Grande, MS. 2009.

CEARÁ, Governo Estadual. **Boletim da perenização de trechos de rios durante a estação seca de 2020**. Fortaleza, 2020.

CEARÁ, Governo Estadual. **Plano estadual de convivência com a seca ações emergenciais e estruturantes**. Fortaleza, 2015.

COGERH; FUNCEME, **Portal Hidrológico do Ceará**. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/> Acesso em: 06/12/2024.

COGERH, **Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará**. Disponível em: <http://atlas.cogerh.com.br/> Acesso em: 09/02/2025.

DNOCS; **Projeto Executivo da Barragem Fronteiras**, vol. 1 Relatório Geral do Projeto. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. 122 p. Fortaleza, 2013.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. (1981). **Simulação hidrológica: aplicações de um modelo simplificado**. IV Simpósio brasileiro de hidrologia e recursos hídricos, anais 1, p. 42 - 62

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. (2007). **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations**. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), v.50 (3), p.885-900

ROCHA, R.V.; SOUZA FILHO, F. A.; ESTÁCIO, A. B. S. **Análise das incertezas dos parâmetros na modelagem hidrológica chuva-vazão SMAP através de abordagem bayesiana formal: Estudo de caso do reservatório Orós**. p. 139-146. In: ADAPTA: Gestão adaptativa do risco climático de seca/ organizado por Francisco de Assis de Souza Filho, Samiria Maria Oliveira da Silva, Rosa Maria Formiga-Johnsson, *et. al.* - Fortaleza:ExpressãoGráfica e Editora 2019.

ROSA, Caio Soares. **Operação de reservatórios do sistema de abastecimento dos municípios da região hidrográfica dos sertões de Crateús**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2019.

SOUSA, Waldymar Araújo. **Disponibilidade hídrica da região hidrográfica dos sertões de Crateús: a regularização de vazões por reservatórios estratégicos**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022.

UFC/COGERH. **Estudos de regionalização de parâmetros de modelo hidrológico chuva-vazão, para as bacias totais e incrementais dos reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos**. Relatório 1.1.11. Convênio UFC/COGERH/FCPC. Fortaleza, p. 26, 2013.

WILLMOTT, C (1982). **Some Comments on the Evaluation of Model Performance**. Bulletin of the American Meteorological Society, v.63, n.11, p.1309-1313

YEH, W. W-G. **Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review**. Water Resources Research, v.21, n.12, p. 1797-1818, 1985.