



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

WALDYMAR ARAÚJO SOUSA

**DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE
CRATEÚS: A REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES POR RESERVATÓRIOS
ESTRATÉGICOS.**

CRATEÚS

2022

WALDYMAR ARAÚJO SOUSA

DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE
CRATEÚS: A REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES POR RESERVATÓRIOS
ESTRATÉGICOS.

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

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S698d Sousa, Waldymar Araújo.
Disponibilidade hídrica da região hidrográfica dos sertões de Crateús : A regularização de vazões por reservatórios estratégicos / Waldymar Araújo Sousa. – 2022.
110 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Alan Michael Barros Alexandre.

1. Vazões Regularizadas. 2. Reservatórios Artificiais. 3. Níveis de Garantias. I. Título.

CDD 620

WALDYMAR ARAÚJO SOUSA

DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE
CRATEÚS: A REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES POR RESERVATÓRIOS
ESTRATÉGICOS.

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. Ms. Tatiane Lima Batista
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Janine Brandão de Farias Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico o presente trabalho aos meus pais, Neto e Maria, pelo apoio incondicional durante todo o período acadêmico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita bondade.

Aos meus pais, Neto e Maria, por todo esforço investido na minha educação e pelos valiosos ensinamentos.

A minha família, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e incentivando ao longo de toda a minha vida.

A todos os meus professores que tive durante minha jornada de formação educacional.

Ao Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre, por aceitar e pela excelente orientação ao meu projeto de pesquisa.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Ms. Tatiane Lima Batista e Prof. Dr. Janine Brandão de Farias Mesquita pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“Eu sou de uma terra que o povo padece
Mas não esmorece e procura vencer.
Da terra querida, que a linda cabocla
De riso na boca zomba no sofrer
Não nego meu sangue, não nego meu nome
Olho para fome, pergunto o que há?
Eu sou brasileiro, filho do Nordeste,
Sou cabra da peste, sou do Ceará.”
Patativa do Assaré.

RESUMO

O Estado do Ceará está geograficamente localizado em uma zona intertropical do planeta. Entre as principais características dessa zona estão a sazonalidade das chuvas e a intensa incidência solar, que resulta em duas estações hidrologicamente distintas, uma chuvosa e outra seca, além das altas taxas de evaporação durante o ano. A região, localizada no embasamento cristalino, é caracterizada por solos rasos e compactos, favorecendo a formação de rios intermitentes e efêmeros. Assim, as águas superficiais naturais apresentam-se insuficientes para suprir as demandas, sendo necessária a construção de reservatórios superficiais artificiais de modo a aumentar a disponibilidade hídrica, em termos de vazões regularizadas. O presente trabalho tem como objetivo geral determinar as vazões regularizadas, com diferentes níveis de garantia, para 11 reservatórios estratégicos da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), além do impacto na capacidade de regularização de vazões dos sistemas integrados de reservatórios em série. A simulação da operação dos reservatórios foi realizada através do modelo hidrológico SIMRES. Para tal, os reservatórios foram classificados em dois grupos quanto a existência ou não de reservatórios estratégicos na sua bacia hidrográfica. O grupo sem a presença de reservatório à montante foi simulado em paralelo. Já para aqueles que possuem reservatório a montante foram realizados dois tipos de simulações, uma em paralelo, considerando sua bacia hidrográfica natural, e outra em série, considerando os reservatórios em cascata como um sistema hídrico. Verificou-se que a RHSC tem capacidade de regularizar uma vazão de 218,5 l/s, com 90% de garantia, desconsiderando o reservatório Fronteiras (ainda em construção), sendo 78% dessa vazão correspondente a soma de três reservatórios: Carnaubal, Barra Velha e a Barragem do Batalhão. Com o Fronteiras a vazão regularização total da RHSC passará a ser de 2.358,5 l/s, para 90% de garantia. Este foi o único a apresentar uma capacidade de regularização de vazões com 100% de garantia. Como resultados das simulações foi possível verificar a eficiência dos reservatórios através do balanço hídrico, relacionando as vazões afluentes com os valores das vazões de saída em parcelas regularizadas, vertidas e evaporadas, onde dois apresentaram-se extremamente ineficientes, quatro ineficientes, quatro eficientes e um extremamente eficiente. Em relação ao impacto na capacidade de regularização de vazões em sistemas integrados, dois dos reservatórios apresentaram perdas em relação a hipótese da existência apenas do reservatório principal, e dois apresentaram ganhos nas capacidades de regularização de vazões quando operados em conjunto.

Palavras-chave: Vazões regularizadas; Reservatórios artificiais; Níveis de garantia.

ABSTRACT

The state of Ceará is geographically located in an intertropical zone of the planet. Among the main characteristics of this zone are the seasonality of the rains and the intense solar incidence, which results in two hydrologically distinct seasons, one rainy and the other dry, in addition to high evaporation rates during the year. The region, located in the crystalline basement, is characterized by shallow and compact soils, favoring the formation of intermittent and ephemeral rivers. Thus, natural surface waters are insufficient to meet the demands, making it necessary to build artificial surface reservoirs in order to increase water availability, in terms of regularized flows. The present work has as general objective to determine the regularized flows, with different levels of guarantee, for 11 strategic reservoirs of the Hydrographic Region of backlands de Crateús (RHSC), in addition to the impact on the flow regularization capacity of the integrated systems of reservoirs in series. The simulation of the operation of the reservoirs was carried out using the SIMRES hydrological model. To this end, the reservoirs were classified into two groups according to the existence of strategic reservoirs in their hydrographic basin. The group without the presence of an upstream reservoir was simulated in parallel. For those with upstream reservoirs, two types of simulations were performed, one in parallel, considering their natural watershed, and another in series, considering the cascade reservoirs as a water system. It was found that the RHSC has the capacity to regulate a flow of 218.5 l/s, with 90% guarantee, disregarding the Fronteiras reservoir (still under construction), with 78% of this flow corresponding to the sum of three reservoirs: Carnaubal, Barra Velha and the Barragem do Batalhão. With Fronteiras, the total regularization flow of the RHSC will be 2,358.5 l/s, for a 90% guarantee. This was the only one to have a flow regulation capacity with 100% guarantee. As a result of the simulations, it was possible to verify the efficiency of the reservoirs through the water balance, relating the inflows with the values of the outflows in regularized, poured and evaporated plots, where two were extremely inefficient, four inefficient, four efficient and one extremely efficient. Regarding the impact on the flow regulation capacity in integrated systems, two of the reservoirs present losses in relation to the hypothesis of the existence of only the main reservoir, and two present gains in the flow regulation capacities when operated together.

Keywords: Regularized flows; artificial reservoirs; Warranty levels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	– Representação esquemática do funcionamento de um reservatório.	24
Figura 02	– Tela de abertura do software SIMRES	28
Figura 03	– Tela de entrada dos Dados Gerais do Reservatório	30
Figura 04	– Tela de entrada dos dados das Vazões Afluente	30
Figura 05	– Representação da relação entre vazão regularizada e horizonte de tempo	31
Figura 06	– Tela de entrada do módulo GERAR VAZÕES	32
Figura 07	– Tela de entrada do módulo FRAGMENTAR SÉRIE	32
Figura 08	– Tela de entrada do módulo SIMULAÇÃO	33
Figura 09	– Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús	35
Figura 10	– Bacia hidrográfica do reservatório São José III	38
Figura 11	– Bacia hidrográfica do reservatório Sucesso	40
Figura 12	– Bacia hidrográfica do reservatório Realejo	42
Figura 13	– Bacia hidrográfica do reservatório Barra Velha	44
Figura 14	– Bacia hidrográfica do reservatório Cupim	46
Figura 15	– Bacia hidrográfica do reservatório Jaburu II	48
Figura 16	– Bacia hidrográfica do reservatório Colina	50
Figura 17	– Bacia hidrográfica do reservatório Flor do Campo	52
Figura 18	– Bacia hidrográfica do reservatório Carnaubal	54
Figura 19	– Bacia hidrográfica da Barragem do Batalhão	56
Figura 20	– Bacia hidrográfica do reservatório Fronteiras	58
Figura 21	– Representação esquemática de uma bacia hidrográfica de um reservatório em estado natural e modificado	59
Figura 22	– Diagrama unifilar dos reservatórios simulados	60
Figura 23	– Relação Tubo de Piche e Tanque classe A	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Normas climatológicas da estação de Crateús	36
Gráfico 02 – Curva CAV do reservatório São José III	37
Gráfico 03 – Curva CAV do reservatório Sucesso	39
Gráfico 04 – Curva CAV do reservatório Realejo	41
Gráfico 05 – Curva CAV do reservatório Barra velha	43
Gráfico 06 – Curva CAV do reservatório Cupim	45
Gráfico 07 – Curva CAV do reservatório Jaburu II	47
Gráfico 08 – Curva CAV do reservatório Colina	49
Gráfico 09 – Curva CAV do reservatório Flor do Campo	51
Gráfico 10 – Curva CAV do reservatório Carnaubal	53
Gráfico 11 – Curva CAV da Barragem do Batalhão	55
Gráfico 12 – Curva CAV do reservatório Fronteiras	57
Gráfico 13 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório São José III	66
Gráfico 14 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Sucesso	68
Gráfico 15 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Realejo	70
Gráfico 16 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Barra Velha	72
Gráfico 17 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Cupim	74
Gráfico 18 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Jaburu II	76
Gráfico 19 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Colina	78
Gráfico 20 – Vazões médias mensais afluentes da bacia hidrográfica incremental do reservatório Flor do Campo	81
Gráfico 21 – Vazões médias mensais sangradas do reservatório Colina	81
Gráfico 22 – Vazões médias mensais afluentes da bacia natural do reservatório Flor do Campo	84

Gráfico 23 – Vazões médias mensais afluentes da bacia incremental do reservatório Carnaubal	87
Gráfico 24 – Vazões médias mensais sangradas do reservatório Flor do Campo	88
Gráfico 25 – Vazões médias mensais afluentes da bacia natural do reservatório Carnaubal	90
Gráfico 26 – Vazões médias mensais afluentes da bacia incremental da Barragem do Batalhão	93
Gráfico 27 – Vazões média mensais sangradas dos reservatórios à montante	94
Gráfico 28 – Vazões médias mensais afluentes da bacia natural da Barragem do Batalhão	96
Gráfico 29 – Vazões médias mensais afluentes da bacia incremental do reservatório Fronteiras	100
Gráfico 30 – Vazões médias mensais sangrados dos reservatórios à montante	100
Gráfico 31 – Vazões médias mensais afluentes da bacia natural do reservatório Fronteiras	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Normas climatológicas e cálculo da evaporação líquida	63
Tabela 02 – Resultado da simulação do reservatório São Jose III no SIMRES	67
Tabela 03 – Balanço hídrico do reservatório São Jose III	67
Tabela 04 – Resultado da simulação do reservatório Sucesso no SIMRES	69
Tabela 05 – Balanço hídrico do reservatório Sucesso	69
Tabela 06 – Resultado da simulação do reservatório Realejo no SIMRES	71
Tabela 07 – Balanço hídrico do reservatório Realejo	71
Tabela 08 – Resultado da simulação do reservatório Barra Velha no SIMRES	73
Tabela 09 – Balanço hídrico do reservatório Barra Velha	73
Tabela 10 – Resultado da simulação do reservatório Cupim no SIMRES	75
Tabela 11 – Balanço hídrico do reservatório Cupim	75
Tabela 12 – Resultado da simulação do reservatório Jaburu II no SIMRES	77
Tabela 13 – Balanço hídrico do reservatório Jaburu II	77
Tabela 14 – Resultado da simulação do reservatório Colina no SIMRES	79
Tabela 15 – Balanço hídrico do reservatório Colina	79
Tabela 16 – Parâmetros da série de vazão afluyente total do reservatório Flor do Campo modificado	82
Tabela 17 – Resultado da simulação do reservatório Flor do Campo modificado no SIMRES	82
Tabela 18 – Balanço hídrico do reservatório Flor do Campo modificado	82
Tabela 19 – Resultado da simulação do reservatório Flor do Campo natural no SIMRES	84
Tabela 20 – Balanço hídrico do reservatório Flor do Campo Natural	85
Tabela 21 – Comparação da regularização do reservatório Flor do Campo	86
Tabela 22 – Parâmetros da série de vazão afluyente total do reservatório Carnaubal modificado	88
Tabela 23 – Resultado da simulação do reservatório Carnaubal modificado no SIMRES	88

Tabela 24 – Balanço hídrico do reservatório Carnaubal modificado	89
Tabela 25 – Resultado da simulação do reservatório Carnaubal natural no SIMRES	91
Tabela 26 – Balanço hídrico do reservatório Carnaubal Natural	91
Tabela 27 – Comparação da regularização do reservatório Carnaubal	92
Tabela 28 – Parâmetros da série de vazão afluente total da Barragem do Batalhão modificado	94
Tabela 29 – Resultado da simulação da Barragem do Batalhão modificado no SIMRES	95
Tabela 30 – Balanço hídrico da Barragem do Batalhão modificado	95
Tabela 31 – Resultado da simulação da Barragem do Batalhão natural no SIMRES	97
Tabela 32 – Balanço hídrico da Barragem do Batalhão Natural	97
Tabela 33 – Comparação da regularização da Barragem do Batalhão	98
Tabela 34 – Parâmetros da série de vazão afluente total do reservatório Fronteiras modificado	101
Tabela 35 – Resultado da simulação do reservatório Fronteiras modificado no SIMRES	101
Tabela 36 – Balanço hídrico do reservatório Fronteiras modificado	102
Tabela 37 – Resultado da simulação do reservatório Fronteiras natural no SIMRES	103
Tabela 38 – Balanço hídrico do reservatório Fronteiras Natural	104
Tabela 39 – Comparação da regularização do reservatório Fronteiras	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
CAV	Curva Cota x Área x Volume
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CV	Coefficiente de Variação
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
f_k	Fator Adimensional de Capacidade
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IOCS	Inspetoria de Obras Contra as Secas
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégica Econômica do Ceará
PERH-CE	Plano Estadual de Recursos Hídricos - Ceará
RHSC	Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará
SUDENE	Superintendência de desenvolvimento do Nordeste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Contextualização	18
1.2	Problema e Justificativa	21
1.3	Objetivos	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
2.1	Reservatórios superficiais	24
2.2	Operação dos reservatórios.....	26
2.3	Software SIMRES.....	28
2.3.1	<i>Dados de Entradas</i>	28
2.3.2	<i>Geração de Série Sintética</i>	31
2.3.3	<i>Fragmentação da Série Sintética</i>	32
2.3.4	<i>Simulação</i>	33
3	REGIÃO DE ESTUDO.....	34
3.1	Localização e caracterização da região hidrológica	34
3.2	Características Climáticas	36
3.3	Características do Reservatórios	37
3.3.1	<i>Reservatório São José III</i>	37
3.3.2	<i>Reservatório Sucesso</i>	39
3.3.3	<i>Reservatório Realejo</i>	41
3.3.4	<i>Reservatório Barra Velha</i>	43
3.3.5	<i>Reservatório Cupim</i>	45
3.3.6	<i>Reservatório Jaburu II</i>	47
3.3.7	<i>Reservatório Colina</i>	49
3.3.8	<i>Reservatório Flor do Campo</i>	51
3.3.9	<i>Reservatório Carnaubal</i>	53
3.3.10	<i>Barragem do Batalhão</i>	55
3.3.11	<i>Reservatório Fronteiras</i>	57
4	METODOLOGIA	59
4.1	Grupos de reservatórios e método de simulação	59
4.2	Método de simulação no SIMRES.....	61
4.2.1	<i>Dados gerais dos reservatórios</i>	61

4.2.2	<i>Séries de Vazões</i>	63
4.2.3	<i>Geração de séries sintéticas</i>	64
4.2.4	<i>Fragmentar Serie</i>	64
4.2.5	<i>Soma de Vazão Afluente</i>	64
4.2.6	<i>Simulação dos Reservatórios</i>	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1	Simulações dos Reservatórios do Grupo I	66
5.1.1	<i>Reservatório São José III</i>	66
5.1.2	<i>Reservatório Sucesso</i>	68
5.1.3	<i>Reservatório Realejo</i>	70
5.1.4	<i>Reservatório Barra Velha</i>	72
5.1.5	<i>Reservatório Cupim</i>	74
5.1.6	<i>Reservatório Jaburu II</i>	76
5.1.7	<i>Reservatório Colina</i>	78
5.2	Simulações dos Reservatórios do Grupo II	80
5.2.1	<i>Reservatório Flor do Campo</i>	80
5.2.2	<i>Reservatório Carnaubal</i>	86
5.2.3	<i>Barragem do Batalhão</i>	92
5.2.4	<i>Reservatório Fronteiras</i>	99
6	CONCLUSÃO	106
	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O Estado do Ceará está geograficamente localizado em uma zona intertropical do planeta, entre os meridianos 37° e 41° W e paralelos 2° e 8° S. Essa região tem como principal característica a sazonalidade das chuvas, resultando na divisão do ano em duas estações bem distintas, uma estação chuvosa e outra estação seca. Além dessa sazonalidade as chuvas apresentam uma distribuição irregular no espaço, que podem provocar ondas de cheias e estiagem em diferentes locais da mesma região hidrográfica durante uma estação chuvosa (NOGUEIRA, 2011).

Segundo o Instituto de Pesquisa e Estratégica Econômica do Ceará – IPECE (2022) o clima predominante no Estado do Ceará é o tropical quente semiárido, compreendendo 68% da área total. Dos 184 municípios do Estado 150 deles estão inseridos no polígono que define a região semiárida brasileira. Dentro desse contexto, a precipitação média anual do Estado do Ceará é de 805 mm, normalmente com período úmido variando entre três e cinco meses e o período seco entre sete a nove meses (CEARÁ, 2018).

A zona intertropical apresenta outras características marcantes como a intensa incidência solar, o que provoca temperaturas elevadas durante todo ano e favorece a ocorrência de elevadas taxas de evaporação (LUCENA E STOSIC, 2013). Como consequência tem-se o aumento do déficit hídrico da região, principalmente na estação seca, pois a água evaporada é considerada como perda no balanço hídrico do solo.

Em termos geológicos, de acordo com IPECE (2022), o Estado do Ceará, possui cerca de 85% do seu território sobre um embasamento de rochas cristalinas, possuindo solos geralmente rasos e compactados, o que dificulta a infiltração das águas no solo gerando uma baixa capacidade de retenção. Desta forma, temos basicamente, o escoamento superficial de água no período chuvoso e a rápida evaporação da água superficial ou umidade na parte superior do solo no período seco (PERH-CE, 2005).

De forma geral, o semiárido brasileiro com suas características climáticas e morfológicas favorecem a formação de rios intermitentes e efêmeros, que possuem escoamento em períodos chuvosos, secando no período de estiagem. Tal característica pode ser explicada devida a baixa capacidade de retenção de água pelo solo e sua percolação, limitando as vazões subterrâneas a um curto período tempo, logo após a passagem das chuvas, não proporcionando,

portanto, condição favoráveis de alimentar um rio de forma contínua. Acrescenta-se ainda a ação da evaporação que provoca uma redução significativa da quantidade de água retida nos cursos d'água naturais ou artificiais (CEARÁ, 2005, MALVEIRA *et al*, 2012 e FILHO, 2007).

Diante do exposto, verifica-se que as fontes naturais de água superficiais formadas basicamente por cursos d'água são insuficientes para suprir as diversas demanda da região hidrográfica de forma contínua durante o ano. Consequentemente, para suprir tais necessidades ações governamentais foram necessárias como a criação de instituições para a construção de reservatórios e gerenciamento dos recursos hídricos.

A primeira instituição a nível nacional foi a Inspetoria de Obras Contra as Secas – IOCS, criada em 1909, hoje Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS criado em 1945. Em termos de regulamentação, em 1997 foi promulgada a Lei N° 9.433, a Lei das Água, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Outro marco nacional no gerenciamento dos recursos hídricos foi a criação da Agencia Nacional das Águas e Saneamento Básico – ANA, em 2000, sendo responsável por implementar e coordenar os recursos hídricos além de regular e promover o uso sustentável da água.

Na esfera estadual, em 1987 foi criada a Secretaria de Recursos Hídricos – SRH através da Lei N° 11.306, tendo a função de promover, coordenar, gerenciar e instrumentalizar estudos, pesquisas, programas, projetos, obras, produtos e serviços referentes a recursos hídricos. Ainda em 1987, por meio da Lei N° 11.380, foi criada a Superintendência de Obras Hidráulicas – SOHIDRA, que tem a finalidade de planejar, executar e acompanhar a fiscalização de obras e serviços de interferência hídrica. Ainda na referida Lei a antiga Fundação Cearense de Meteorologia e Chuvas Artificiais, criada em 1972, e atualmente Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME passa a ser vinculada com a SRH, tendo finalidade básica a realização de pesquisas científicas e tecnológicas, estudos e a prestação de serviços nas áreas de meteorologia e recursos hídricos. A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH foi criada em 1993, com a função de monitorar os reservatórios e poços, manutenção, operação de obras hídricas e organização de usuários.

Por muitas décadas a principal medida de convivência com a seca foi o estímulo à construção de reservatórios, tantos privados como públicos (ROCHA *et al*, 2012) O intuito dessa política era acumular as águas excedentes no período úmido e usá-lo nos períodos secos, minimizando assim, os impactos dos períodos de estiagem e diminuindo o déficit hídrico da região (FILHO, 2007). Como consequência foram construídos um grande número de

reservatórios para suprir a crescente demanda de água para abastecimento da população, além da diversificação dos usos dessas águas, devido ao aumento do número de indústrias, mecanização e ampliação das áreas irrigadas, entre outras, o que tornou a gestão dos recursos hídricos altamente complexa.

Os reservatórios podem ser classificados como interanuais e intraanuais. Os reservatórios intraanuais, geralmente de pequeno porte, secam antes do início do ciclo das chuvas do ano posterior, seus usos predominantes são para a detenção animal, pequena irrigação e abastecimento da população rural. Já os reservatórios interanuais, normalmente de médio a grande porte, possuem a capacidade transportar a água temporalmente de um ano para outro ou por mais de um ano, sendo, portanto, considerados estratégicos devido a maior garantia no fornecimento de água para os mais diversos usos como: abastecimento urbano, grandes perímetros irrigados, piscicultura em larga escala, dessedentação animal, agricultura de vazante, entre outras.

Com resultados dessas diversas ações governamentais ao longo dos anos, o Estado do Ceará possui atualmente uma densa rede de reservatórios das mais diferentes dimensões. Naturalmente, o comportamento hídrico destes reservatórios é diferente de acordo com suas características, necessitando assim de um planejamento diferenciado em termos individuais e para um conjunto de reservatórios. Comumente os pequenos reservatórios barram rios menores, localizados dentro da bacia de contribuição de reservatórios de médio e grande porte que barram os rios maiores. Essa dinâmica do fluxo da água em reservatórios interligados pela hidrografia cria a necessidade de analisar o comportamento destes de forma integrada, como um sistema hídrico, levando em consideração o efeito cascata da acumulação e a maior quantidade de espelhos d'água disponíveis para evaporação, notadamente quando essa região já sofre com a baixa oferta de água.

Na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), a área de aplicação desse estudo, a situação não é diferente. A RHSC está localizada a oeste do Estado do Ceará e abrange dez municípios que totaliza uma área de 10.821 km², correspondendo a rede de drenagem do rio Poti, localizado dentro dos limites do Estado do Ceará. Essa região hidrográfica possui 10 reservatórios, considerados estratégicos para gestão dos recursos hídricos, que apresentam uma capacidade de acumulação total de 436.051.397 m³. Desta forma, toda essa área está inserida no semiárido brasileiro, com todas as limitações que o semiárido carrega.

1.2 Problema e Justificativa

A COGERH monitora diariamente os volumes de água armazenados nos 10 reservatórios estratégicos da RHSC, os quais, em dezembro 2021, contavam com cerca de 22% da capacidade máxima de armazenamento, o que equivale a um volume de aproximadamente 97 hm³. Esse pequeno volume armazenado é resultado das baixas precipitações que a região hidrográfica vem recebendo durante os últimos anos. No monitoramento realizado nos últimos 12 anos, 8 deles apresentaram precipitações abaixo da média histórica de 622,6 mm/ano. Os anos de 2012 e 2017 registraram as menores precipitações, 200,9 mm e 376,2 mm, respectivamente. As maiores precipitações medidas no período indicado foram nos anos de 2011 e 2019 com valores de 754,1 mm e 927,8 mm, respectivamente (FUNCEME, 2021).

Além das baixas precipitações mencionadas, observou-se uma das secas mais severas que o Estado do Ceará já enfrentou, tendo 6 longos anos consecutivos de precipitações muito abaixo da média histórica, onde no ano de 2012 choveu 200,9 mm, 345,5 mm em 2013, 424,6 mm em 2014, 421,6 mm em 2015, 518,4 mm em 2016, e 376,2 mm no ano de 2017, (FUNCEME, 2021). Tal seca levou os reservatórios monitorados a exaustão de suas potencialidades, evidenciando a vulnerabilidade hídrica da região, nas quais diversas cidades sofreram com o colapso no abastecimento urbano.

Buscando evitar um novo colapso no abastecimento das cidades as vazões retiradas dos reservatórios se limitaram a abastecimento da população, paralisando a retirada de vazões para outros usos entre eles a perenização de trechos de rios feita através de liberação de água dos reservatórios e a paralisação da irrigação. Até o ano de 2012 a RHSC possuía aproximadamente 100 km de trechos de rios perenizados, reduzindo para 65 km no ano de 2013, e zerando a partir de 2014 (CEARÁ, 2020).

O Município de Independência, que hoje (dezembro de 2021) se encontra em situação de emergência por falta de água, possui a maior capacidade de acumulação da RHSC com 205,8 hm³, o que corresponde a 47% do total da região hidrográfica. Atualmente, o município sofre com o estresse hídrico já que seus três reservatórios estratégicos apresentam níveis de acumulação próximo a 3,8%, tendo o reservatório Barra Velha apenas 0,01% do seu volume máximo (COGERH, 2021).

Buscando a solução do problema hídrico da RHSC se encontra em construção o reservatório Lago de Fronteiras, o qual barra o rio Poti a 30 km da cidade de Crateús. A

barragem terá a capacidade de acumular 488,18 milhões de m³ de água, dobrando a capacidade de acumulação da Região Hidrográfica (DNOCS, 2013).

Devido ausência de rios perenes e a baixa disponibilidade hídrica subterrânea na região, a demanda é suprida basicamente pelos reservatórios superficiais. Devido ao caráter contínuo das principais demandas de água o conjunto de reservatórios da região necessita de disponibilidade contínua ou garantias de fornecimento adequadas para os diferentes usos (GHEYI *et al*, 2012).

Almeida (2016) explica que quando a variabilidade temporal do escoamento superficial é muito acentuada necessita-se fundamentalmente de reservatórios de grande porte para o aumento da disponibilidade hídrica em termos de volume armazenado e em garantia de fornecimento. A disponibilidade hídrica ou vazão regularizada pode ser definida como o volume que pode ser retirado do reservatório para um determinado nível de garantia, ou seja, qual o volume que pode ser retirado sem que o reservatório não atenda as demandas (falhas). Studart (2000) concluiu que para um determinado reservatório, com as mesmas características climáticas e hidrológicas, a vazão regularizada diminui com o aumento do nível de garantia, uma vez que a ocorrência de falhas é reduzida.

Levando em consideração a variabilidade temporal das chuvas e a alta taxa de evaporação na região, o entendimento do processo de armazenamento de águas é fundamental para se determinar qual o volume potencial disponível (FILHO, 2007). Ou seja, ter o conhecimento da vazão regularizada para os diferentes níveis de garantias é de suma importância para o gerenciamento ótimo das águas do conjunto de reservatórios em análise.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal determinar as vazões regularizadas, com diferentes níveis de garantia, dos reservatórios estratégicos da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), de modo a gerar subsídio para gestão destes recursos hídricos.

Os objetivos específicos são:

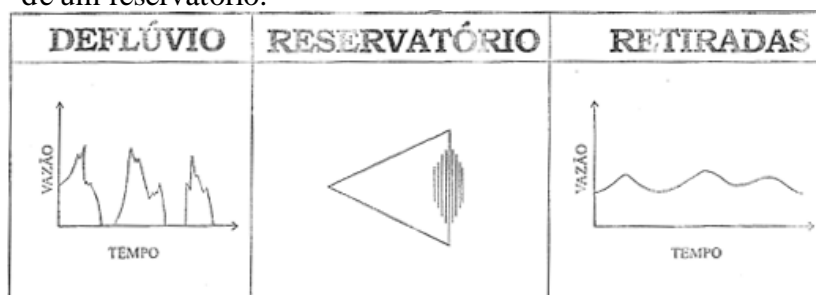
- Calcular as séries pseudo-históricas de vazões afluentes aos reservatórios a partir de modelo hidrológico chuva-vazão;
- Gerar séries sintéticas estendidas de vazões afluentes aos reservatórios através do método de Monte Carlo;
- Determinar as vazões regularizadas, para diferentes níveis de garantia, dos reservatórios considerando-os de forma isolada e como sistema hídrico integrado;
- Analisar a eficiência do reservatório com base no balanço hídrico;
- Analisar o impacto na capacidade de regularização de vazões dos sistemas integrados na presença de reservatórios de montante.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Reservatórios superficiais

Para Campos (2015), um reservatório superficial consiste em uma intervenção do homem na natureza com a função de adaptar os padrões das vazões naturais dos rios aos padrões demandados pela sociedade. Ou seja, um reservatório tem a função de acumular as águas que se excedem no período chuvoso e possibilitar o seu uso nos períodos de estiagem. Na Figura 01 é possível observar o comportamento dos reservatórios em relação as vazões naturais.

Figura 01- Representação esquemática do funcionamento de um reservatório.



Fonte: Campos (2015).

Os reservatórios artificiais surgem da necessidade de desfrutar dos benefícios dos diversos usos dos recursos hídricos para a sociedade. Carvalho (1983) cita que a necessidade de água para sobrevivência do homem vem desde os primórdios, sempre buscando estabelecer-se próximos a fontes de água naturais ou realizando o seu armazenamento por meio de diques (barragens).

Por volta de 5.000 a.C. já se tinha indício da construção de barragem, como indica algumas pesquisas, com edificação de barragens no antigo Egito para a irrigação, barragens ao longo dos rios Tigres e Eufrates construídas por volta de 3.000 a.C. e barragens de alvenaria de pedra calcária no Norte da África e na Itália construídas pelos romanos (CARVALHO,1983).

O início das grandes obras de reservatórios no Brasil se dá a partir do fim do século XIX, segundo CBDB (2011).

O ano de 1877 foi o início da maior tragédia nacional devido a fenômeno natural: A Grande Seca no Nordeste com duração superior a três anos deixou cicatrizes que até hoje são nítidas. O estado do Ceará, uma das áreas mais atingidas, na época com 1,5 milhão de habitantes, perdeu mais de um terço da sua população de maneira trágica, [...]. Em 1880, logo após a Grande Seca, o Imperador D. Pedro II que esteve na área

atingida, nomeou uma comissão para recomendar uma solução para o problema das secas no Nordeste. As principais recomendações foram a construção de estradas para que a população pudesse atingir o litoral e a construção de barragens para suprimento de água e irrigação [...].

O primeiro grande reservatório construído no Nordeste brasileiro foi o açude Cedro, no município de Quixadá, no Estado do Ceará sendo concluído no ano de 1906, após Cedro centenas de outros barragens foram construídas no Nordeste, sendo a última a barragem grande executada pelo DNOCS o açude Castanhão no município de Alto Santo também no Ceará (CBDB, 2011).

A construção de grandes reservatórios ameniza os problemas causados por secas mais severas, mas em si não resolve a falta de água no período de estiagem, principalmente para a população rural. A solução para esse problema levou 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).

Estima-se que no semiárido brasileiro exista aproximadamente 100.000 barramentos em cursos d'água, sendo que só o Estado do Ceará contenha cerca de 30.000 açudes (VIEIRA, 2002). Caracteriza-o assim, como um Estado com densa rede de reservatórios, entretanto, a grande maioria consiste de açudes particulares com pequena capacidade de acumulação (GHEYI, *et al*, 2012). Devido a ação da evaporação, tais açudes possuem uma vazão regularizada baixa, sendo importante principalmente para abastecimento da população rural.

Para um melhor entendimento, o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Ceará (PERH-CE) apresenta uma classificação dos reservatórios segundo sua capacidade de armazenamento, de acordo com Ceará (1994):

- Aguadas: capacidade menor que 0,30 hm³;
- Muitos pequenos: capacidade entre 0,30 hm³ e 1,00 hm³;
- Pequenos: capacidade entre 1,00 hm³ e 3,00 hm³;
- Médios: capacidade entre 3,00 hm³ e 50,00 hm³;
- Grandes: capacidade maior que 50,00 hm³.

De acordo com Campos *et al* (2000) a pequena e média açudagem tem sido um dos fatores responsáveis pela redução do volume afluente aos grandes reservatórios. No entanto, cabe ressaltar sua importância onde a construção de reservatórios tem ajudado a mitigar o

problema da seca hidrológica. A necessidade de reservatórios com diversas dimensões e sua distribuição espacial implica no aumento da complexidade de gestão de recursos hídricos, pois exige uma gestão integrada ou do sistema (LEITÃO E CAMPOS, 2017).

Filho (2007) aponta que estudos climáticos demonstram que os maiores problemas são a má distribuição das chuvas, aliadas ao mau aproveitamento do escoamento superficial. O que explica a importância de se projetar, construir e gerenciar um sistema de reservatórios de modo a obter a maior capacidade de armazenamento possível dessa água.

2.2 Operação dos reservatórios

O reservatório pode ser entendido como um sistema aberto, que há entrada e saída de volume. Os volumes que entram num reservatório são representados pelas vazões afluentes definidas pela hidrografia natural da sua área de contribuição ou bacia hidrográfica (STUDART E CAMPOS, 2001). Vale ressaltar que barramentos (reservatórios) localizados à montante de outro reservatório, ou seja, dentro da sua bacia hidrográfica, tende a influenciar nessa vazão afluente, pois há um impedimento do escoamento natural da água no barramento, diminuindo assim a área de contribuição efetiva para o reservatório em questão.

O Estado do Ceará 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 acumuladas nos reservatórios efluem apenas de três formas diferentes: 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).

Como as águas evaporadas possuem como destino a atmosfera, estas são consideradas como perdas para os reservatórios. Já as águas sagradas são as águas excedentes, onde o reservatório não suportaria acumular mais águas 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 (CAMPOS, 2015).

A água retirada para usos, também chamada de vazão regularizada, pode ser entendida como o volume que passa pela tomada d'água, ou algum outro método de controle de vazão, de forma controlada para o suprimento das demandas. Essa quantidade de água

retirada do reservatório sempre que houver disponibilidade, vazão regularizada, representa 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 (STUDARTE CAMPOS, 2001).

Segundo CEARÁ (2005).

A locação dos recursos hídricos deve estar em conformidade com o estabelecido na legislação que trata da outorga [...]. O Decreto nº 23.067/1994, que regulamenta o Art. 40 da Lei 11.996/1992, estabelece que o valor de referência será a descarga regularizada anual com garantia de 90%, quando se trata de fonte superficiais.

Assim o nível de garantia normalmente utilizado para a operação dos reservatórios é de 90%. No entanto, Almeida (2016) menciona que se deve trabalhar com mais níveis de garantias para situações mais ou menos restritivas de disponibilidade hídrica, como: 100%, 95%, 85% e 80%.

Malveira *et al* (2012) cita que, de modo geral, as disponibilidades de água superficiais são limitadas por fatores climáticos e morfológicos, onde os fatores climáticos estão ligados a vazão afluente, e os fatores morfológicos as características da bacia e dos reservatórios. Entre os diversos fatores destaca-se o coeficiente de variação (CV) da vazão afluente, definido estatisticamente como a relação entre o desvio padrão e a média anual da série de vazão afluente.

O coeficiente de variação é a medida da variabilidade interanual dos volumes afluentes dos reservatórios, que pode demonstrar a eficiência do reservatório em armazenar água, onde valores elevados implicam em reservatórios menos eficientes (CAMPOS *et al*, 1997), diminuindo assim as garantias anuais de abastecimentos. Para regiões com rios intermitentes os valores de CV anual variam entre 1,20 e 1,60 (VIEIRA, 2003).

O fator de capacidade (fk) é um outro importante dado para análise da eficiência do reservatório. Definido como a razão entre a capacidade máxima de armazenamento e média anual da série de vazão afluente. Um grande número de reservatórios projetados pelo DNOCS possui valores de fk em torno de 2,0, e com o tempo este passou a ser usado como um valor de referência. Dentro dessa lógica, admitiu-se 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

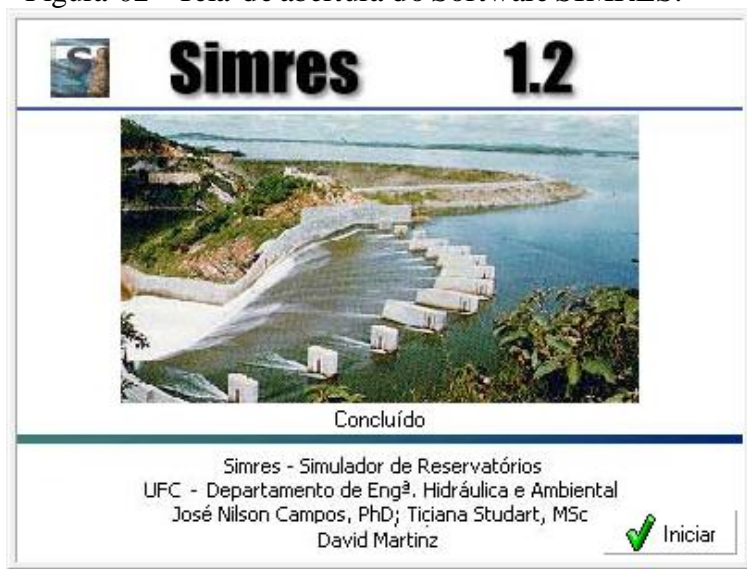
de 2,5 que a capacidade de reservação está próxima da exaustão tendendo a um superdimensionamento deste volume (CAMPOS *et al*, 1997).

2.3 Software SIMRES

O SIMRES é um modelo computacional desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, DEHA-UFC, descrito por Campos e Studart (2009) como uma ferramenta para experimentos com estocagem de águas em reservatórios artificiais superficiais.

O processo de simulação de reservatório através do software SIMRES é dividido nas seguintes etapas: Dados de Entrada, Geração de Série Sintética de Vazões Anuais, Fragmentação da Série Sintética de Vazões Sazonais, e por fim a simulação do Reservatório. A Figura 02 apresenta a tela de abertura do software SIMRES em sua versão 1.2.

Figura 02 - Tela de abertura do Software SIMRES.



Fonte: Própria autoria.

2.3.1 Dados de Entradas

Os dados de entrada para o software SIMRES são divididos em dois arquivos distintos, um referente aos dados gerais do reservatório e outro referente a séries de vazões afluentes ao reservatório.

O arquivo de Dados Gerais do Reservatório consiste nas informações referente as características físicas e operacionais para simulação do balanço hídrico no reservatório em estudo. Tais informações são referentes a:

- Título do trabalho, geralmente o nome do reservatório;
- Impressão dos volumes parciais, se quer imprimir ou não;
- Número de estações que divide o ano;
- Tipo de simulação: com a retirada para abastecimento pré-estabelecida e determinar percentual de falhas que ocorrerá ou a garantia pré-estabelecida (pode ser anual ou mensal) e determinar o volume que poderá ser retirado para aquele nível de garantia;
- Volume inicial (hm^3), volume que o reservatório se encontra;
- Reserva de segurança (hm^3), ou o volume morto do reservatório;
- Retirada na reserva de segurança (hm^3/ano);
- Volume retirado do volume morto;
- Número de retiradas/garantias a simular;
- Quantidade de retiradas/garantias que será simulado;
- Valores das retiradas/garantias a simular;
- Modulação sazonal das retiradas;
- Médias mensais do volume retiradas do reservatório;
- Número de capacidade a simular, pode-se simular diferentes capacidades do reservatório;
- Capacidades máximas de acumulação, valores dessas capacidades;
- Volume mínimo do reservatório (hm^3);
- Modulação sazonal das evaporações, médias mensais das evaporações ocorridas na região;
- Evaporação líquida anual da região (m).

O arquivo de Vazões Afluentes apresenta a série histórica de vazões sazonais afluentes ao reservatório, as quais possuem como unidade de medida o hectômetro cúbico pelo tempo. O software permite trabalhar com mais de uma série de vazões, logo nesse arquivo deve ser informada a quantidade de séries de vazões afluentes a serem simuladas, bem como o horizonte de tempo de cada uma e a quantidade de estações que corresponde a cada série. O uso mais comum é feito a partir de dados mensais, ou seja, 12 estações, nesse caso os dados de vazões devem ser obtidos em $\text{hm}^3/\text{mês}$.

As telas de entradas do software SIMRES são apresentadas nas Figuras 03 e 04 para os Dados Gerais do Reservatório e Vazões Afluentes, respectivamente.

Figura 03- Tela de entrada dos Dados Gerais do Reservatório.

Dados Gerais do Reservatório

Nome do arquivo: res. barra velha.dat

Título do Trabalho: Açude Barra Velha

Impressão dos volumes parciais: 1 - Imprimir

Número de estações que divide o ano: 12

Tipo de simulação: Com garantia fixa anual

Volume inicial (hm3): 49.78 Reserva de segurança (hm3): 0.00

Retirada na reserva de segurança (hm3/ano): 0.00

Número de garantias a simular: 1

Valores das garantias a simular (%): g[1] 80

Botões: Salvar, Fechar, Próximo >>

Fonte: Própria autoria.

Figura 04- Tela de entrada dos dados das Vazões Afluente.

Série de Vazões

Vazões Históricas Sazonais

Nome do arquivo: barra velha vaz. dat

Título do Trabalho: Barra Velha

Número de séries: 1 Horizonte de tempo: 107

Estações: 12

Série:

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
v[1]	0.45	4.28	9.62	19.68	11.42	2.95
v[2]	0.09	5.24	20.60	36.19	18.89	3.65
v[3]	9.75	3.61	3.58	7.92	1.87	3.23
v[4]	0.04	0.07	0.06	0.27	0.09	0.03

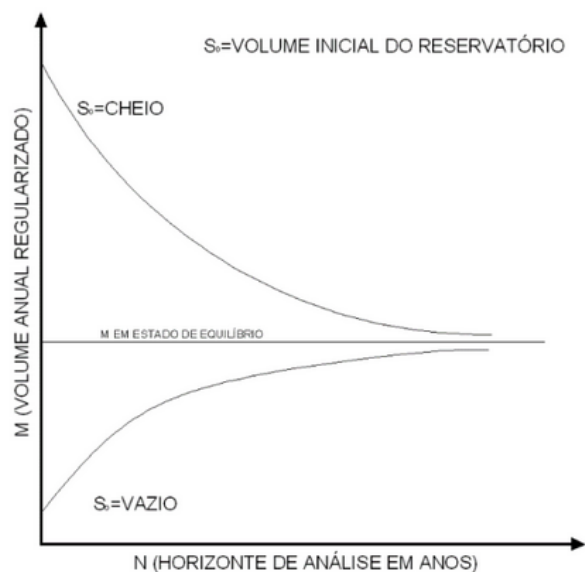
Botões: Salvar, Fechar

Fonte: Própria autoria.

2.3.2 Geração de Série Sintética

Campos (2015) afirma que séries longas de vazões, que é definido como horizonte de simulação, são usados para separar a fase transiente da fase de equilíbrio, bem como garantir uma vazão regularizada com variância nula. A representação esquemática desse processo pode ser vista na Figura 05.

Figura 05- Representação da relação entre vazão regularizada e horizonte de tempo.



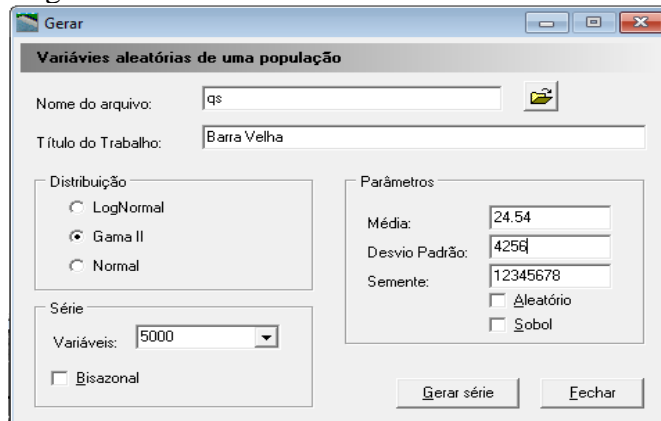
Fonte: Campos (2015).

Para se chegar a fase de equilíbrio, diversos estudos mencionam que o horizonte de simulação da série de vazões deve ser superior a 2.000 anos. Por essa razão o software SIMRES permite a geração séries sintéticas com um longo horizonte, geralmente de 5.000 anos.

Para gerar uma série sintética o SIMRES utiliza o método de Monte Carlo. Segundo Filho (2007) a simulação de Monte Carlo consiste em admitir que os deflúvios anuais seguem uma determinada lei de probabilidade, gerando séries sintéticas de vazões e executam a operação simulada do reservatório.

Para gerar uma série sintética anual no SIMRES é usado o módulo GERAR VAZÕES, que usa como referência uma das seguintes leis de probabilidade: LogNormal, Gama II ou Normal, é utiliza-se a média e o desvio padrão da série histórica de vazões afluente ao reservatório. Além desses dados é necessário determinar uma semente da série sintética, que pode ser um valor aleatório. Na Figura 06 é possível ver a tela de entrada para geração de série sintética de vazão.

Figura 06- Tela de entrada do módulo GERAR VAZÃO.



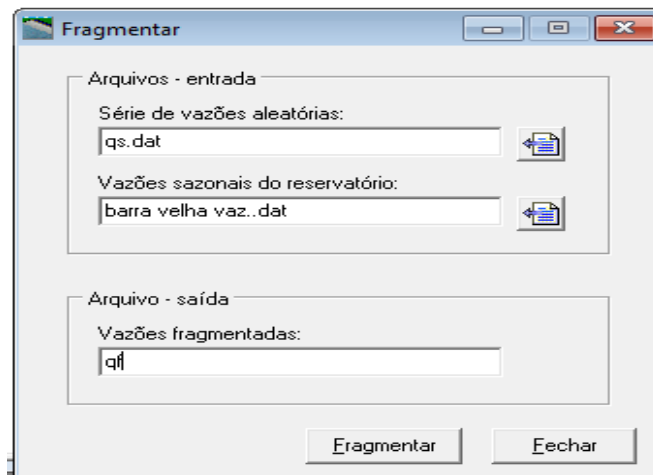
Fonte: Própria autoria.

2.3.3 Fragmentação da Série Sintética

A série sintética gerada é com intervalo de tempo anual, mas as vazões utilizadas na simulação do reservatório possuem um intervalo de tempo mensal, portanto faz-se necessário a transformação das vazões sintéticas anuais para vazões sintéticas mensais. Para isso utiliza-se o módulo FRAGMENTAR SÉRIE do software SIMRES, que utiliza o método dos fragmentos aplicados a rios intermitentes (ARAÚJO, 1991).

A fragmentação ocorre de acordo com o comportamento apresentado na mostra das vazões mensais características do regime hídrico afluente, que são as vazões sazonais do reservatório, que consiste na modulação da média das vazões. Na Figura 07 é possível ver a tela de entrada para fragmentação da série sintética.

Figura 07- Tela de entrada do módulo FRAGMENTAR SÉRIE.



Fonte: Própria autoria.

2.3.4 Simulação

No módulo SIMULAÇÃO do software SIMRES, e tendo com arquivos de entradas a série fragmentada e os dados gerais do reservatório, é possível simular o reservatório para o período desejado. Após a simulação, o software fornece 6 arquivos de dados, sendo eles: dois quadros de resumo da simulação (em formatos diferentes), o volume do reservatório em cada estação que divide o ano, o volume sangrado em cada estação que divide o ano, a evaporação ocorrida nas estações que divide o ano e a média de vazão regularizada.

É importante ressaltar que, em simulações de vários reservatórios, alguns devem ser simulados em série e outros em paralelos. Para a simulação em série, que considera a presença de outro reservatório à montante do reservatório em análise, devem ser somadas as vazões mensais afluentes ao reservatório sem interferência e os volumes mensais sangrados nos reservatórios à montante. Já as simulações paralelas serão utilizadas quando não há a presença de outro reservatório à montante. A tela de entrada do módulo SIMULAÇÃO está disponível na Figura 08.

Figura 08- Tela de entrada do módulo SIMULAÇÃO.

A imagem mostra a interface de usuário do módulo 'SIMULAÇÃO' do software 'SIMRES'. A janela principal, intitulada 'Simular', possui uma barra de título com ícones de minimizar, maximizar e fechar. O conteúdo é organizado em seções:

- Variáveis de simulação:** Possui um campo 'Séries estocásticas' com o valor '1' selecionado em uma lista suspensa, um campo 'Horizonte de tempo' com o valor '5000' selecionado em uma lista suspensa, e um campo 'Prefixo dos arquivos' com o valor 'BV'.
- Arquivos de entrada:** Possui dois campos de texto com ícones de seleção de arquivo à direita:
 - 'Dados gerais do reservatório:' com o valor 'res. barra velha.dat'.
 - 'Série de vazões sazonais:' com o valor 'qf.dat'.
- Arquivo de saída:** Possui um campo de texto com o valor 'q' e o rótulo 'Vazões regularizadas:'.

Na parte inferior direita da janela, há dois botões: 'Simular' e 'Fechar'.

Fonte: Própria autoria.

3 REGIÃO DE ESTUDO

3.1 Localização e caracterização da região hidrológica

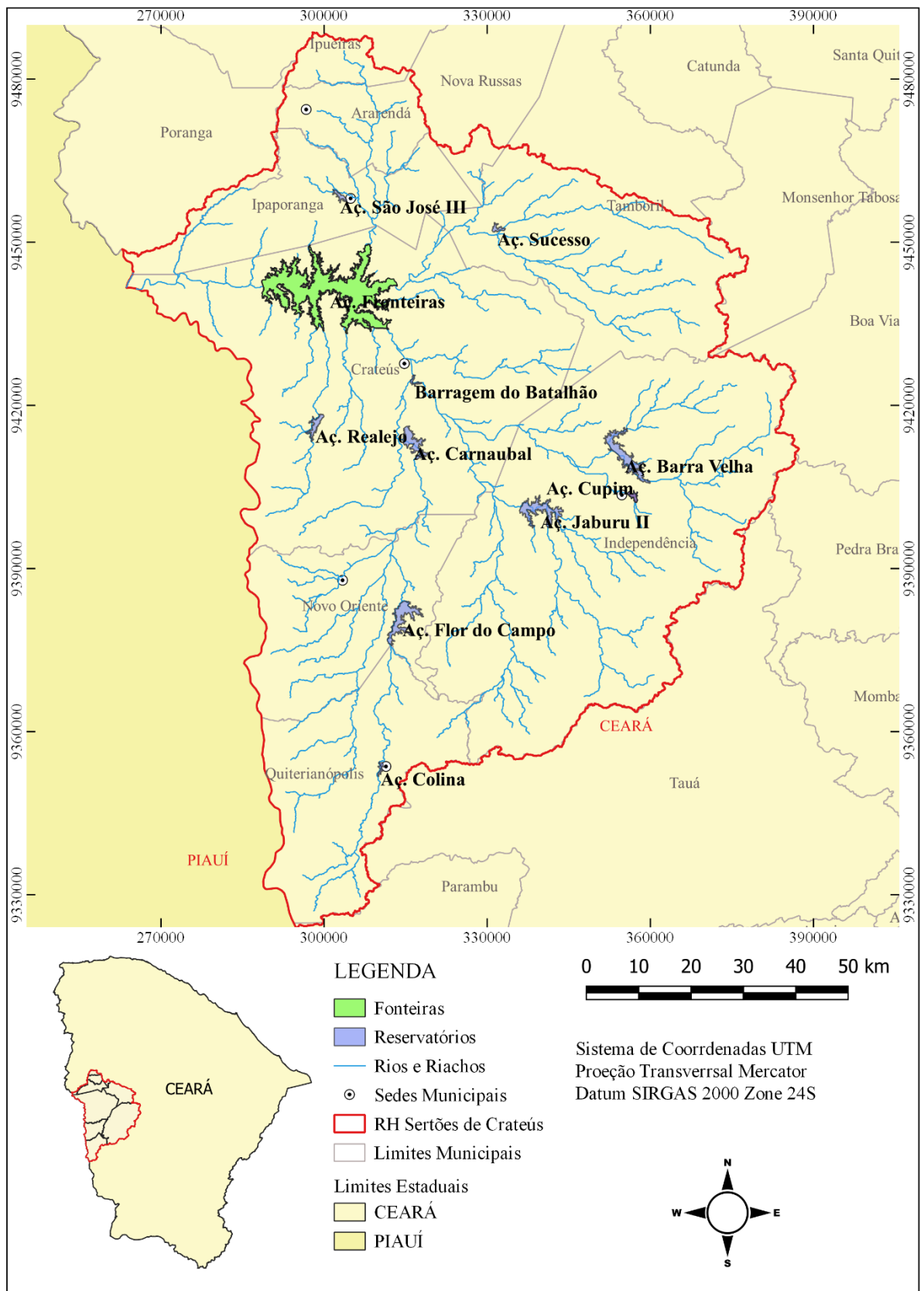
O presente trabalho é situado na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), que se delimita a norte com a Região Hidrográficas da Serra da Ibiapaba e a Região Hidrográfica do Acaraú, ao sul com a Região Hidrográfica do Alto Jaguaribe, ao oeste com o estado do Piauí e ao leste com a Região Hidrográfica do Banabuiú. A RHSC tem sua delimitação na rede de drenagem do rio Poti que está localizada dentro do Estado do Ceará, 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.

Em seu território, existem 10 reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH que são eles: São José III, Sucesso, Realejo, Barra Velha, Cupim, Jaburu II, Colina, Flor do Campo, Carnaubal, Barragem do Batalhão, e um em fase de construção que é o Fronteiras. A Figura 09 representa a RHSC.

O principal uso para água dos reservatórios da RHSC é para o abastecimento humano seja urbano ou rural, segundo o censo demográfico de 2010 do IBGE a população dos 10 municípios compõe a RHSC era de 242.907 habitantes e que a estimativa para o ano de 2021 é de 283.113, sendo o município de Crateús o mais populoso com 75.241 habitantes e Iaporanga o menos habitado com 11.597 habitantes.

A RHSC tem uma área total de 10.821 km² que se estende por 10 municípios, sendo que 06 desses municípios com 100% de seus territórios inseridos na RHSC, são eles: Ararendá, Crateús, Independência, Iaporanga, Novo Oriente e Quiterianópolis, 01 com aproximadamente 63% do seu território abrangendo a RHSC, que é o município de Tamboril e os outros 03 municípios tem menos de 10% de seus territórios dentro da RHSC, são eles: Ipueiras, Nova Russas e Poranga.

Figura 09- Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús.



Fonte: Própria autoria.

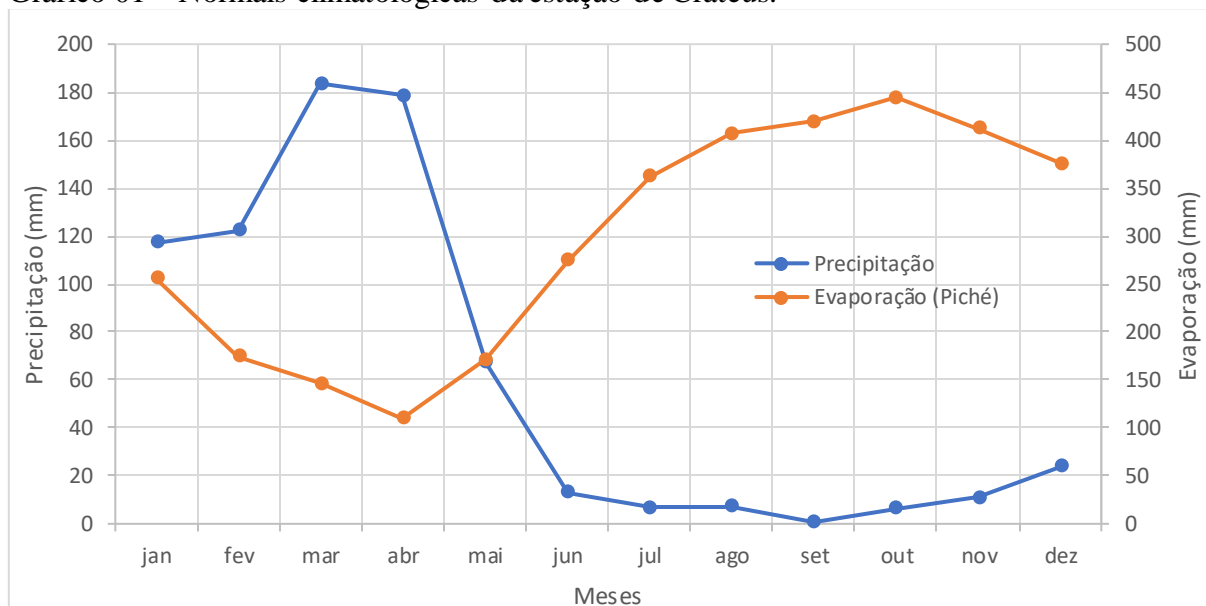
3.2 Características Climáticas

Foram feitas consultas no portal do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET para obter as Normais Climatológicas de Evaporação Total e Precipitação Acumulada no período de 1981 a 2010. A estação usada foi a Crateús, código 82583, pois é a única localizada na RHSC.

No Gráfico 01 são apresentados os valores mensais das Normais Climatológicas da Precipitação Acumulada e Evaporação Total. Os valores anuais de Precipitação Acumulada somam 738,40 mm e 3.552,00 mm para a Evaporação Total, apresentando um déficit hídrico anual de 2.813,6 mm.

Em termos sazonais, somente os quatro meses entre janeiro e abril apresentam valores de precipitação maiores que a evaporação, o que evidencia a divisão bem clara do ano em dois períodos o úmido e o seco. Essa característica influencia fortemente a forma de operar os reservatórios devido essa concentração temporal do período úmido em poucos meses.

Gráfico 01 – Normais climatológicas da estação de Crateús.



Fonte: INMET, 2021.

3.3 Características do Reservatórios

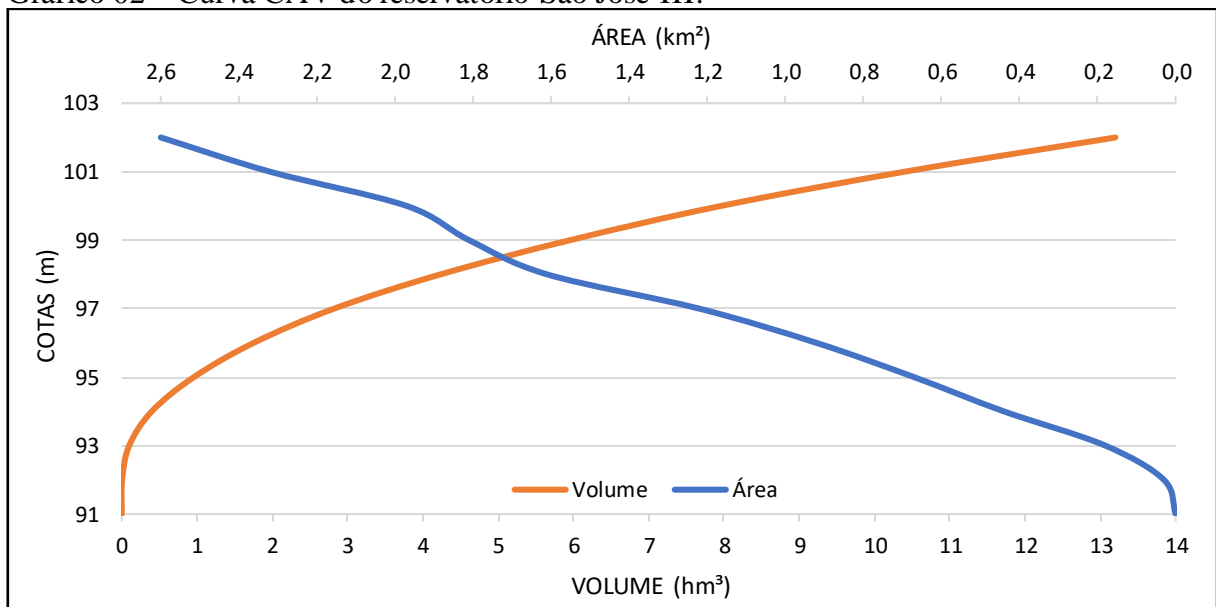
Os dados dos reservatórios estratégicos da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RSHC) foram consultados no Portal Hidrológico do Ceará, no Atlas de Recursos Hídricos do Ceará, no estudo realizado por Rosa (2019) e DNOCS (2013).

3.3.1 Reservatório São José III

O reservatório São José III é formado pelo barramento do riacho São José no município de Iraporanga-CE. Sua capacidade máxima de acumulação é de 7,96 hm³ e a bacia hidráulica de 1,97 km². De acordo com o PERH-CE (2005) sua classificação é de reservatório de médio porte. O Gráfico 02 representa sua curva cota x área x volume.

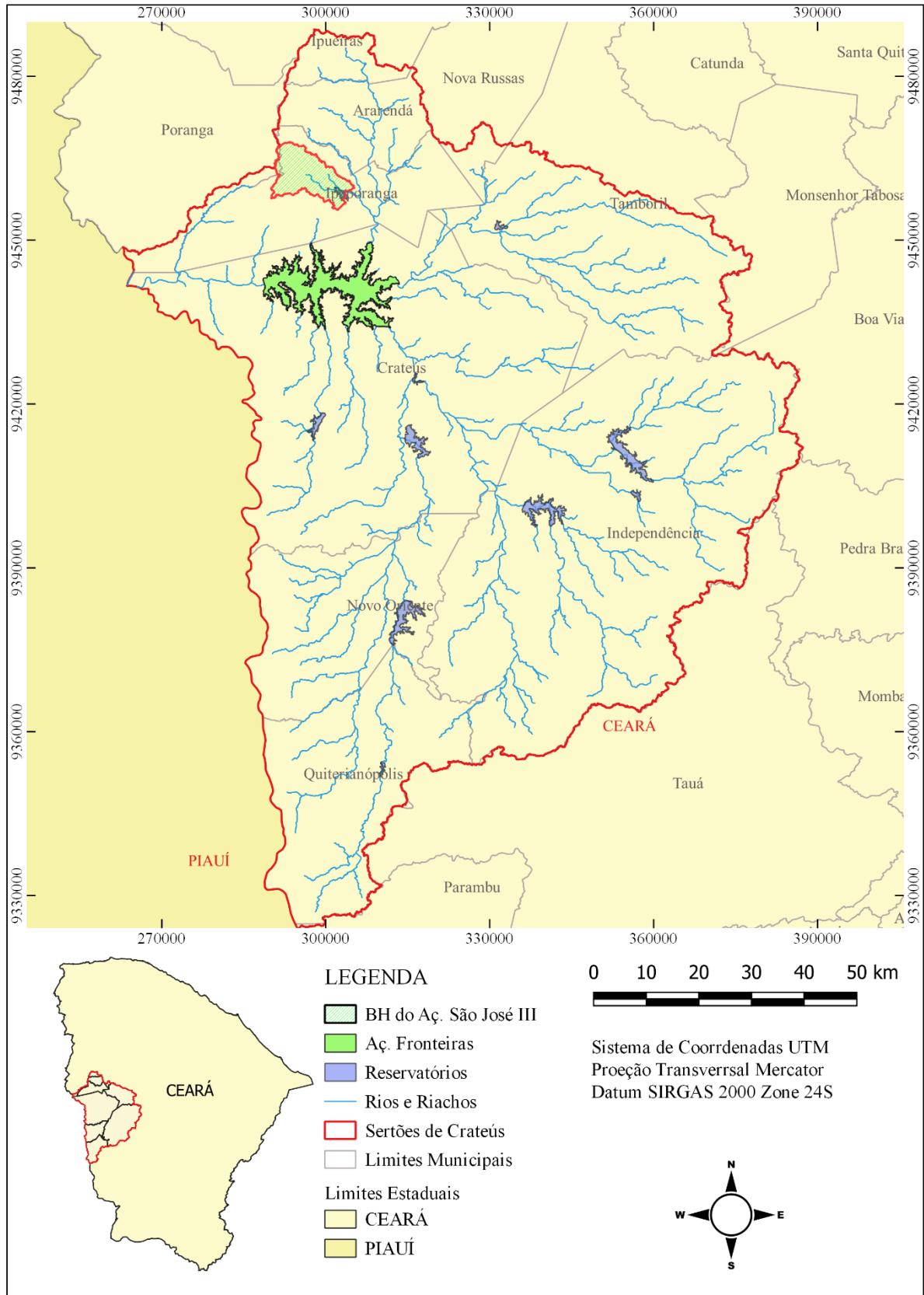
Na Figura 10 está representado a sua bacia hidrográfica, que corresponde a uma área de 97,9 km², atualmente a bacia hidrográfica do reservatório São José III não apresenta reservatórios com volumes significativos à montante.

Gráfico 02 – Curva CAV do reservatório São José III.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 10- Bacia hidrográfica do reservatório São José III.



Fonte: Própria autoria.

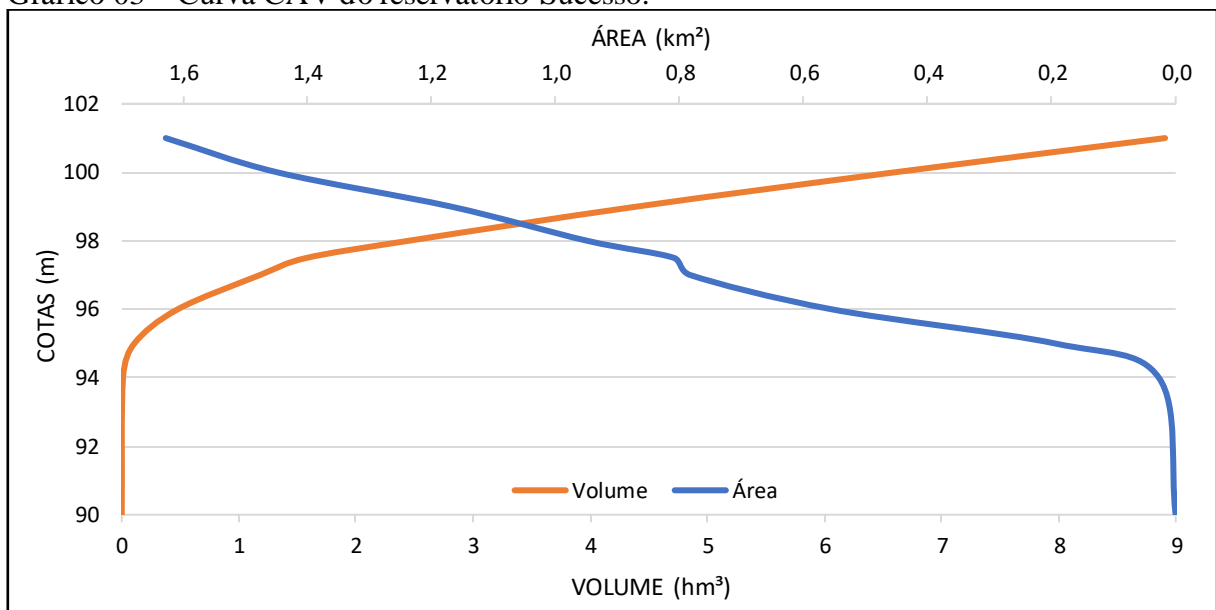
3.3.2 Reservatório Sucesso

Situado no município de Tamboril-CE, ao norte da RHSC, o reservatório Sucesso tem seu barramento no riacho Casimiro e foi concluído em 1988. Sua bacia hidrológica abrangem uma área de 273,00 km² como representado na Figura 11.

O açude tem capacidade de acumular 6,60 hm³ e possui uma bacia hidráulica de 0,44 km², sua curva cota x área x volume está disponível no Gráfico 03. O Açude Sucesso não possui reservatório com volumes significativos à montante. O reservatório mais importante a sua jusante é o Fronteiras que ainda está em fase de construção.

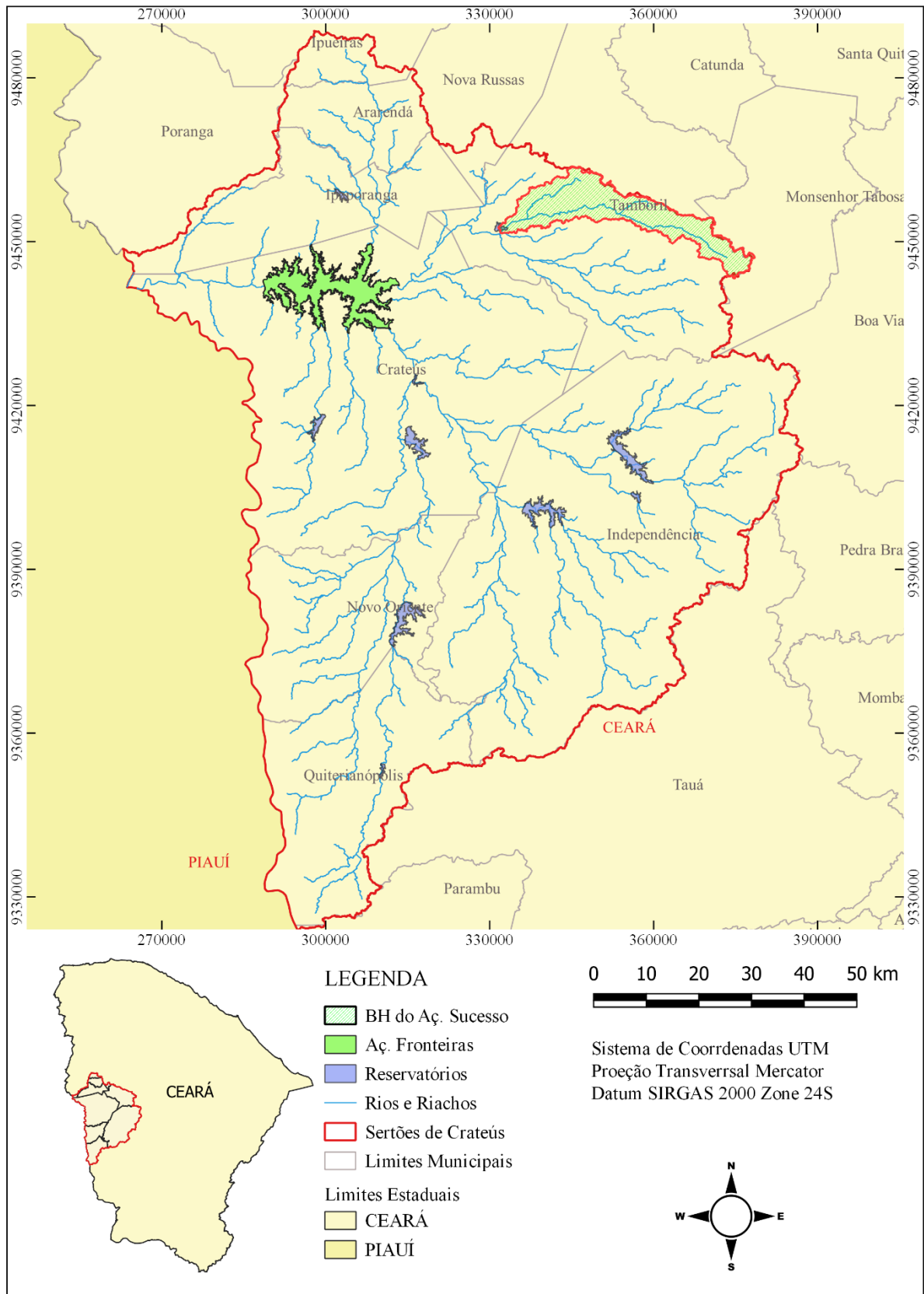
O açude Sucesso é utilizado para a dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, usos públicos concessionários, irrigação, pesca artesanal, agricultura de vazante e balneário.

Gráfico 03 – Curva CAV do reservatório Sucesso.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 19- Bacia hidrográfica do reservatório Sucesso.



Fonte: Própria autoria.

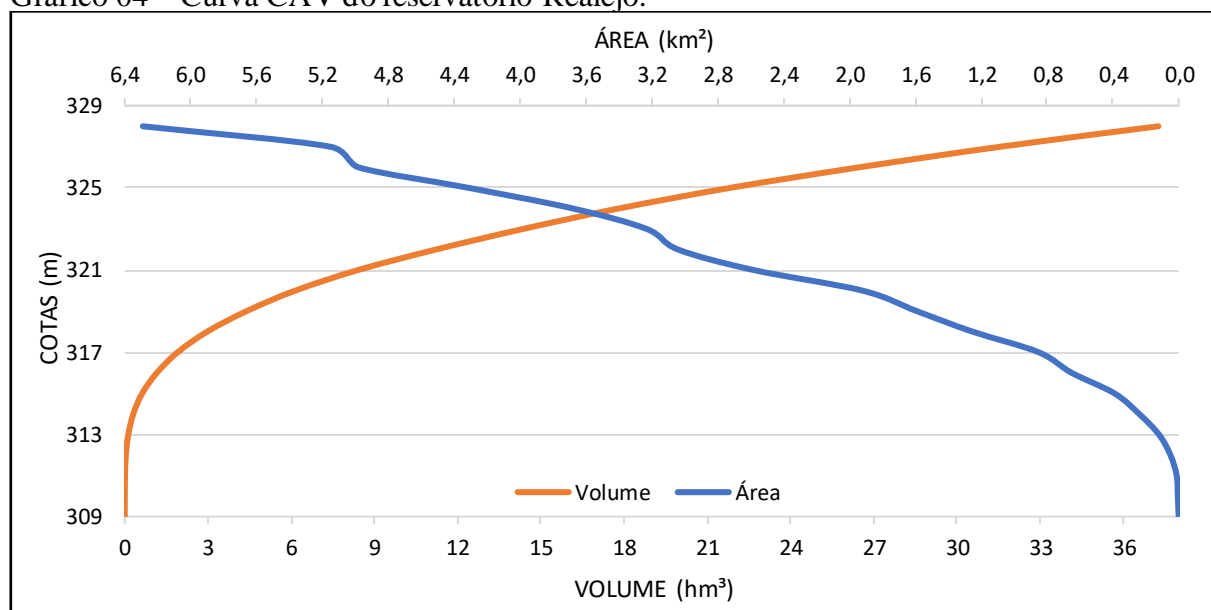
3.3.3 Reservatório Realejo

Construído em 1980, e localizado no município de Crateús-CE, o reservatório Realejo possui uma capacidade máxima de acumulação de 31,55 hm³ de água e uma bacia hidráulica de 5,15 km². O Gráfico 04 apresenta sua curva cota x área x volume.

Com o barramento do riacho Carrapateiras, a área da bacia hidrográfica (bacia de contribuição) é de 227,21 km², situada no próximo ao contorno da RHSC, logo não há reservatório de volume significativos à montante. O reservatório mais importante a sua jusante é o Fronteiras que ainda está em fase de construção. Na Figura 12 é possível ver a sua bacia hidrográfica.

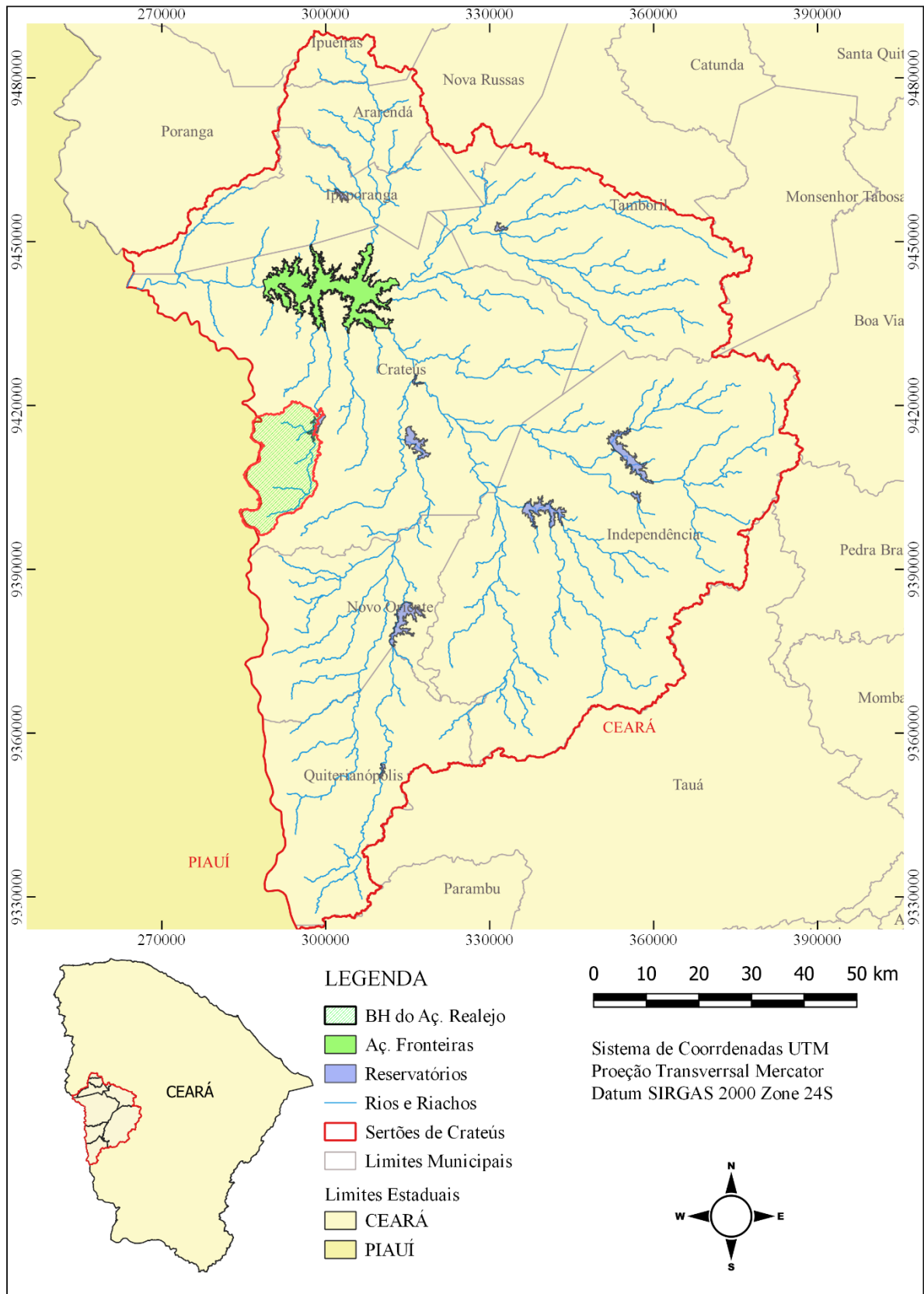
Os usos das águas do açude Realejo são a dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, usos públicos concessionários, irrigação, pesca artesanal, agricultura de vazante e balneário.

Gráfico 04 – Curva CAV do reservatório Realejo.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 12- Bacia hidrográfica do reservatório Realejo.



Fonte: Própria autoria.

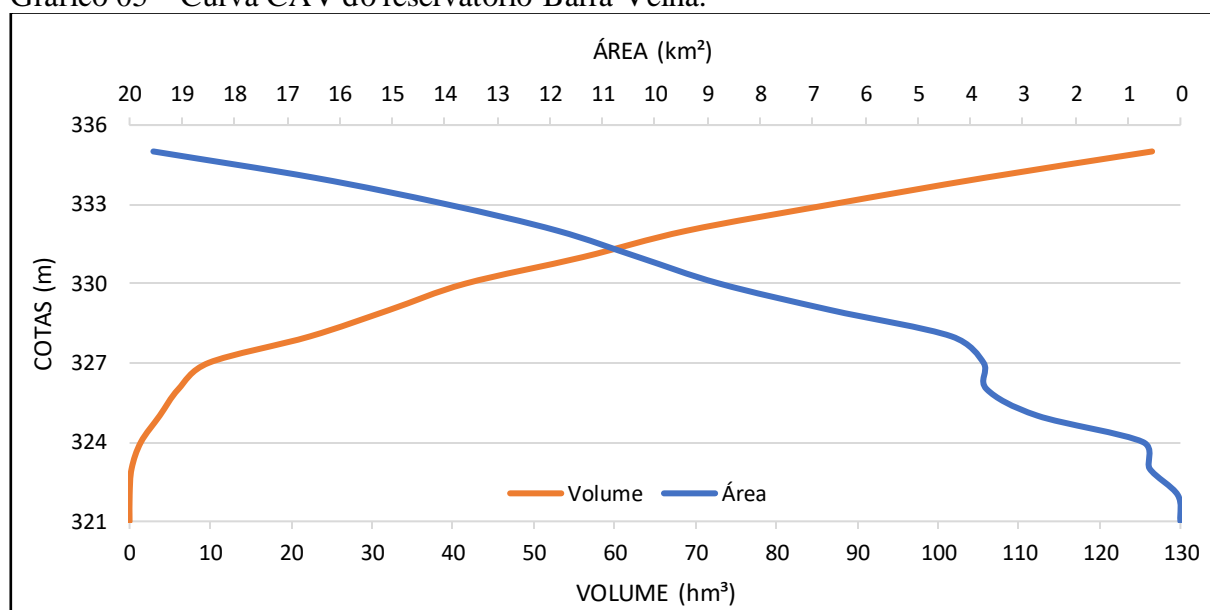
3.3.4 Reservatório Barra Velha

O reservatório Barra Velha é o terceiro maior reservatório da RHSC. Situado no município de Independência-CE, resultado do barramento do riacho Santa Cruz, possui um volume máximo de armazenamento de 99,56 hm³ e uma bacia hidráulica de 15,53 km². O Gráfico 05 apresenta a curva cota x área x volume do Barra Velha. Sua construção concluída em 1999, e abrangem uma área de drenagem de 997,57 km², que pode ser observada na Figura 13.

As águas do açude Barra Velha são utilizadas para a dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, usos públicos concessionários, irrigação, pesca artesanal e agricultura de vazante.

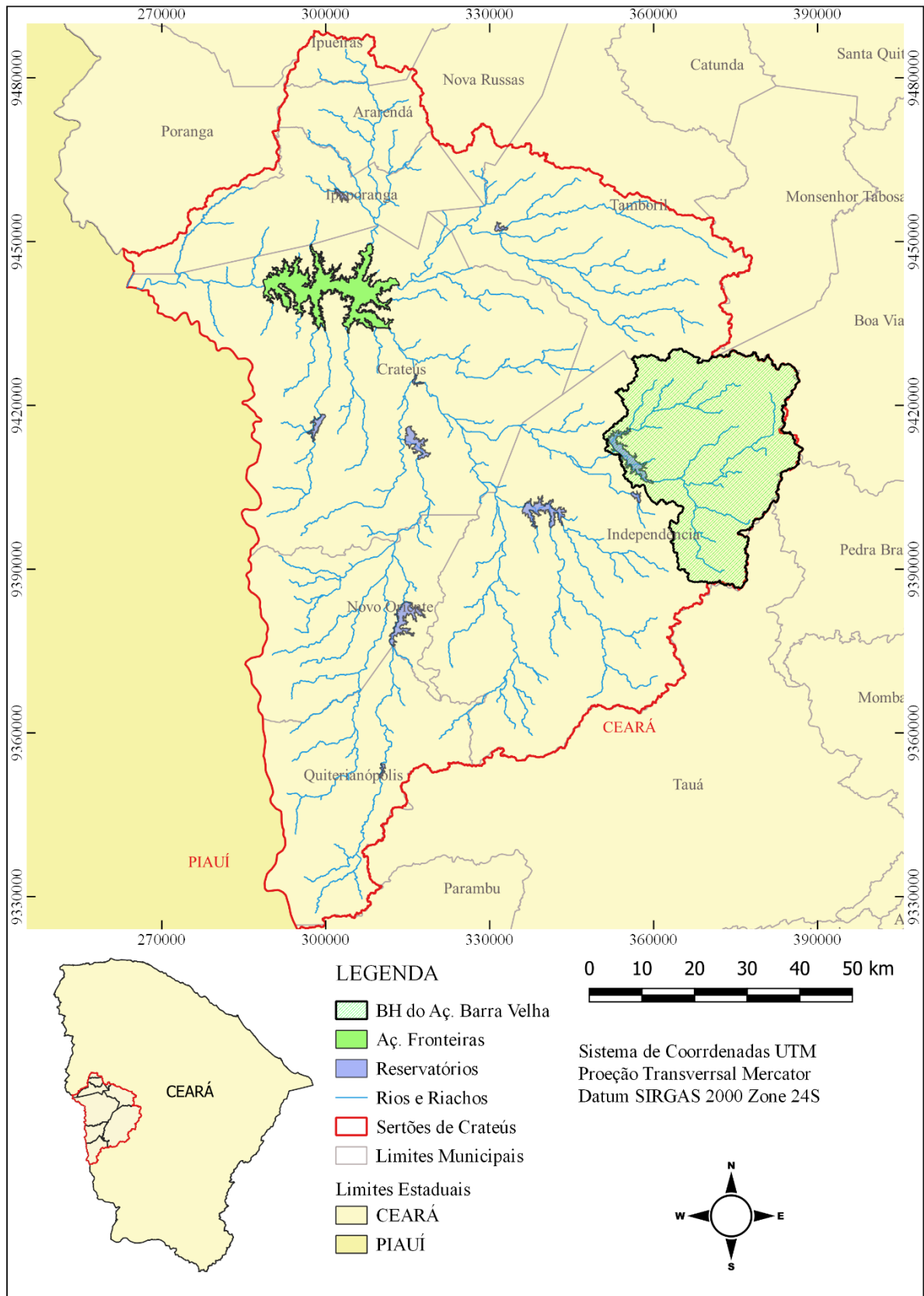
O reservatório Barra Velha não possui de outros reservatórios de volume significativos à montante e o reservatório mais importante a sua jusante é o Barragem do Batalhão.

Gráfico 05 – Curva CAV do reservatório Barra Velha.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 13- Bacia hidrográfica do reservatório Barra Velha



Fonte: Própria autoria.

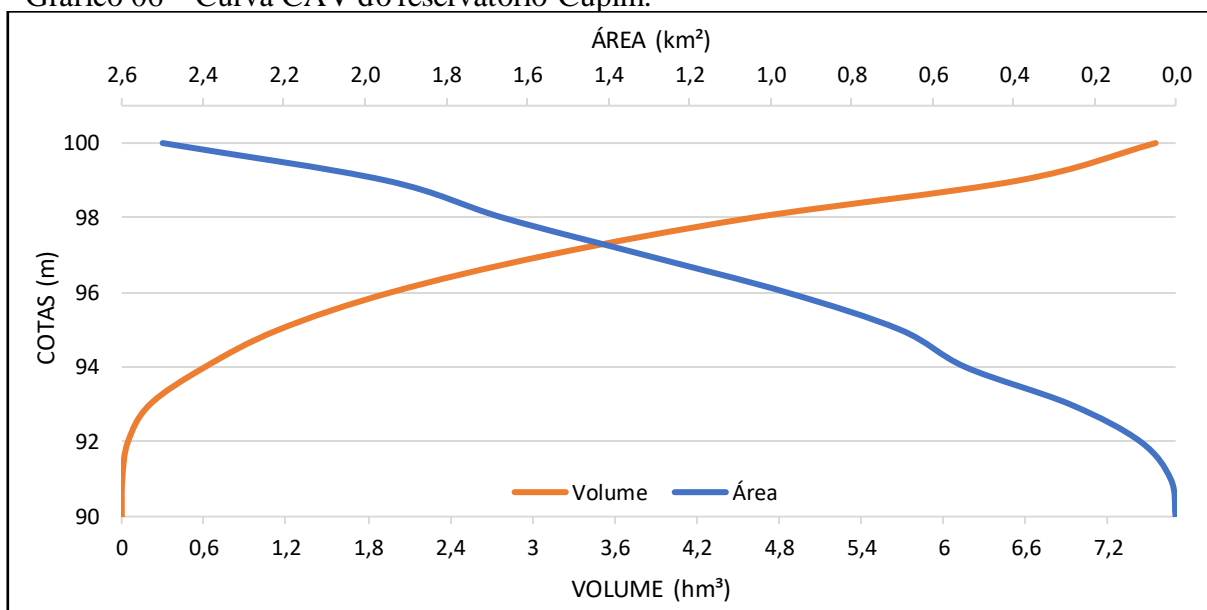
3.3.5 Reservatório Cupim

O reservatório Cupim é mais um reservatório localizado no município de Independência-CE com o barramento no rio Cupim e a finalização da construção foi em 1970. Ele é o reservatório estratégico com menor bacia hidrográfica da RHSC, totalizando 80,01 km², como é possível observar na Figura 14. O Cupim possui uma capacidade máxima de armazenamento de 4,60 hm³ e uma bacia hidráulica de 1,66 km². No Gráfico 06 é possível ver a sua curva cota x área x volume.

Com sua pequena área de drenagem o reservatório Cupim não possui reservatórios de volume significativos à montante e o reservatório mais importante a sua jusante é o Barragem do Batalhão.

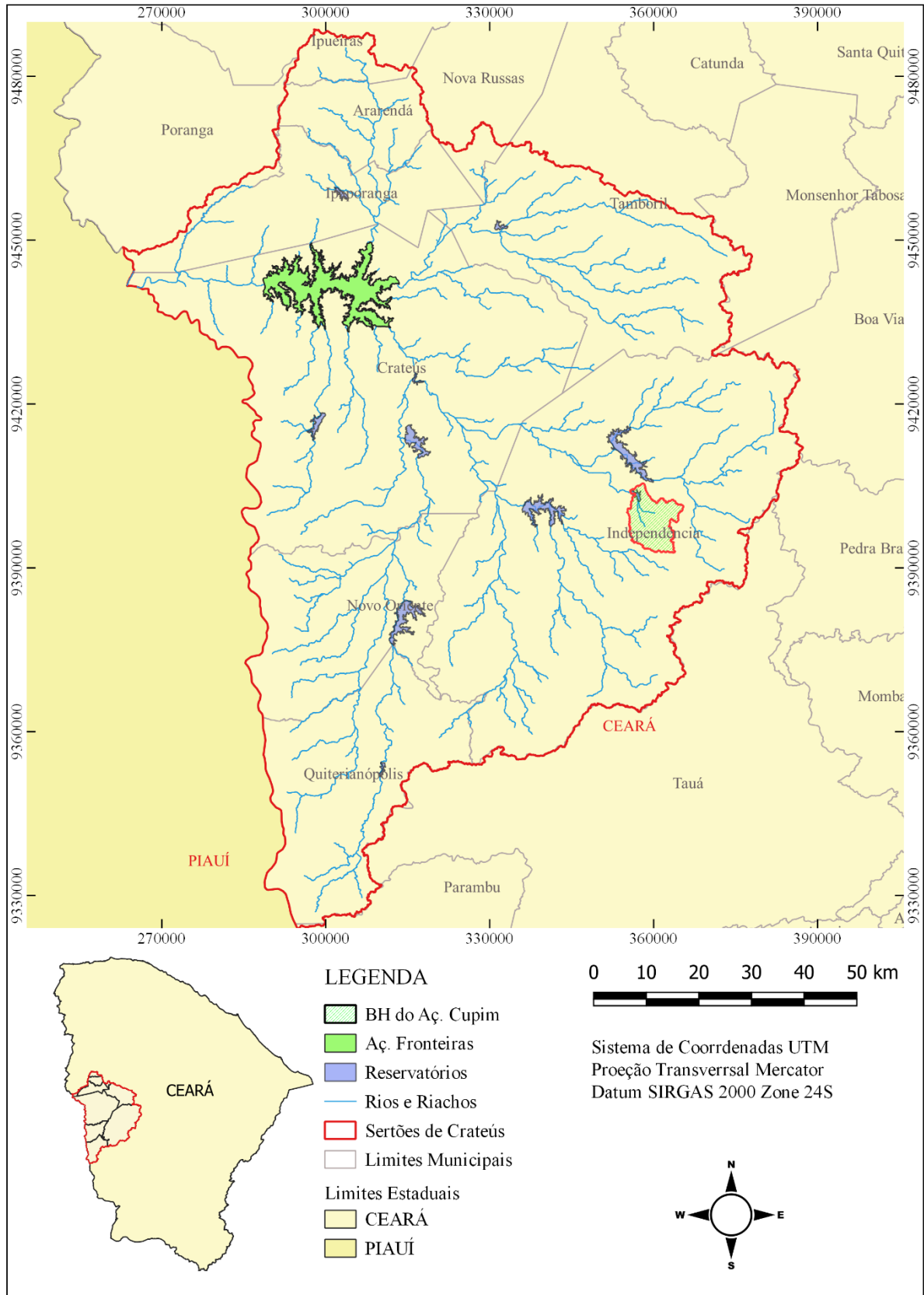
Seus usos segundo a COGERH são para a dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, irrigação, pesca artesanal, agricultura de vazante e balneário.

Gráfico 06 – Curva CAV do reservatório Cupim.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 14- Bacia hidrográfica do reservatório Cupim.



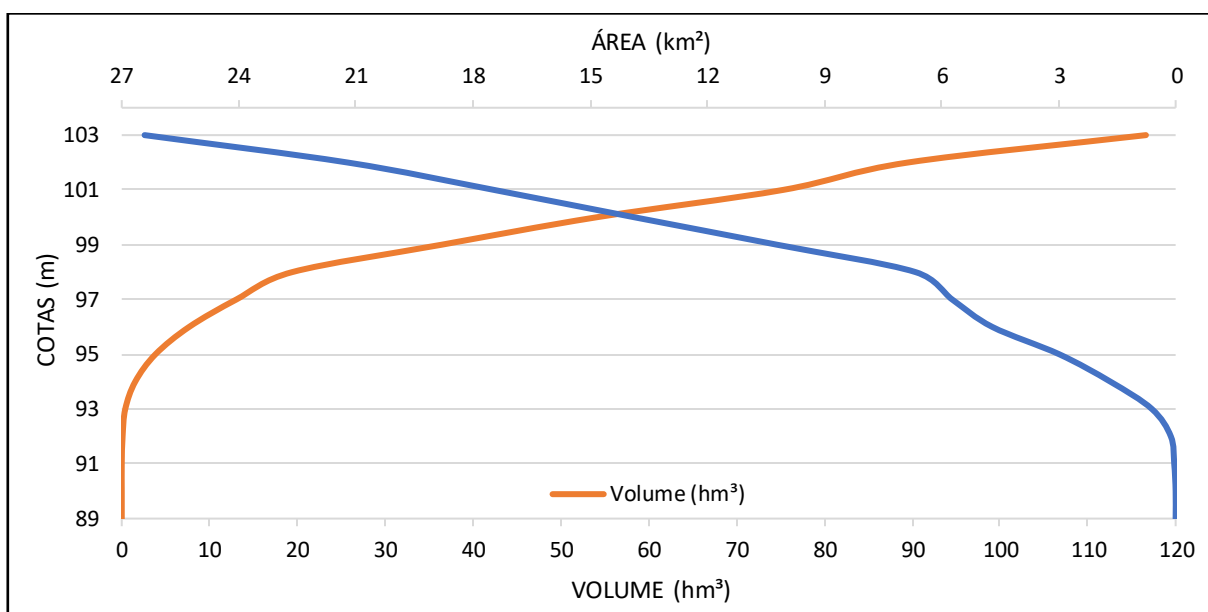
Fonte: Própria autoria.

3.3.6 Reservatório Jaburu II

Segundo maior reservatório do RHSC, com uma capacidade de armazenar 101,64 hm³ de água e uma bacia hidráulica de 21,64 km², é o terceiro reservatório no Município de Independência-CE, tendo seu barramento no leito do rio Jaburu e concluído em 1983. A curva cota x área x volume está disponível na Gráfico 07.

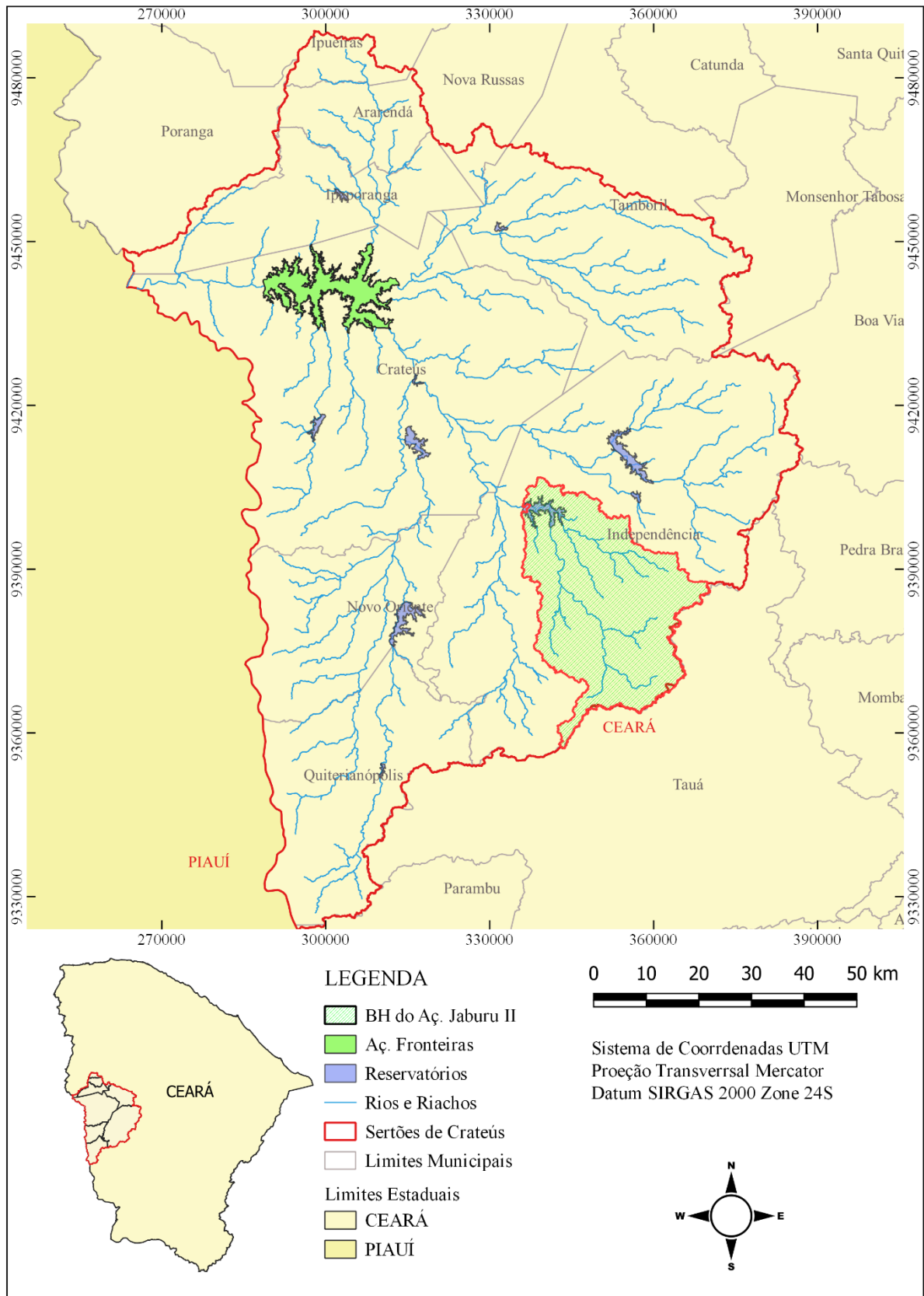
As águas acumuladas no açude Jaburu II, são utilizadas para a dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, usos públicos concessionários, irrigação, pesca artesanal e agricultura de vazante. Com uma bacia hidrológica de 911,11 km² representada na Figura 15. A jusante do reservatório Jaburu II está a Barragem do Batalhão, e não há reservatório estratégico a montante.

Gráfico 07 – Curva CAV do reservatório Jaburu II.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 15- Bacia hidrográfica do reservatório Jaburu II.



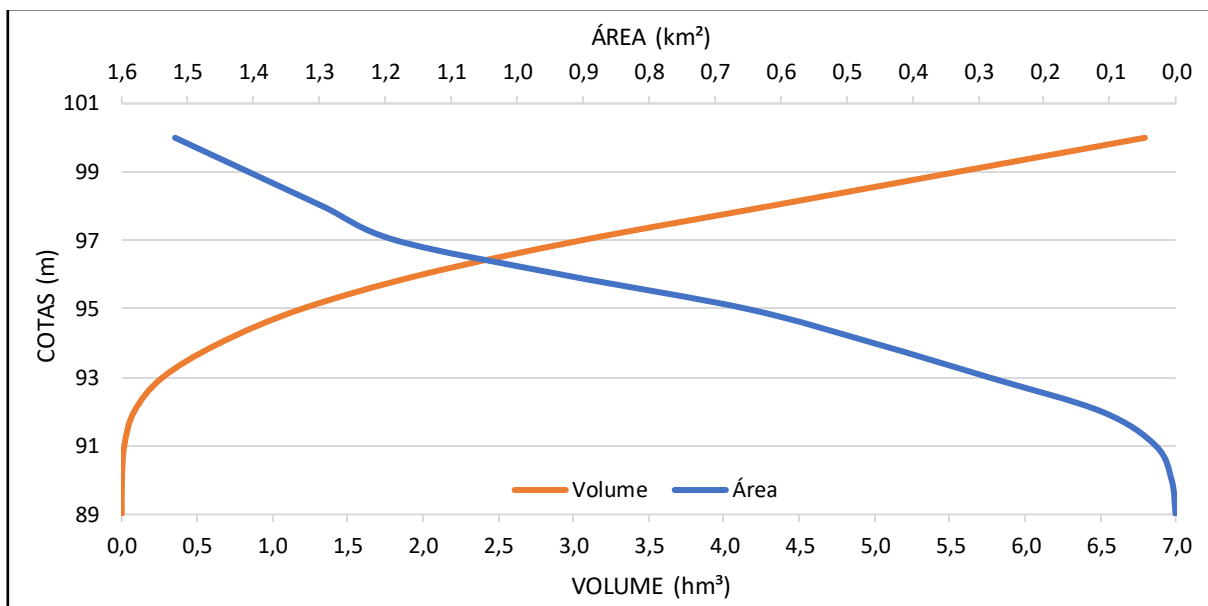
Fonte: Própria autoria.

3.3.7 Reservatório Colina

Situado no Município de Quiterianópolis-CE, o reservatório Colina é o primeiro de uma sequência de barramentos no rio Poti, logo não há reservatório estratégico à montante, e conta com o reservatório Flor do Campo a sua jusante. O Colina foi construído em 1988, possui um volume máximo de armazenamento de 4,3 hm³ e uma bacia hidráulica de 1,29 km². Sua curva cota x área x volume está representada no Gráfico 08.

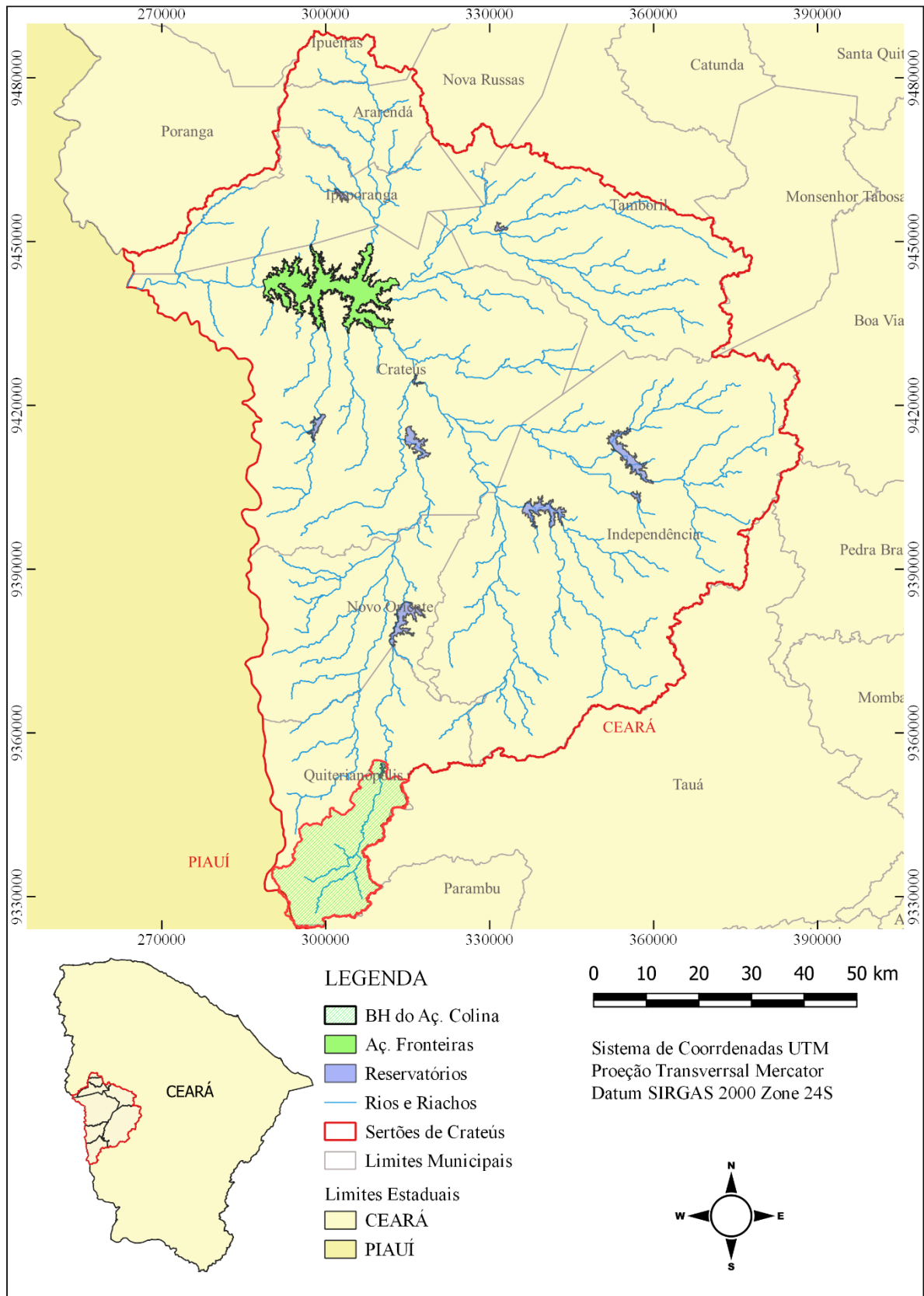
Sua área de drenagem corresponde a 360,07 km², e podem ser observados na Figura 13. Segundo a COGERH suas águas são usadas para a dessedentação animal, usos domésticos, recreação, usos públicos concessionários, pesca artesanal e agricultura de vazante.

Gráfico 08 – Curva CAV do reservatório Colina.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 16 - Bacia hidrográfica do reservatório Colina.



Fonte: Própria autoria.

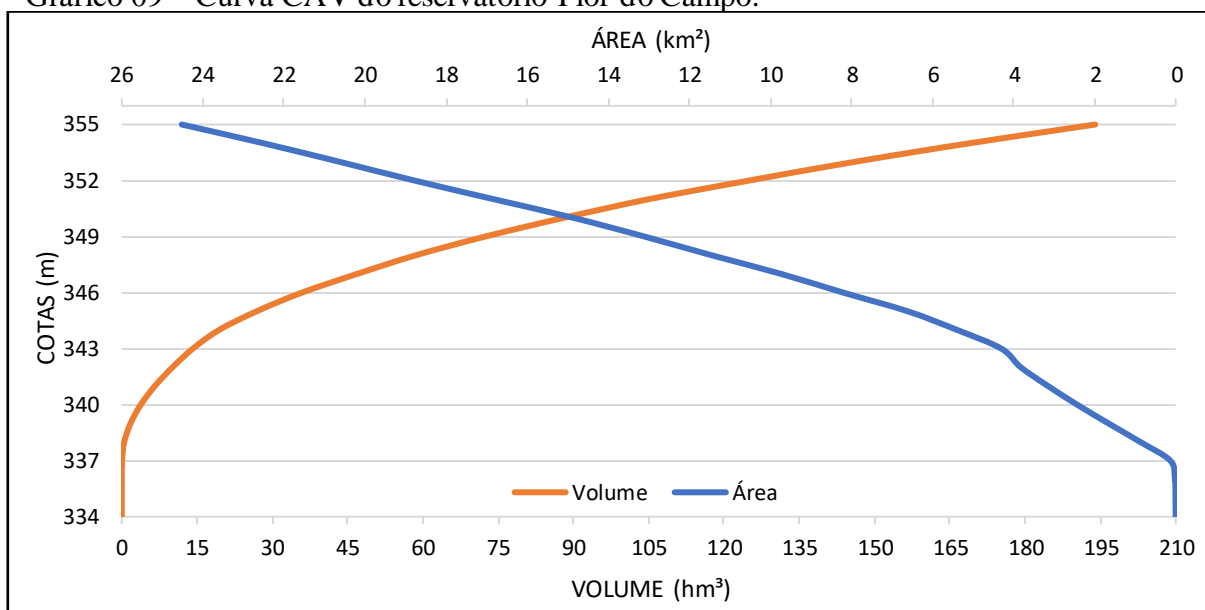
3.3.8 Reservatório Flor do Campo

Localizado no município de Novo Oriente-Ce, este é o maior reservatório construído da RHSC com um volume máximo de 105 hm³ e uma bacia hidráulica de 16,82 km². A curva cota x área x volume é demonstrada no Gráfico 09.

O Flor do Campo faz parte de um sistema hídrico onde à montante está localizado o reservatório Colina e à jusante tem o reservatório Carnaubal.

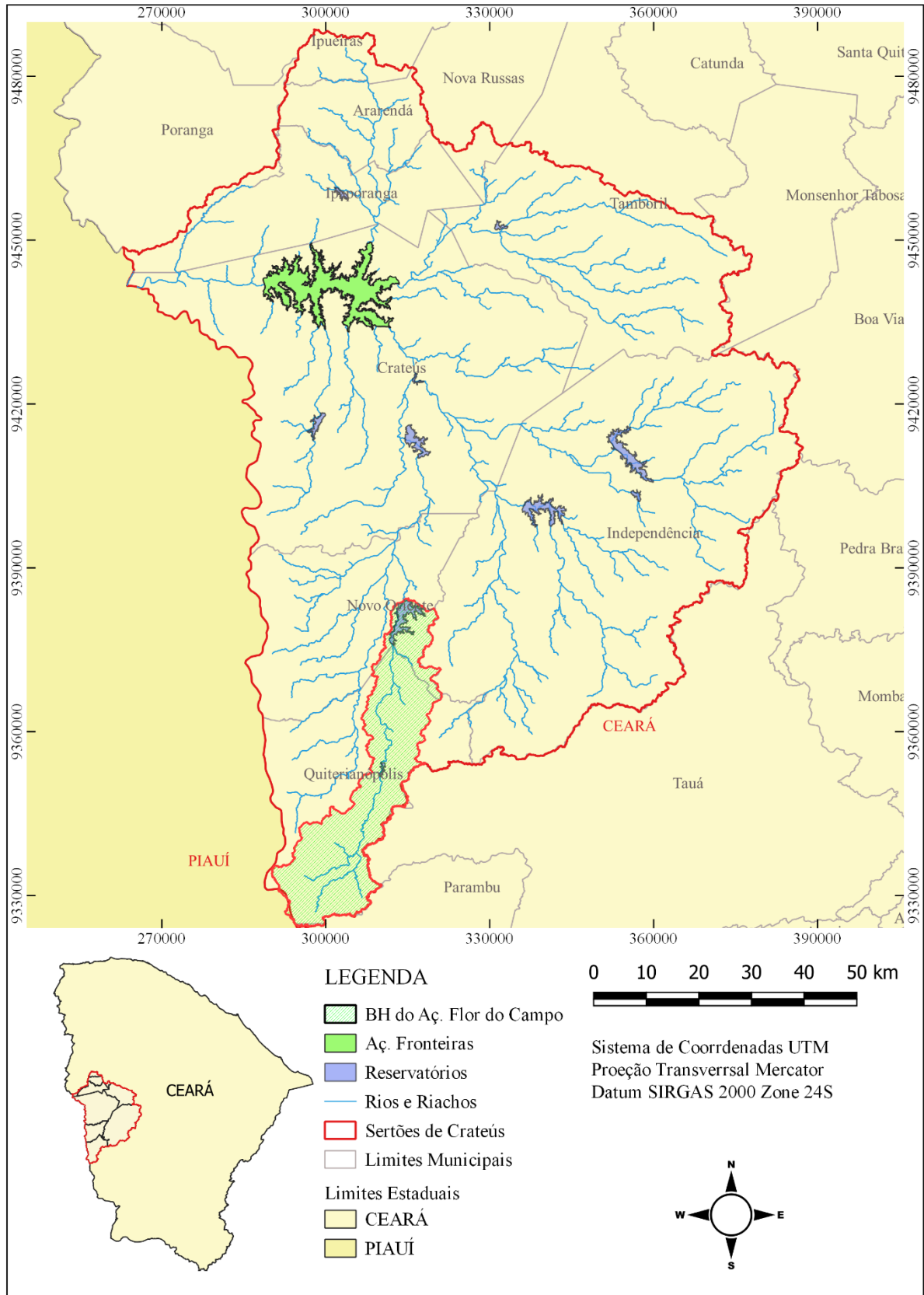
Concluído em 1999, o Flor do Campo possui uma bacia hidrográfica total com área de 653,68 km², como é possível ver na Figura 17. Suas águas são utilizadas para a dessedentação animal, usos domésticos, recreação, usos públicos concessionários, irrigação, pesca artesanal, balneário e agricultura de vazante.

Gráfico 09 – Curva CAV do reservatório Flor do Campo.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 17- Bacia hidrográfica do reservatório Flor do Campo.



Fonte: Própria autoria.

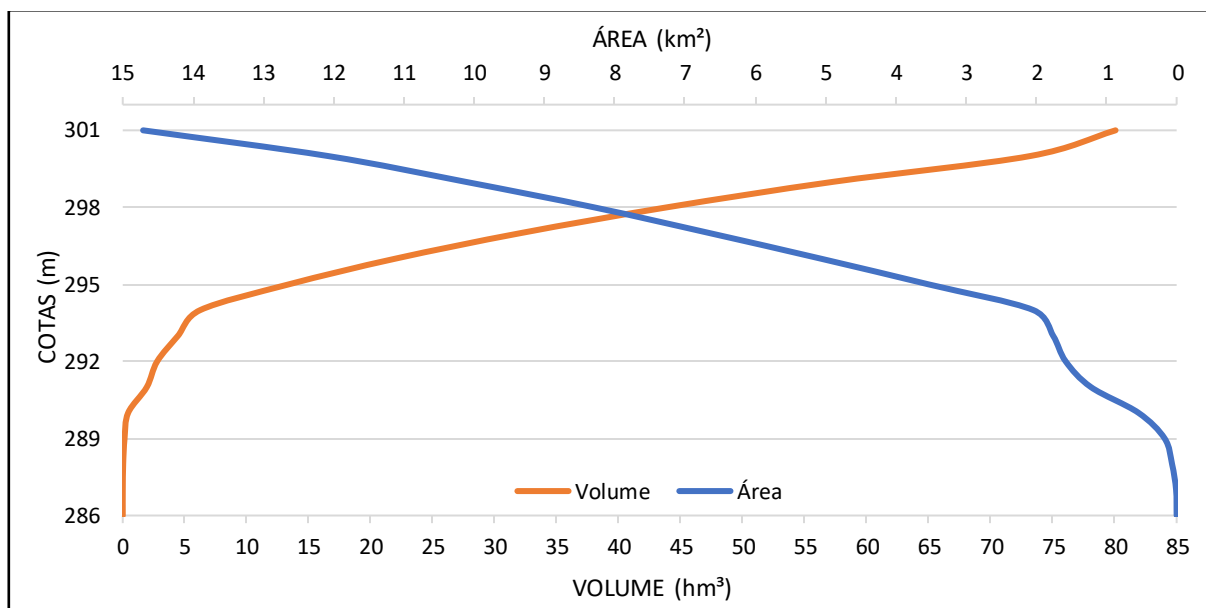
3.3.9 Reservatório Carnaubal

O reservatório Carnaubal é o quarto maior reservatório da RHSC e fica situado no município de Crateús-CE. Na sequência do sistema hídrico do rio Poti, à montante da Barragem Batalhão, ele é o terceiro tendo à montante o reservatório Flor do Campo. O Carnaubal possui um volume máximo de armazenamento de 72,3 hm³ e bacia hidráulica de 12,08 km². No Gráfico 10 é possível observar sua curva cota x área x volume.

Teve a sua construção concluída em 1990, e sua bacia hidrográfica total abrangem uma área de 2.059,81 km², como é visto na Figura 18. Ele se localiza à montante da Barragem Batalhão e juntos abastecem a área urbana de Crateús, cidade com a maior população da RHSC.

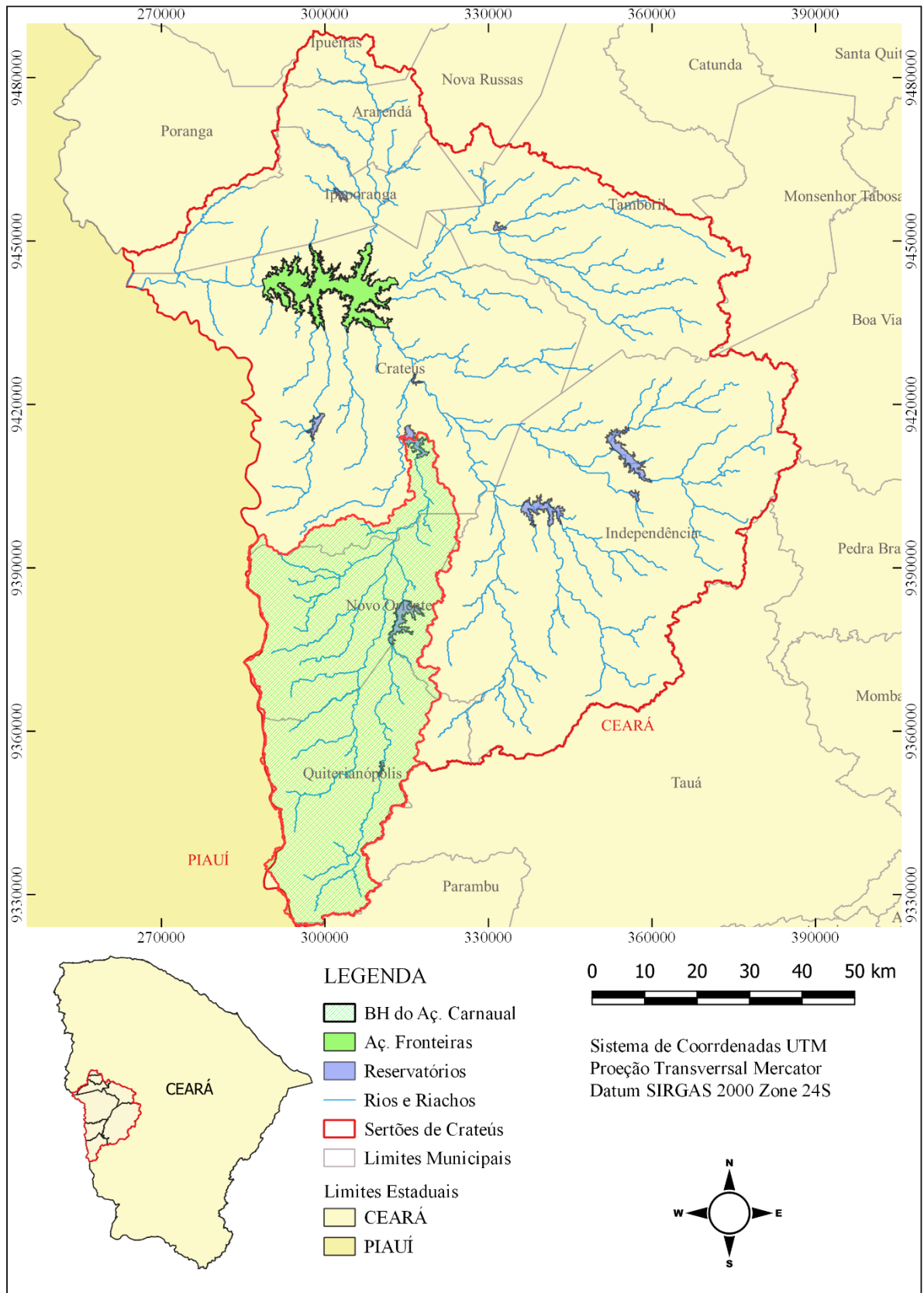
Segundo a COGERH, o reservatório Carnaubal é utilizado para oito usos diferentes de suas águas, que são, dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, usos públicos concessionários, irrigação, pesca artesanal, usos industrial e agricultura de vazante.

Gráfico 10 – Curva CAV do reservatório Carnaubal.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 18- Bacia hidrográfica do reservatório Carnaubal.



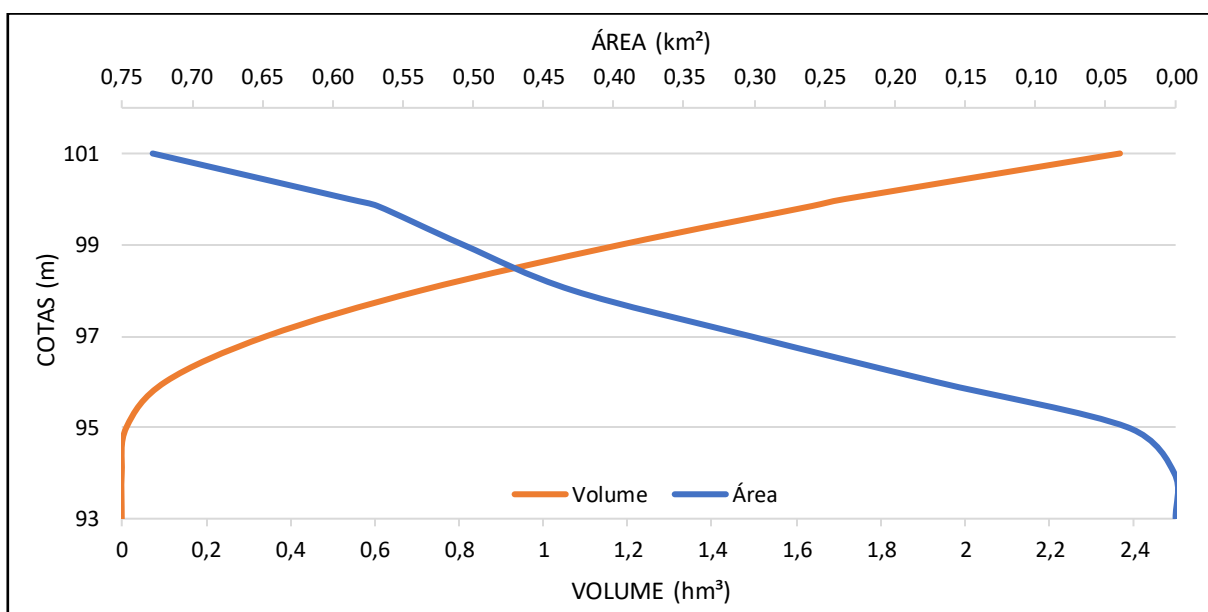
Fonte: Própria autoria.

3.3.10 Barragem do Batalhão

A Barragem do Batalhão pode ser considerada como uma barragem de nível, com intuito principal a elevação das águas provenientes do rio Poti e riacho do Meio, dois principais rios da região, de modo a facilitar a captação da água para o abastecimento da cidade Crateús. Isso fica mais evidente quando se observa que sua capacidade máxima de armazenamento que se limita a 1,64 hm³ e uma bacia hidráulica de 0,57 km², menor reservatório da RHSC, apesar de sua área de concentração ser menor somente que a área do reservatório Fronteiras. O Gráfico 11 representa a cota x área x volume da Barragem do Batalhão.

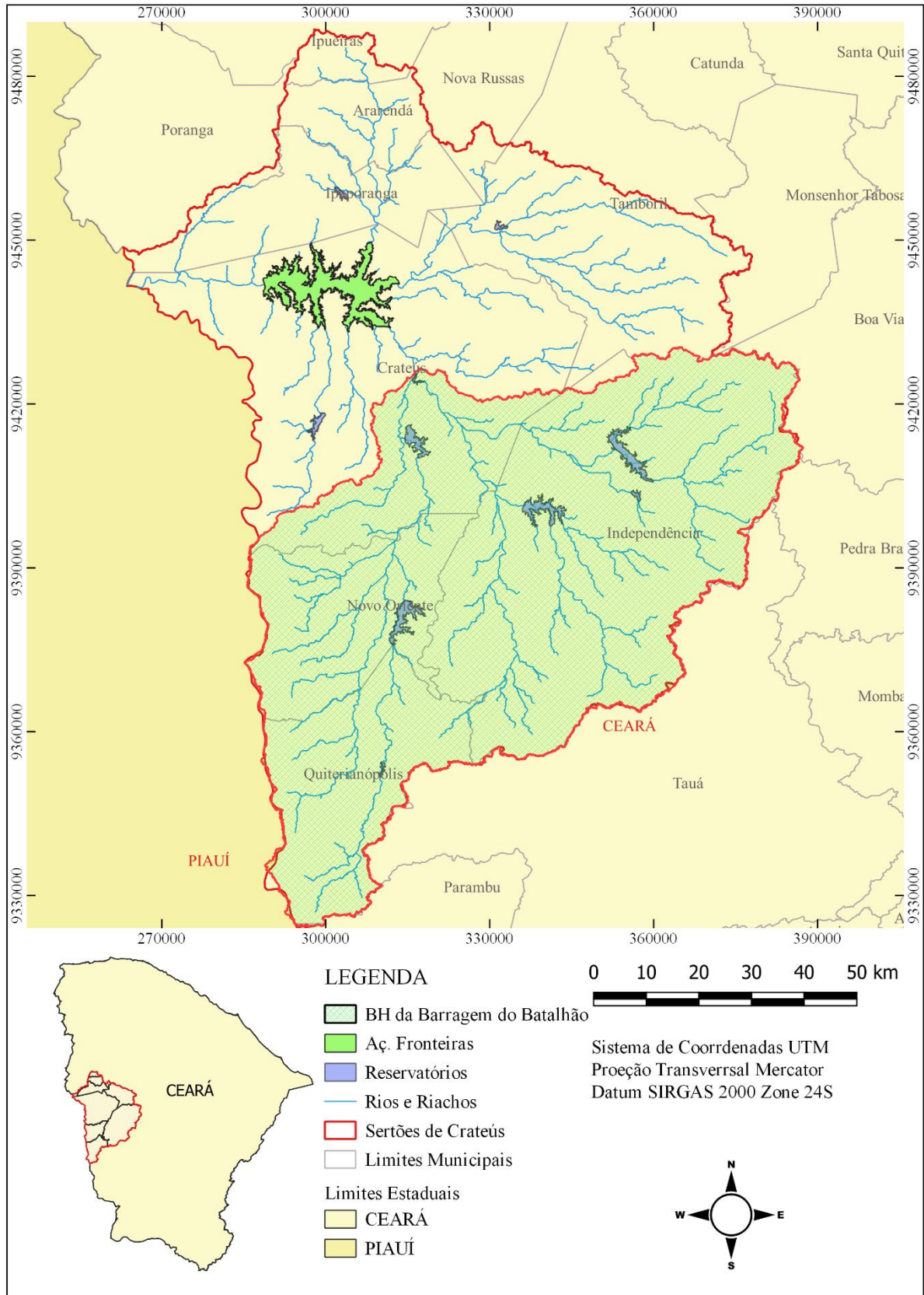
Localizado na zona urbana de Crateús-CE ele conta com uma bacia hidrográfica total que abrange uma área de 5.959,82 km² como apresentado na Figura 19. Diretamente à montante da Barragem do Batalhão se encontra os reservatórios estratégicos: Barra Velha, Carnaubal, Cupim e Jaburu II, e à jusante teremos apenas o reservatório Fronteiras, que está em fase de construção.

Gráfico 11 – Curva CAV da Barragem do Batalhão.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 19- Bacia hidrográfica da Barragem do Batalhão.



Fonte: Própria autoria

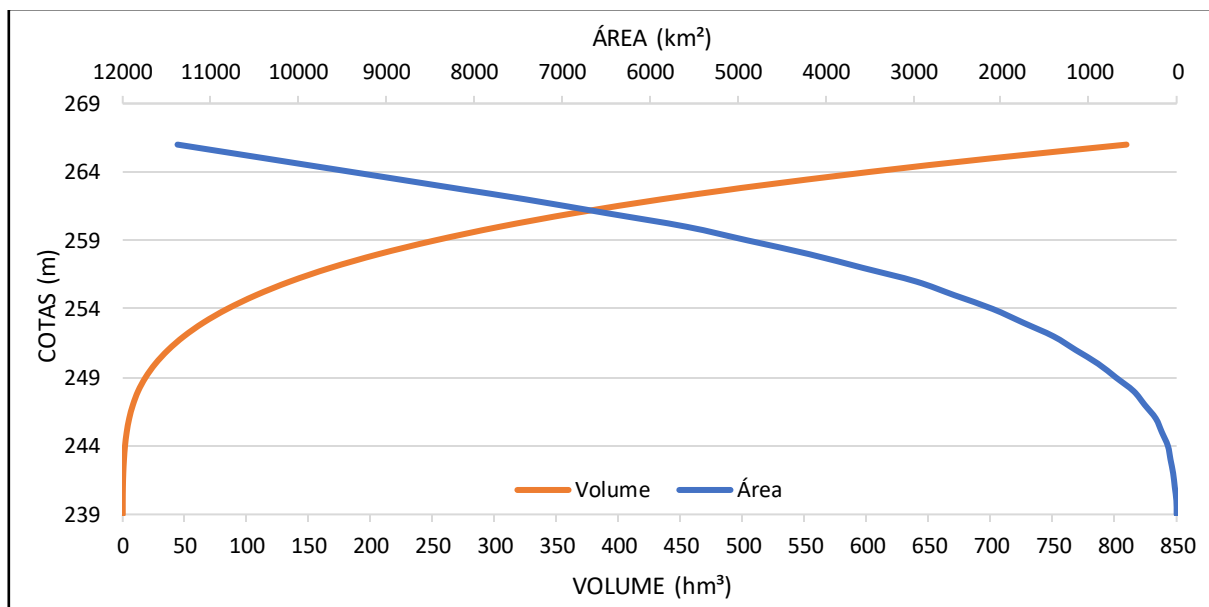
3.3.11 Reservatório Fronteiras

Reservatório estratégico em fase de construção, o Fronteiras terá uma capacidade máxima de acumulação superior à da própria RHSC atualmente, com um valor de 488,18 hm³ e uma bacia hidráulica de 8.103,56 km². O Gráfico 12 apresenta a curva cota x área x volume do Fronteiras. Distante 27 km da cidade de Crateús, está localizado próximo da divisão dos estados do Ceará e Piauí.

A barragem Fronteiras terá a finalidade o abastecimento dos Distritos de Ibiapaba, Poty, Assis e Curral Velho e a localidade de Cabaças, no município de Crateús, e para a irrigação de 5.000 ha de solos. Além de outros usos para o desenvolvimento da região, possibilitando o estabelecimento de indústrias, criação de novos perímetros irrigados e criação extensiva de animais.

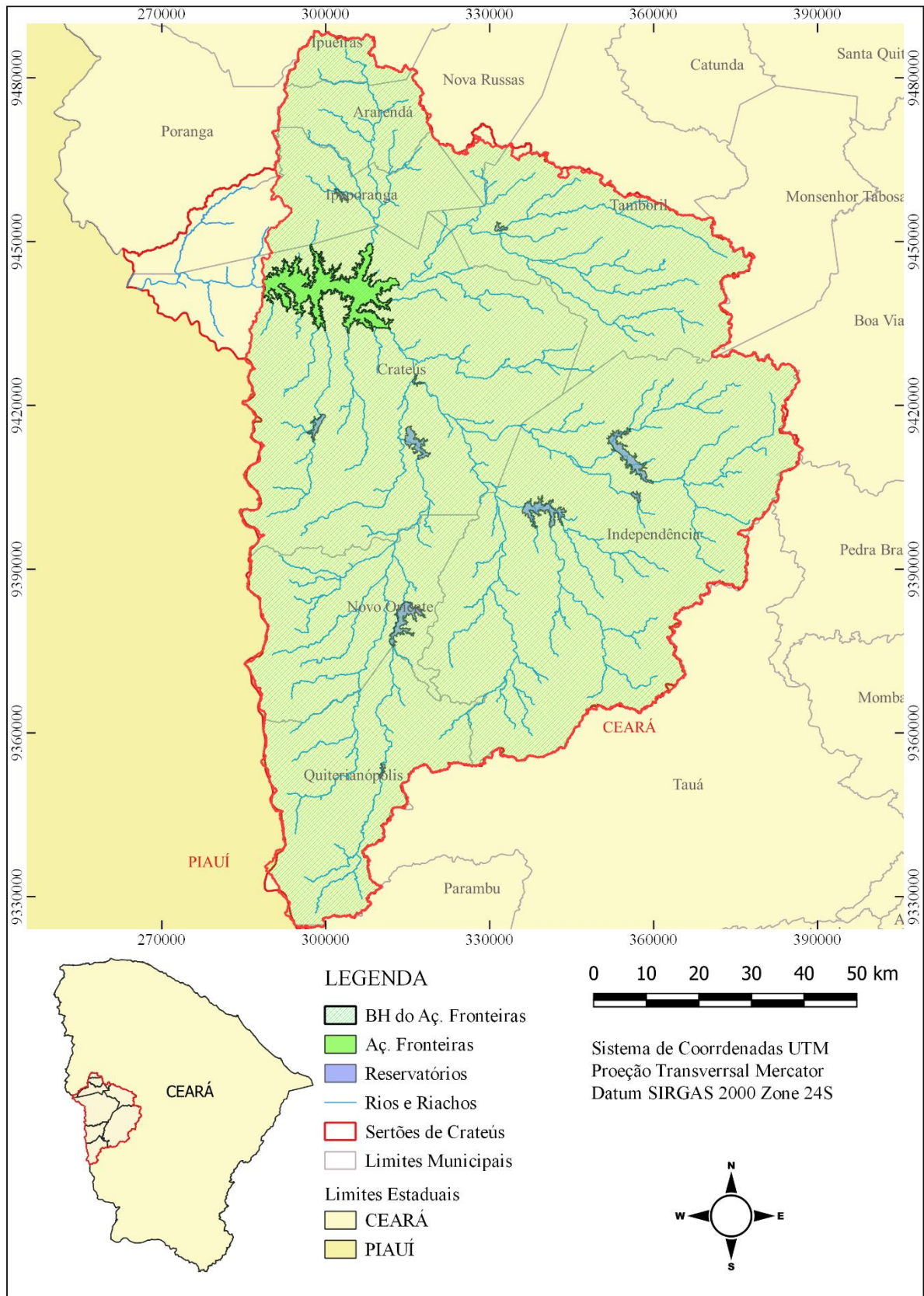
Por ser o último barramento do rio Poti dentro do estado do Ceará, sua bacia hidrográfica total é formada quase que por toda RHSC, possuindo uma área de 10.248,84 km², como pode ser observado na Figura 20.

Gráfico 12 – Curva CAV do reservatório Fronteiras.



Fonte: Adaptado de COGERH (2021).

Figura 20- Bacia Hidrográfica do reservatório Fronteiras.



Fonte: Própria autoria.

4 METODOLOGIA

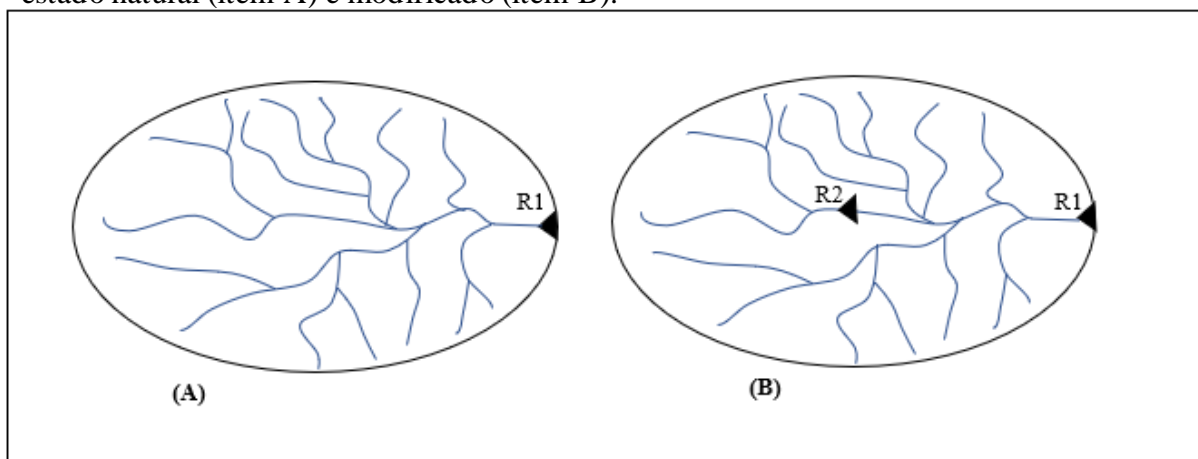
Esta seção apresenta primeiramente a organização dos reservatórios em dois grupos quanto a existência de reservatório estratégicos na sua bacia hidrográfica, o que interfere diretamente na metodologia a ser utilizada no cálculo das vazões afluentes. Em seguida são apresentados os métodos de cálculo das vazões regularizadas, vertimento médio e evaporação média pelo software SIMRES, assim como a base de dados necessária.

4.1 Grupos de reservatórios e método de simulação

Para a divisão dos reservatórios estudados em dois grupos é necessário o entendimento do que se considera como uma bacia hidrográfica natural e uma bacia hidrográfica modificada.

A bacia hidrográfica de um reservatório é o somatório das áreas de contribuição de todos os cursos dos rios que se encontram à montante da seção do rio principal onde está localizado o barramento do reservatório. Nesse estudo, tal bacia será considerada Natural quando não houver a presença de nenhum dos outros reservatórios estratégicos, aqui utilizado, dentro de seus limites, como apresentado no item A da Figura 21. A bacia hidrográfica será considerada modificada quando houver a presença de outro reservatório estratégico em seus limites naturais, como apresentado no item B da Figura 21. Nesse caso a bacia hidrográfica modificada passa a ser a área da bacia de contribuição de todos os rios não controlados pelo reservatório estratégico à montante, também denominada de área incremental ou área livre por alguns autores.

Figura 21 – Representação esquemática de uma bacia hidrográfica de um reservatório em seu estado natural (item A) e modificado (item B).

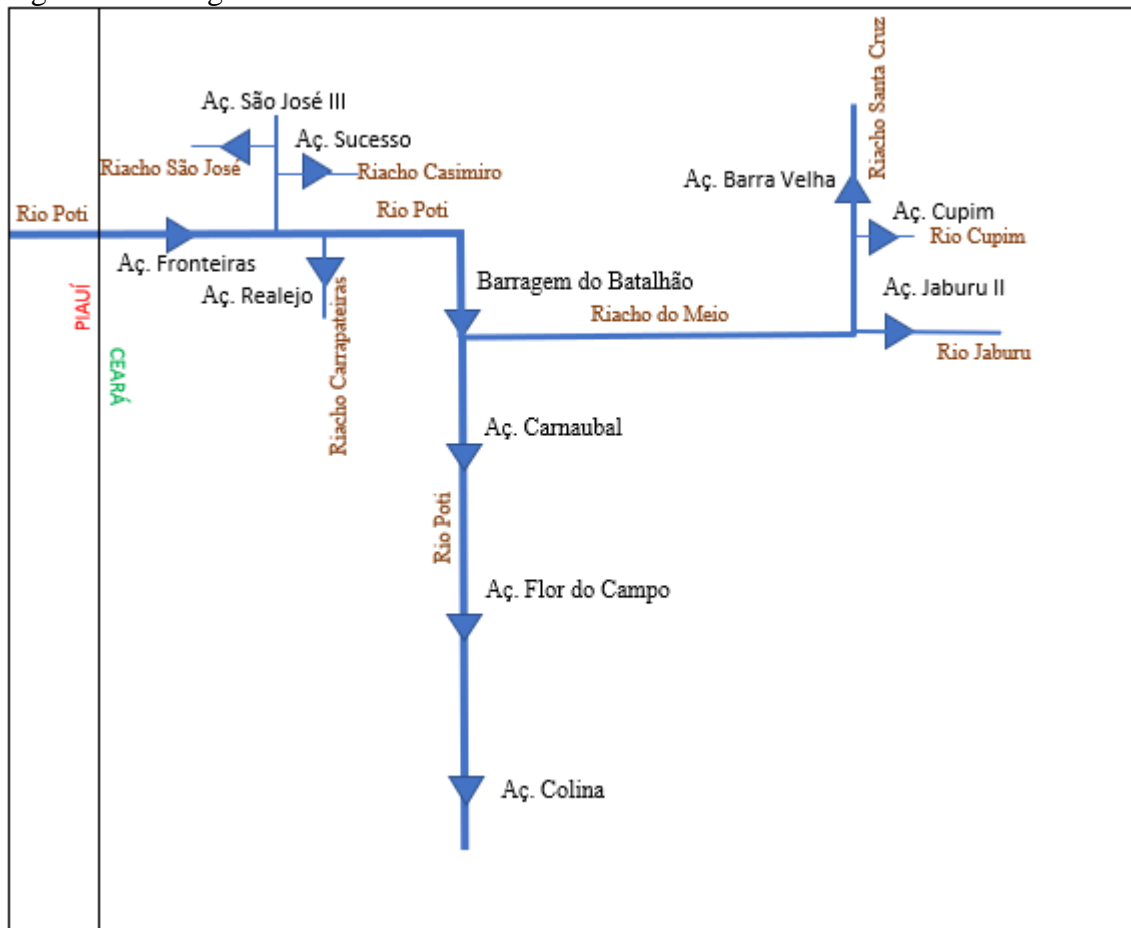


Fonte: Própria autoria.

Desta forma, de acordo com a definição acima, os reservatórios aqui foram divididos em dois grupos. O Grupo I é formado pelos reservatórios com bacia hidrográfica natural, que são: São José III, Sucesso, Realejo, Barra Velha, Cupim, Jaburu II e Colina. O Grupo II é formado pelos reservatórios com bacia hidrográfica modificada por um ou mais reservatórios estratégicos, que são: Flor do Campo, Carnaubal, Barragem do Batalhão e o Fronteiras.

No diagrama unifilar disponível na Figura 22, representa-se o posicionamento dos reservatórios estratégicos da RHSC, no qual é possível identificar em que grupo cada reservatório estratégico se enquadra.

Figura 22 – Diagrama unifilar dos reservatórios simulados.



Fonte: Própria autoria.

Para os reservatórios do Grupo I foi realizada uma simulação em paralelo para cada reservatório a partir do software SIMRES, para se obter as vazões regularizadas com garantias de abastecimento de 80, 90, 95 e 100%, e seus respectivos vertimento médio e evaporação média, para as diferentes garantias.

No Grupo II foram realizados dois tipos de simulações, visando analisar o impacto da modificação da bacia hidrográfica nas vazões regularizadas, onde serão denominadas de Cenário 1 e Cenário 2, para se obter as vazões regularizadas com garantias de abastecimento de 80, 90, 95 e 100%, e seus respectivos vertimento médio e evaporação média, para as diferentes garantias.

No Cenário 1 as vazões afluentes ao reservatório em análise foram compostas pela vazão gerada na área sem interferência do reservatório à montante (bacia incremental ou área livre), somadas as séries de vazões vertidas pelo (os) reservatório (os) localizado (os) imediatamente à montante sendo realizada uma simulação em série. No Cenário 2 foi considerada uma situação hipotética da bacia não ter sido modificada, ou seja, ela é tratada como uma bacia natural, logo sua área total é a soma da sua área livre e a (as) área (as) controlada (as) pelo (os) reservatório (os) à montante sendo realizado uma simulação em paralelo.

4.2 Método de simulação no SIMRES

Para a inserção dos dados de entrada no software SIMRES, foram utilizado o software Bloco de Notas para a criação dos arquivos referentes aos dados gerais do reservatório e das séries de vazões mensais afluentes.

4.2.1 Dados gerais dos reservatórios

No módulo DADOS RESERVATÓRIO terá as seguintes informações:

- 12 estações que divide o ano;
- O tipo de simulação será com garantia fixa anual (reconhecido pelo programa como o número '2');
- O volume inicial que será 50% da capacidade máxima;
- A reserva de segurança que é o volume morto será considerada zero;
- 4 garantias a simular, são elas: 80%, 90%, 95% e 100%;
- A modulação sazonal das retiradas que serão distribuídas igualmente;
- 1 capacidade a simular e será a capacidade máxima dos reservatórios;
- Número de cotas, inserção da curva cota x volume (hm^3);
- Modulação sazonal das evaporações;
- E a evaporação líquida.

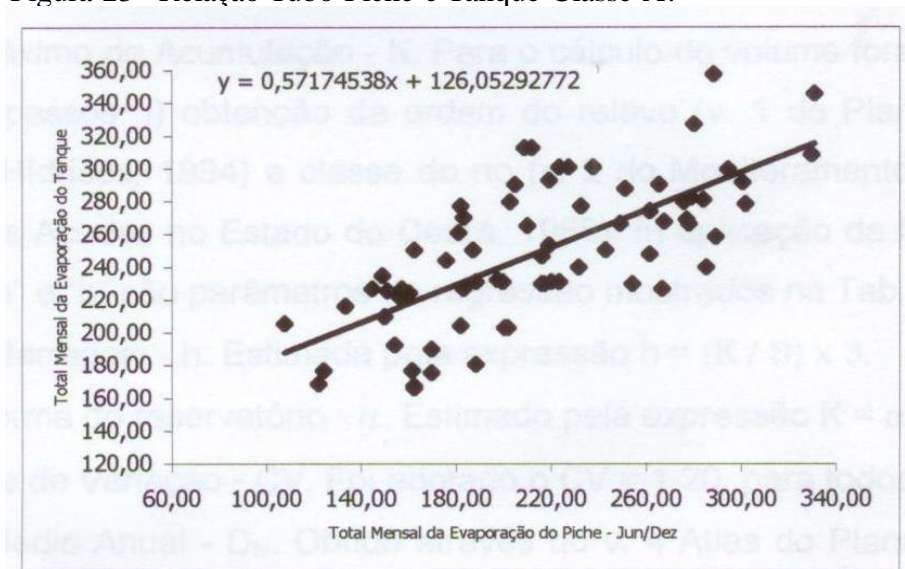
Logo para cada reservatório foi criado um arquivo em formato .dat que corresponde aos dados gerais dos reservatórios que totaliza 11 arquivos. Para os dados dos reservatórios foram levantadas as seguintes informações: capacidade máxima e a curva CAV, que estão no item 3.2.

A Modulação sazonal das evaporações pode ser entendida como a razão entre a diferença da evaporação e da precipitação durante o mesmo intervalo de tempo e o somatório da diferença de todos os intervalos $[(E-P) / \sum(E-P)]$.

Já para evaporação líquida anual foi considerada a evaporação do “Tanque Classe A”, que foi obtido pela conversão através da relação Piche/ Tanque Classe A (Figura 23), obtida através da publicação da SUDENE (1989), sendo considerada somente os meses que corresponde ao período de seca. Ainda foi levado em consideração um fator de correção de situações reais, no valor de 0,80. A Tabela 01 demonstra os valores obtidos tanto da modulação sazonal das evaporações como da evaporação do reservatório.

Para a determinação da evaporação líquida, levasse em consideração a evaporação do reservatório ocorrida entre os meses de junho e dezembro, e que para a RHSC é de 1.938,2 mm ao ano.

Figura 23 –Relação Tubo Piche e Tanque Classe A.



Fonte: SUDENE, 1989.

Tabela 01 – Normas Climatológicas e cálculo da evaporação líquida.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL
Evaporação (piché) (E)	256,1	174,6	146,0	109,7	171,4	274,5	361,6
Precipitação (P)	117,4	122,5	183,6	178,7	67,1	13,1	6,8
Déficit (E – P)	138,7	52,1	-37,6	-69,0	104,3	261,4	354,8
Modulação Sazonal (E – P) / \sum (E – P)	0,049	0,019	-0,013	-0,025	0,037	0,093	0,126
Evaporação (T. Classe A)	272,4	225,9	209,5	188,8	224,0	283,0	332,8
Evaporação (reservatório)	217,9	180,7	167,6	151,0	179,2	226,4	266,2
	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO	
Evaporação (piché) (E)	406,4	419,4	444,6	412,1	375,6	3.552,0	
Precipitação (P)	7,1	0,7	6,5	11,1	23,8	738,4	
Déficit (E – P)	399,3	418,7	438,1	401,0	351,8	2.813,6	
Modulação Sazonal (E – P) / \sum (E – P)	0,142	0,149	0,156	0,143	0,125	1,0	
Evaporação (T. Classe A)	358,4	365,8	380,3	361,7	340,8	3.543,4	
Evaporação (reservatório)	286,4	292,6	304,2	289,4	272,6	2.834,7	

Fonte: Própria autoria.

4.2.2 Séries de Vazões

Como os reservatórios foram divididos em dois grupos, em relação a bacia hidrográfica, foi calculado uma série pseudo-histórica de vazão afluente para cada um dos reservatórios do Grupo I e duas séries pseudo-históricas de vazão afluente para os reservatórios do Grupo II, uma para cada cenário.

As séries pseudo-históricas de vazões afluentes aos reservatórios da RHSC foram obtidas a partir do estudo realizado por Rosa (2019), através do modelo SMAP- mensal, no qual os parâmetros foram obtidos mediante a pesquisa de estudos anteriores e da calibração dos mesmos. Tais parâmetros possuem os seguintes valores: Capacidade de saturação do solo (Sat = 1.333,00), é o resultado da precipitação subtraída da parcela transferida ao escoamento superficial (PES = 3,48), coeficiente de recarga do solo (Crec = 0,00), Taxa de deplecionamento

($K = 3,00$), taxa de umidade do solo inicial ($T_{uin} = 20,00$) e o escoamento de base inicial ($E_{bin} = 0,00$).

4.2.3 Geração de séries sintéticas

Como os dados disponíveis de vazões se limitam aproximadamente a 100 anos, e o método de Montes Carlos só é viável para uma grande série de dados, para contornar esse problema será usado o módulo GERAR VAZÕES do software SIMRES. Utilizando uma distribuição de probabilidade do tipo GAMA II, e com parâmetros com média anual e desvio padrão calculado da série pseudo-histórica da vazão afluente de cada reservatório, e empregando a mesma semente, no caso é 12345678, é viável gerar uma série de vazões sintéticas de 5.000 anos.

4.2.4 Fragmentar Serie

Como as séries de vazões sintéticas geradas são anuais, e o interesse do estudo está voltado para um período mensal, é possível transformar essa série anual para mensal através do módulo FRAGMENTA SERIE que consiste em arquivos de entradas, que são a série de vazão sintética gerada e a modulação de vazões mensais características do regime hídrico afluente, ou seja, a própria série pseudo-histórica de vazão afluente ao reservatório. E o arquivo de saída será o arquivo que contém a série sintética de vazões fragmentada em período mensal que corresponde a vazão afluente ao reservatório.

4.2.5 Soma de Vazão Afluente

Específico da simulação em série (os reservatórios do grupo II cenário 1), a soma de vazão afluente do reservatório consiste na soma da série de vazão sintética fragmentada com a série de vazões sangrados dos reservatórios à montante já simulado. Mas como para cada nível de garantia simulado se tem uma série de sangria diferente, diante disso e buscando uma melhor análise, foi usada a série de sangria que corresponde ao nível de garantia de 80% do reservatório a montante para o cálculo da vazão afluente que corresponde ao nível de garantia de 80% do reservatório em questão, e assim foi feito o mesmo procedimento para os outros níveis de garantia, o que resulta em 4 simulações para cada reservatório do Grupo II Cenário 1. O procedimento de soma da vazão afluente foi feito com o auxílio do software Excel.

4.2.6 *Simulação dos Reservatórios*

No módulo SIMULAR RESERVATÓRIO e como os arquivos de entrada no módulo, que são, dados gerais do reservatório e a série de vazões sazonais, é possível fazer a simulação para cada um dos reservatórios.

Observa-se que para os reservatórios do Grupo I e os reservatórios do Grupo II Cenário 2, a série de vazões sazonais será a série de vazões fragmentada. Já para os reservatórios do Grupo II Cenário 1, a série de vazões sazonais será a soma das vazões afluentes.

Dentre os arquivos de saídas, aqueles com mais relevância para o presente trabalho são o relatório de simulação, a série de vazões mensais sangrados, e a média de vazões regularizada para cada nível de garantia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

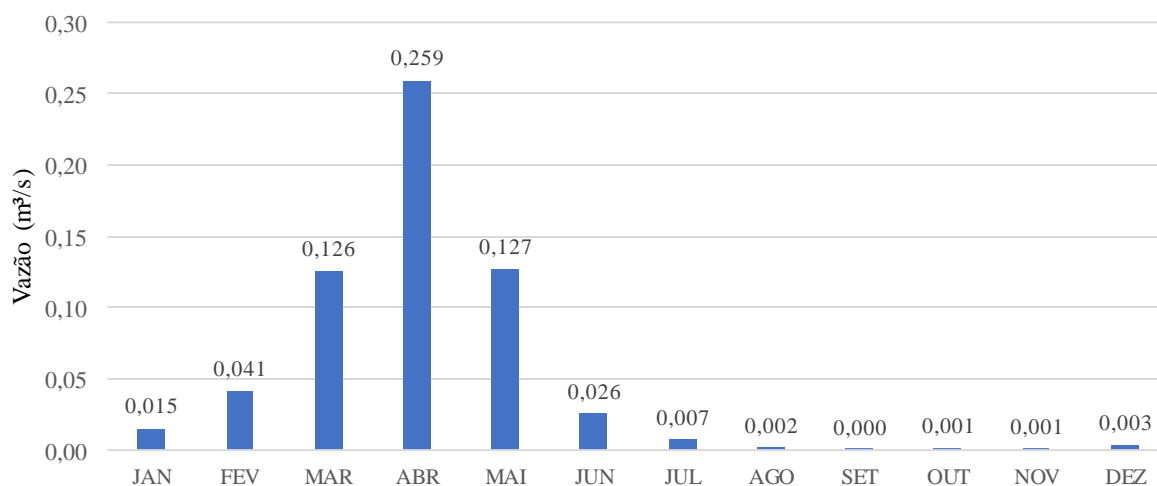
Esta seção apresenta os resultados das simulações dos reservatórios, avaliando a eficiência dos reservatórios em termos de regularização de vazão com altos níveis de garantia e os efeitos da construção de reservatórios em cascata. E está dividida em duas partes, cada um referente ao Grupos de reservatórios.

5.1 Simulações dos Reservatórios do Grupo I

5.1.1 Reservatório São José III

A série histórica de vazões afluentes ao reservatório São José III, baseada em modelos hidrológicos chuva x vazão, conta com 107 anos de precipitações médias, compreendida entre os anos de 1912 a 2018, na qual a vazão média anual é de 0,051 m³/s (1,60 hm³/ano), desvio padrão de 0,072 m³/s (2,28 hm³/ano) e coeficiente de variação de 1,43, dentro do esperado para a região com rios intermitentes. O coeficiente de escoamento obtido nesta bacia hidrográfica é de 2,78%. A variação sazonal das vazões médias afluentes ao reservatório é apresentada no Gráfico 13.

Gráfico 13 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório São José III



Fonte: Própria autoria.

O escoamento produzido na bacia hidrográfica possui os maiores valores de médias mensais entre março e maio, com máxima em abril. Em termos de volume afluente ao

reservatório 84,4% do total anual está concentrado entre os meses mencionados. As vazões médias entre os meses de agosto e novembro são praticamente nulas.

Com base nas características físicas do reservatório e na série sintética de vazões afluentes ao reservatório geradas através do modelo hidrológico SIMRES foi possível simular 5.000 anos de operação do reservatório São José III. Os resultados das vazões regularizadas, sangrias médias e evaporações médias, para as diferentes garantias analisadas podem ser observadas na Tabela 02. A Tabela 03 apresenta os resultados dessa simulação em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

De acordo com a Tabela 02 as vazões regularizadas apresentam uma grande variação entre as diferentes garantias de atendimento simuladas, com diminuição em torno de 54% entre as garantias de 80 e 90%, e 90 e 95%. Ainda se percebe que para a garantia de 100% os valores são nulos, o que indica que o reservatório é incapaz de funcionar sem que ocorra falha. Os valores de sangria média e evaporação média apresentam variações muito pequenas para as diferentes garantias simuladas. Esses resultados podem ser explicados pela baixa velocidade com que o reservatório é reabastecido, quando se analisa o fator de capacidade apresentado na Tabela 03, onde a capacidade máxima do reservatório é quase cinco vezes maior que a vazão afluente média simulada.

Tabela 02 – Resultado da simulação do reservatório São José III no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	0,034	0,015	0,007	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	0,113	0,114	0,114	0,115
Evaporação Média (hm ³ /ano)	1,445	1,461	1,468	1,475
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,0011	0,0005	0,0002	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036
Evaporação Média (m ³ /s)	0,0458	0,0463	0,0465	0,0468

Fonte: Própria autoria

Tabela 03 – Balanço hídrico do reservatório São José III.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
1,60	7,96	4,98	80%	2,14%	7,10%	90,77%
			90%	0,94%	7,17%	91,89%
			95%	0,44%	7,17%	92,39%
			100%	0,00%	7,23%	92,77%

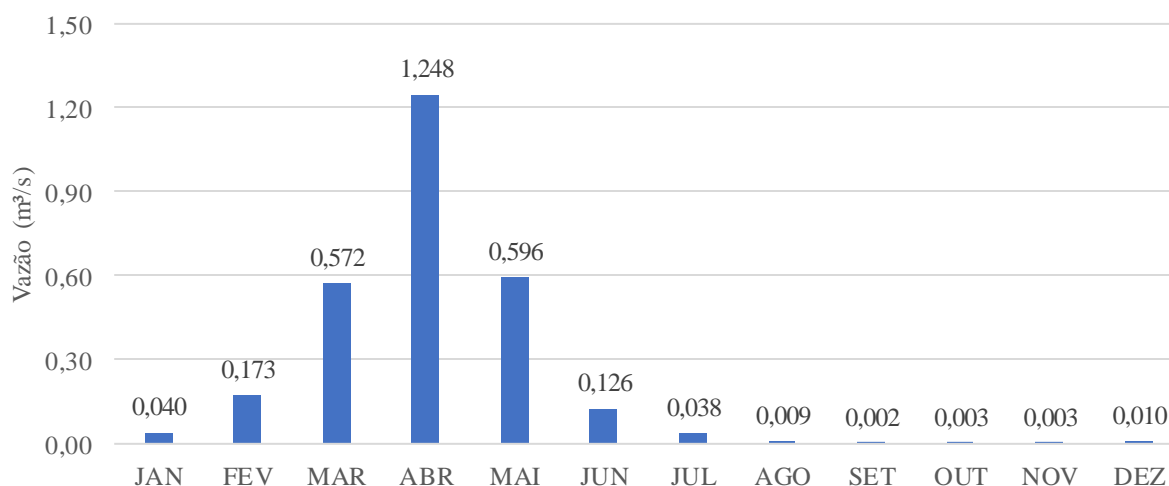
Fonte: Própria autoria.

A forte influência do fator de capacidade pode ser observada também na divisão média que é feita desse volume afluente na simulação do reservatório. Tomado como referência a garantia de 90%, menos de 1% do volume afluente ao reservatório é efetivamente regularizado e aproximadamente 92% é evaporado, tais percentuais demonstra que o reservatório é extremamente ineficiente, devido a sua alta perda de volume afluente e a sua baixa capacidade de regularizar.

5.1.2 Reservatório Sucesso

A série histórica de vazão afluente para o reservatório Sucesso, que foi baseada no modelo hidrológico chuva x vazão, que engloba os anos de 1912 a 2018 totalizando 107 anos de precipitações médias. A série possui uma vazão média anual de 2,82 m³/s (7,39 hm³/ano), com o desvio padrão de 5,29 m³/s (13,93 hm³/ano) e coeficiente de variação de 1,87, valor esse que está acima do esperado para o semiárido. O coeficiente e escoamento obtido nesta bacia hidrográfica é de 4,36%. A variação sazonal das vazões médias afluentes ao reservatório é apresentada no Gráfico 14.

Gráfico 14 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Sucesso.



Fonte: Própria autoria.

Cerca de 85,7% do escoamento produzido na bacia do reservatório Sucesso está concentrado em três meses (março, abril e maio), já entre os meses de agosto a dezembro as vazões médias são praticamente nulas.

Através do modelo hidrológico SIMRES realizou-se a geração e fragmentação da série sintética de vazões afluentes ao reservatório e com as características físicas do reservatório

e climáticas da região, foi capaz de simular os 5.000 anos de operação do reservatório Sucesso para diferentes garantias. Os resultados da simulação podem ser observados na Tabela 04 que contém as médias de vazão regularizada, sangria e evaporada. A Tabela 05 são apresentados os resultados em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Tabela 04 – Resultado da simulação do reservatório Sucesso no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	0,165	0,045	0,022	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	4,715	4,754	4,762	4,769
Evaporação Média (hm ³ /ano)	2,507	2,577	2,591	2,605
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,0052	0,0014	0,0007	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	0,1495	0,1507	0,1510	0,1512
Evaporação Média (m ³ /s)	0,0795	0,0817	0,0822	0,0826

Fonte: Própria autoria.

Segundo a Tabela 04, as vazões regularizadas apresentam uma grande variação entre garantias de simulação, em que para as garantias de 80 e 90% há uma redução em torno de 73% e para a garantia de 90 e 95% ocorre uma redução de 51%. Já pra a garantia de 100% as vazões regularizadas do reservatório são nulas, o que representa que o mesmo não possui capacidade para regularizar uma vazão contínua. Em relação os valores de sangria médias e evaporação média, o reservatório Sucesso apresenta variações consideravelmente baixas para os diferentes níveis de garantia.

Tabela 05 – Balanço hídrico do reservatório Sucesso.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
7,39	6,60	0,89	80%	2,23%	63,83%	33,94%
			90%	0,61%	64,45%	34,94%
			95%	0,30%	64,57%	35,13%
			100%	0,00%	64,67%	35,33%

Fonte: Própria autoria.

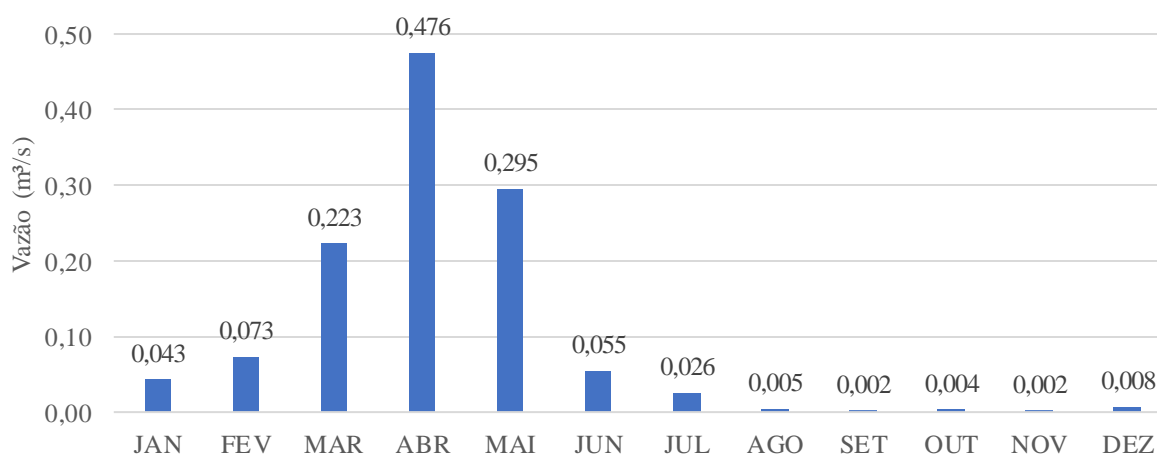
Analisando a Tabela 05, pode-se determinar a eficiência do reservatório levando em consideração o balanço hídrico do mesmo. Tornando a garantia de 90% como referência, somente 0,61% do volume afluyente ao reservatório se torna vazão regularizada, e cerca de 35% se evapora. Deste modo, aproximadamente 64% do volume é vertido, retornando ao leito do rio. Tais percentuais podem ser explicados pelo baixo fator de capacidade (0,89), que indica

um baixo uso do potencial de acumulação. Mesmo apresentando baixos percentuais de evaporação, a capacidade de regularização para altos níveis de garantias do reservatório é baixa, tornando o mesmo ineficiente para altas garantias.

5.1.3 Reservatório Realejo

Com uma série de precipitações entre os anos de 1912 a 2018 e com base em modelos hidrológicos chuva x vazão foi calculada uma série pseudo-histórica de vazão afluentes ao reservatório Realejo, que conta com 107 anos, na qual a vazão média anual é de 1,21 m³/s (3,18 hm³/ano), desvio padrão de 2,18 m³/s (5,76 hm³/ano) e coeficiente de variação de 1,80, o coeficiente de variação está ligeiramente superior para a região Semiárida Brasileira. O coeficiente de escoamento obtido da bacia hidrográfica é de 2,58. A variação sazonal das vazões médias afluentes ao reservatório é apresentada no Gráfico 15.

Gráfico 15 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Realejo.



Fonte: Própria autoria.

O escoamento produzido na bacia hidrográfica do reservatório possui os maiores valores de médias mensais entre março e maio, com máxima em abril. Em termos de volume afluente ao reservatório 82,1% do total anual está concentrado entre os meses mencionados. As vazões médias entre os meses de agosto e dezembro são praticamente nulas.

Após a realização da simulação, os valores das vazões regularizadas, sangria média e evaporação média para as diferentes garantias podem ser vistas na Tabela 06. A Tabela 07 apresenta os valores da simulação em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Tabela 06 – Resultado da simulação do reservatório Realejo no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	0,392	0,155	0,083	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	0,088	0,093	0,095	0,097
Evaporação Média (hm ³ /ano)	2,721	2,923	2,988	3,067
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,0124	0,0049	0,0026	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	0,0028	0,0029	0,0030	0,0031
Evaporação Média (m ³ /s)	0,0863	0,0927	0,0947	0,0973

Fonte: Própria autoria.

De acordo com a Tabela 06 as vazões regularizadas apresentam variações significativas entre as diferentes garantias de atendimento simuladas, entre as garantias de 80 e 90%, exibe uma redução superior a 60% e entre as garantias de 90 e 95% há uma diminuição superior a 46%. E para a garantia de 100%, a vazão regularizada é nula, representando a ocorrência de falhas. Para os valores de sangria média e evaporação média apresenta pequenas variações entre as garantias simuladas.

Tabela 07 – Balanço hídrico do reservatório Realejo.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
3,18	31,55	9,92	80%	12,25%	2,75%	85,00%
			90%	4,89%	2,93%	92,18%
			95%	2,62%	3,00%	94,38%
			100%	0,00%	3,07%	96,93%

Fonte: Própria autoria.

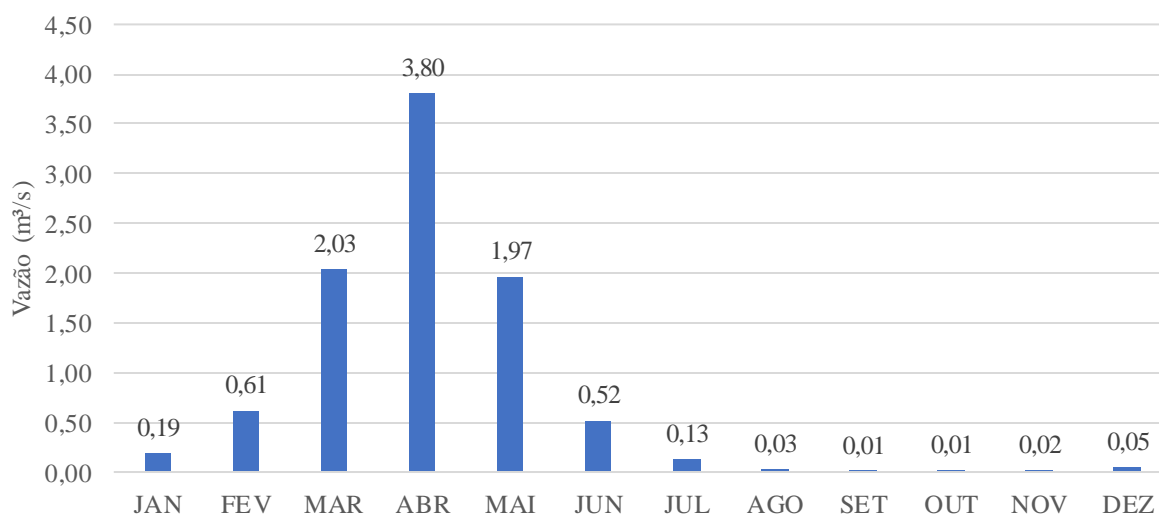
O fator de capacidade do reservatório Realejo é cinco vezes maior do que o recomendado para os reservatórios da região semiárida brasileira, demonstrando forte influência sobre os percentuais regularizado, sangrado e evaporado do balanço hídrico do reservatório, como é possível ver na Tabela 07. Tomando a garantia de 90% como referência, aproximadamente 92% do volume afluente ao reservatório evapora, sobrando somente 8% para o volume regularizado e sangrado, onde os mesmos se dividem em 5% para o volume regularizado e 3% para o sangrado.

O reservatório Realejo possui o maior percentual regularizado dos reservatórios simulados do Grupo I, mas também apresenta uma perda para evaporação de acima de 90% do volume afluente tornado ineficiente.

5.1.4 Reservatório Barra Velha

A série pseudo-histórica de vazões afluentes ao reservatório Barra Velha, baseada em modelos hidrológicos chuva x vazão, conta com um total de 107 anos, entre 1912 a 2018, em que a vazão média anual é de 9,36 m³/s (24,54 hm³/ano), um desvio Padrão de 16,16 m³/s (42,56 hm³/ano), e um coeficiente de variação de 1,72, o coeficiente de variação está ligeiramente acima do que é considerado na região Nordeste. O coeficiente de escoamento obtido nesta bacia é de 3,99%. A variação sazonal das vazões médias afluente ao reservatório Barra Velha é apresentada no Gráfico 16.

Gráfico 16 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Barra Velha.



Fonte: Própria autoria

O escoamento ocorrido na bacia hidrográfica do reservatório Barra Velha, se inicia no mês de janeiro e se estende até o mês de julho, sendo os meses de abril com o maior volume de escoamento, cerca de 83,2% do total anual. Para os meses de agosto a dezembro as vazões médias são praticamente nulas.

Levando em consideração as características climáticas da região, as características físicas do reservatório e a série de vazão sintética fragmentada, foi possível simular a operação do reservatório para um horizonte de tempo de 5.000 anos. Na Tabela 08 possui o resultado da simulação para diferentes garantias para o reservatório Barra Velha.

Tabela 08 – Resultado da simulação do reservatório Barra Velha no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	2,602	1,134	0,304	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	5,111	5,353	5,506	5,566
Evaporação Média (hm ³ /ano)	17,182	18,250	18,889	19,128
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,0825	0,0360	0,0096	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	0,1621	0,1697	0,1746	0,1765
Evaporação Média (m ³ /s)	0,5448	0,5787	0,5990	0,6065

Fonte: Própria autoria.

Ao analisar a Tabela 08, o reservatório Barra Velha não é capaz de disponibilizar vazão regularizada de forma contínua (garantia de 100% igual a zero). Com relação as demais garantias, a vazões regularizadas demonstra uma grande variação entre as diferentes garantias simuladas, com uma redução em torno de 56% entre a garantia de 80 e 90% e uma redução em torno de 73% para as garantias de 90 e 95%. Os valores de sangria média e evaporação média apresentam um aumento em torno de 8 % e 12%, respectivamente, para as garantias de 80 e 100%, que comparadas a de vazão regularizada as mesmas tem baixa variações.

Para se ter uma melhor análise sobre a eficiência de um reservatório, faz-se necessário de se entender como o reservatório se comportaram em razão de como o mesmo transforma a vazão afluyente em vazões regularizada, sangrada e evaporada, ou seja, o balanço hídrico superficial do reservatório. Na Tabela 09 apresenta o balanço hídrico do reservatório em termos percentuais.

Tabela 09 – Balanço hídrico do reservatório Barra Velha.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
24,54	99,56	4,06	80%	10,45%	20,53%	69,02%
			90%	4,58%	21,64%	73,78%
			95%	1,23%	22,29%	76,48%
			100%	0,00%	22,54%	77,46%

Fonte: Própria autoria.

De acordo com a Tabela 09 o coeficiente de capacidade do reservatório está acima do que é indicado para os reservatórios da região Nordeste, o que resulta em elevados percentuais de evaporação, e para o reservatório Barra Velha é de aproximadamente de 73%, e em comparação aos reservatórios Flor do Campo e Jaburu II (Flor do Campo, Jaburu II e Barra

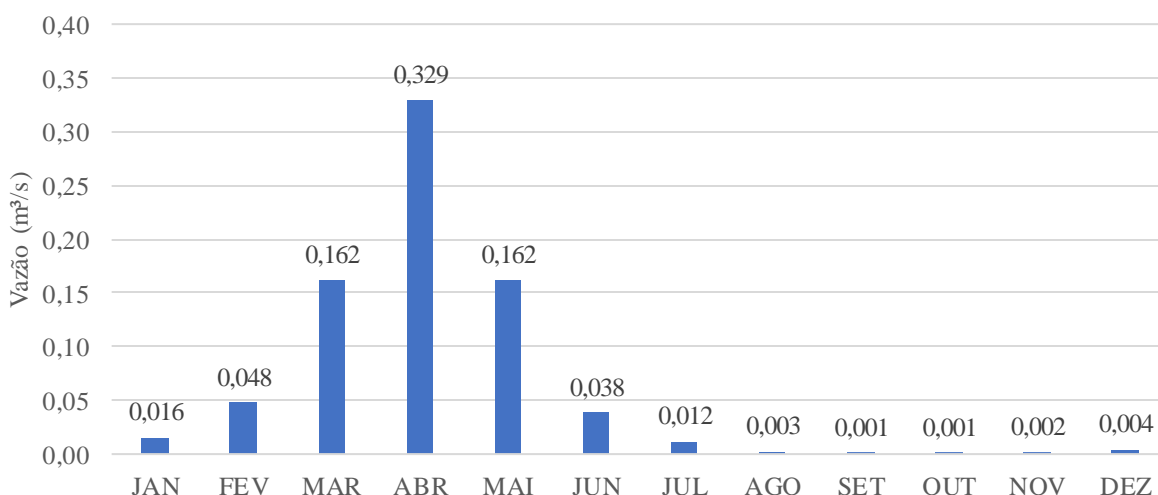
Velha são os três maiores reservatórios da RHSC construídos), os percentuais de evaporação do Barra Velho é significativamente inferior aos outros dois.

Outro fator interessante é o percentual de vazão sangrada que o reservatório apresenta, que é em torno de 22%, valor alto para o valor do coeficiente de capacidade do reservatório, logo a vazão regularizada fica com um percentual em torno de 5%. Caracterizando uma boa eficiência do reservatório, principalmente se comparamos os grandes reservatórios.

5.1.5 Reservatório Cupim

Através dos modelos hidrológicos chuva x vazão foi calculada uma série pseudo-histórica de vazões afluente ao reservatório Cupim, contando com 107 anos de dados entre os anos de 1912 a 2018, e tendo os seguintes valores para os parâmetros: 0,776 m³/s (2,03 hm³/ano) de vazão média anual, 1,247 m³/s (3,28 hm³/ano) de desvio padrão, 1,60 de coeficiente de variação da vazão afluente e 4,03% de coeficiente de escoamento da bacia hidrográfica. A variação sazonal das vazões afluentes ao reservatório é apresentada no Gráfico 17.

Gráfico 17 – Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Cupim.



Fonte: Própria autoria

Os meses com os maiores escoamentos na bacia hidrográfica do reservatório são os meses de março, abril e maio que corresponde a 84,15% do escoamento anual da bacia. E seguindo uma das principais características do semiárido, o escoamento nos meses entre julho e dezembro são praticamente nulas.

Após a realização da simulação através do modelo hidrológico SIMRES do reservatório Cupim, os resultados das vazões médias regularizadas, sangradas e evaporadas

para os diferentes níveis de garantias podem ser observadas na Tabela 10. E na Tabela 11 são apresentados os resultados dessa simulação em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Tabela 10 – Resultado da simulação do reservatório Cupim no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	0,050	0,013	0,006	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	0,636	0,644	0,645	0,646
Evaporação Média (hm ³ /ano)	1,307	1,334	1,339	1,344
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,0016	0,0004	0,0002	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	0,0202	0,0204	0,0205	0,0205
Evaporação Média (m ³ /s)	0,0414	0,0423	0,0425	0,0426

Fonte: Própria autoria.

Tabela 11 – Balanço hídrico do reservatório Cupim.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
2,03	4,60	2,27	80%	2,51%	31,91%	65,58%
			90%	0,65%	32,35%	67,00%
			95%	0,30%	32,41%	67,29%
			100%	0,00%	32,46%	67,54%

Fonte: Própria autoria.

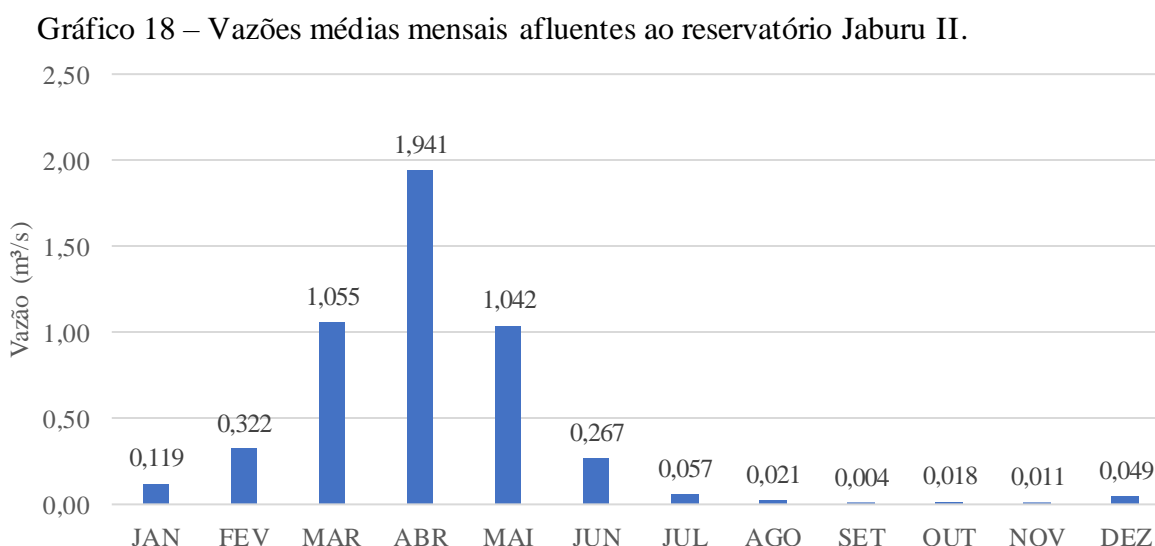
Conforme a Tabela 10 as vazões regularizadas para os diferentes níveis de garantia possuem uma grande variação, apresentando uma diminuição de aproximadamente de 74% entre as garantias de 80 e 90% e de 54% entre as garantias de 90 e 95%. Além de apresentar uma vazão regularizada nula para a garantia de 100%. Para os valores das vazões de sangria e de evaporação, os resultados apresentam pequenas variações para os diferentes garantias.

Tomando como referência a garantia de 90% (Tabela 11), cerca de 0,65% do volume afluente ao reservatório é convertido em vazão regularizada. Com relação a evaporação média o reservatório apresenta percentuais moderados em torno de 67%, restando cerca de 32% para o volume vertido, tais percentuais demonstra que o reservatório é ineficiente para altas garantias, principalmente devido a sua baixa capacidade de regularizar vazões.

5.1.6 Reservatório Jaburu II

A série pseudo-histórica de vazões afluentes ao reservatório Jaburu II, que foi baseada em modelos hidrológicos de chuva x vazão, tem um total de 107 anos de precipitações médias, compreendida entre os anos de 1912 a 2018, e dispondo dos seguintes parâmetros: 4,91 m³/s (12,87 hm³/ano) de vazão média anual, 8,48 m³/s (22,35 hm³/ano) de desvio padrão, 1,72 de coeficiente de variação e 2,59% do coeficiente de escoamento da bacia hidrográfica. A variação sazonal das vazões afluentes ao reservatório é apresentada no Gráfico 18.

O escoamento produzido na bacia hidrográfica do reservatório Jaburu II segue o mesmo comportamento dos demais reservatórios da RHSC, apresentado nos meses de março a maio os meses com maiores volumes de escoamento, representando 82,2% do volume total anual escoado na bacia hidrográfica.



Fonte: Própria autoria

Com base nos dados gerais do reservatório e na série sintética fragmentada de vazões afluentes ao reservatório obtidas pelo modelo hidrológico SIMRES foi possível simular os 5.000 anos de operação do reservatório Jaburu II. Os valores obtidos dessa simulação para as vazões regularizadas, sangria média e evaporação média, para as diferentes garantias podem ser examinados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultado da simulação do reservatório Jaburu II no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	0,775	0,343	0,182	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	0,563	0,574	0,579	0,584
Evaporação Média (hm ³ /ano)	11,677	12,051	12,189	12,371
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,0246	0,0109	0,0058	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	0,0179	0,0182	0,0184	0,0185
Evaporação Média (m ³ /s)	0,3703	0,3821	0,3868	0,3923

Fonte: Própria autoria.

Analisando a Tabela 12, as vazões regularizadas apresentam uma grande variação entre as garantias de atendimentos simuladas, sendo que para as garantias de 80 e 90% a uma redução de cerca de 66% e entre as garantias de 90 e 95% uma redução em torno de 46%. E para a garantia de 100%, após a simulação o reservatório apresentou valores nulos, resultando na incapacidade de fornecer uma vazão contínua. Os valores de sangria média e evaporação média apresenta pequenas variações para as diferentes garantias simuladas.

Para se ter um melhor entendimento sobre a eficiência do reservatório, é necessário se fazer uma análise sobre o balanço hídrico, em outras palavras, como é a divisão do volume afluente ao reservatório após a simulação. Na Tabela 13 apresenta os resultados da simulação em termos percentuais para o balanço hídrico do reservatório.

Tabela 13 – Balanço Hídrico do reservatório Jaburu II.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
12,83	101,64	7,90	80%	5,95%	4,33%	89,72%
			90%	2,64%	4,43%	92,93%
			95%	1,40%	4,47%	94,13%
			100%	0,00%	4,51%	95,49%

Fonte: Própria autoria.

Ao analisamos o fator de capacidade na Tabela 13, percebe que a capacidade máxima é quase oito vezes maior que a vazão afluente ao reservatório, evidenciando uma grande influência sobre os percentuais, que resulta em altos percentuais de evaporação e baixos percentuais regularizados e sangrado. Tomando como referência a garantia de 90%, o reservatório Jaburu II tem a capacidade de regularizar pouco menos de 3% do volume afluente

ao reservatório e aproximadamente 93% é evaporado, tornando-o ineficiente devido a sua alta capacidade de perda de volume de água.

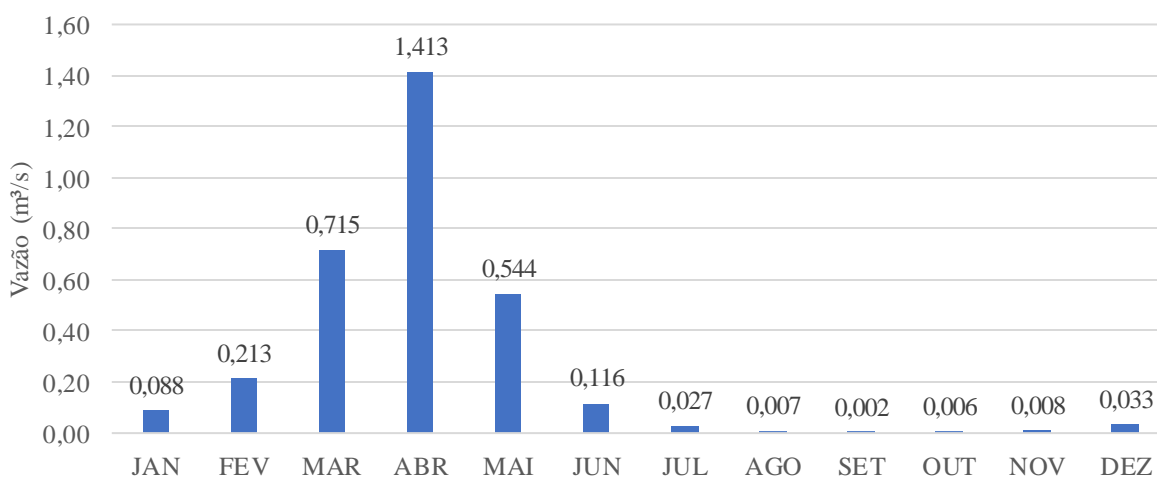
5.1.7 Reservatório Colina

Com uma série de precipitações entre os anos de 1912 a 2018, e com base em modelos hidrológicos de chuva x vazão foi possível obter uma série histórica de vazão afluente ao reservatório Colina, que corresponde a 107 anos de dados, na qual a vazão média anual é de 3,17 m³/s (8,31 hm³/ano), o desvio padrão de 4,89 m³/s (12,86 hm³/ano) e o coeficiente de variação é de 1,54, valor condizente com a região nordeste. O coeficiente de escoamento da bacia é de 3,74%. No Gráfico 19 é apresentado a variação sazonal das vazões afluente ao reservatório.

De acordo com o Gráfico 19, só há escoamento significativo nos meses entre janeiro e junho, sendo os meses de março a maio com o maior volume escoado, em termo percentuais cerca de 84,3% do total anual escoar nesses meses, sendo abril o mês de maior volume escoado.

Baseando-se nos dados gerais do reservatório e na série sintética fragmentada de vazões afluentes ao reservatório, foi possível simular os 5.000 anos de operação do reservatório Colina. Os valores da vazão regularizada, sangria média e evaporação média para os diferentes níveis de garantia podem ser observadas na Tabela 14. Na Tabela 15 apresenta os resultados da vazão regularizada, sangria média e evaporação média em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Gráfico 19 -Vazões médias mensais afluentes ao reservatório Colina.



Fonte: Própria autoria.

Baseando-se nos dados gerais do reservatório e na série sintética fragmentada de vazões afluentes ao reservatório, foi possível simular os 5.000 anos de operação do reservatório Colina. Os valores da vazão regularizada, sangria média e evaporação média para os diferentes níveis de garantia podem ser observadas na Tabela 14. Na Tabela 15 apresenta os resultados da vazão regularizada, sangria média e evaporação média em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Tabela 14 – Resultado da simulação do reservatório Colina no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	0,751	0,341	0,199	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	5,995	6,203	6,283	6,401
Evaporação Média (hm ³ /ano)	1,603	1,759	1,814	1,892
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,0238	0,0108	0,0063	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	0,1901	0,1967	0,1992	0,2030
Evaporação Média (m ³ /s)	0,0508	0,0558	0,0575	0,0600

Fonte: Própria autoria

Tabela 15 – Balanço hídrico do reservatório Colina.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
8,31	4,29	0,52	80%	9,00%	71,81%	19,20%
			90%	4,11%	74,71%	21,19%
			95%	2,40%	75,74%	21,87%
			100%	0,00%	77,19%	22,81%

Fonte: Própria autoria.

De acordo com a Tabela 14 as vazões regularizadas apresentam uma grande variação entre as diferentes garantias simuladas, sendo que para as garantias de 80 e 90% a uma diminuição da regularização de aproximadamente 54,6% e para as garantias de 90 e 95% a uma redução da regularização em torno de 41,6%. Já para a garantia de 100% a vazão regularizada é igual a zero. Em relação aos resultados da sangria médias, percebe-se uma pequena variação entre as diferentes garantias simuladas e em relação a evaporação média apresenta uma variação baixa, mas significativa, um aumento de 18% entre as garantias de 80 e 100%.

Com um baixo uso do seu potencial de acumulação, evidenciado pelo seu fator de capacidade de 0,52, o que resulta em um grande volume vertido d'água. Tomando como referência a garantia de 90%, esse volume vertido corresponde a quase 75% do volume afluente

ao reservatório, outra influência do fator de capacidade reduzido é um baixo percentual de volume evaporado, em torno de 21%, assim sobrando um percentual de 4% para a vazão regularizada, tornado o reservatório Colina um reservatório eficiente, principalmente pelo seu baixo percentual evaporado e seu percentual regularizado.

5.2 Simulações dos Reservatórios do Grupo II

5.2.1 Reservatório Flor do Campo

O reservatório Flor do Campo é o segundo barramento no leito do rio Poti a partir de sua nascente, à montante deste encontra-se o reservatório Colina. A bacia hidrográfica natural do reservatório Flor do Campo é de 653,68 km², onde em torno de 54,6% de sua área de drenagem é controlada pelo reservatório Colina. Portanto, a bacia hidrográfica do Colina possui uma área de 360,06 km² e a área livre ou bacia incremental do Flor do campo é de 293,62 km².

5.2.1.1 Cenário 1

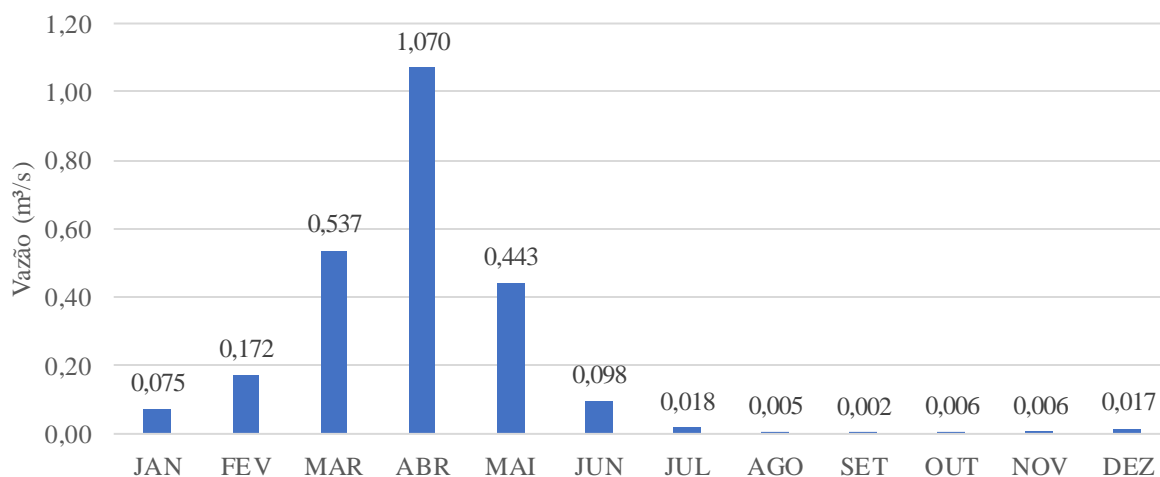
No sistema hídrico do reservatório Flor do Campo, a vazão afluyente é calculada como a soma da vazão calculada na área livre da sua bacia hidrográfica e a série de vazões sangradas pelo reservatório à montante, no caso o Colina.

A série pseudo-histórica de vazão geradas na área livre do reservatório Flor do Campo, 293,62 km², foi calculada a partir de modelo hidrológico chuva x vazão, para uma série de 107 anos de precipitação média, de 1912 a 2018. A série de vazão apresenta as seguintes características: vazão média anual de 2,45 m³/s (6,41 hm³/ano), desvio padrão de 3,65 m³/s (9,61 hm³/ano) e coeficiente de variação de 1,48. O coeficiente de escoamento obtido para a bacia hidrográfica é de 3,54%. A variação sazonal da série de vazões incrementais do reservatório Flor do Campo é apresentada no Gráfico 20.

O escoamento produzido na bacia hidrográfica incremental possui os maiores valores de médias mensais entre março e maio, com máxima em abril. Em termos de volume afluyente ao reservatório 83,6% do total anual está concentrado entre março e maio. As vazões médias entre os meses de julho a dezembro são praticamente nulas.

A série de vazão vertida pelo reservatório Colina é resultado da simulação realizada no item 5.1.7. O Gráfico 21 ilustra a variação sazonal das vazões sangrada do reservatório Colina para uma garantia de 90%. Comportamento similar é foi obtido para as demais garantias.

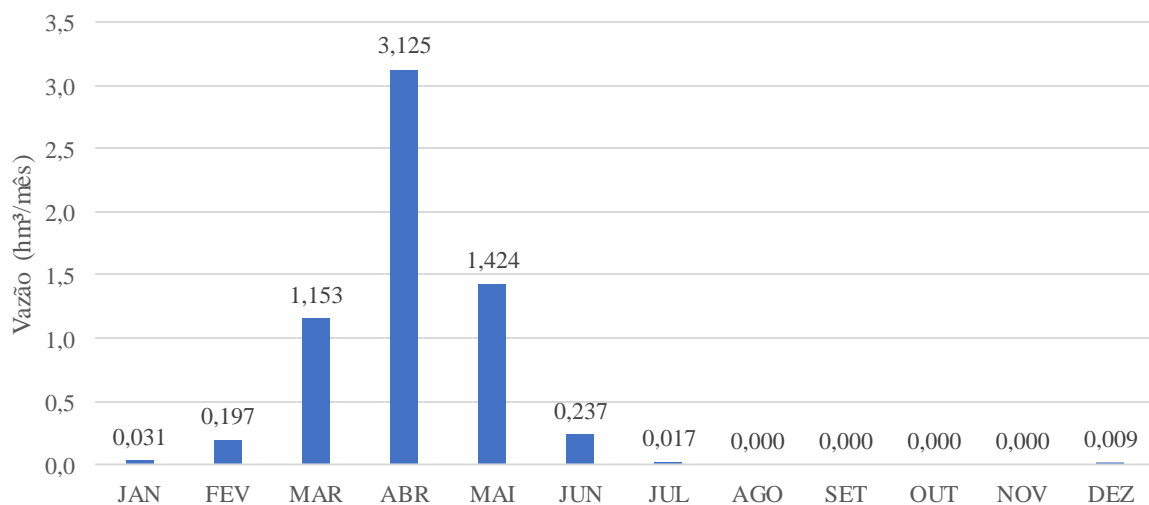
Gráfico 20 – Vazões médias mensais afluentes da bacia hidrográfica incremental do reservatório Flor do Campo.



Fonte: Própria autoria.

O vertimento do reservatório Colina começa no mês de fevereiro e se estende até o mês de junho, sendo abril o mesmo de maior volume, comportamento similar ao escoamento na bacia hidrográfica do reservatório Colina. Como esperado, o volume vertido entre os meses de julho a dezembro é nulo, devido ao escoamento afluente a este ser praticamente nulo nesse período.

Gráfico 21 – Vazões médias mensais sangradas do reservatório Colina.



Fonte: Própria autoria.

Na Tabela 16 são apresentados os parâmetros da vazão afluyente total do reservatório Flor do Campo, resultado da soma da série de vazões da bacia incremental do mesmo e a série de vazões sangradas do reservatório Colina.

Tabela 16 – Parâmetros da série de vazão afluyente total do reservatório Flor do Campo.

Garantias	80%	90%	95%	100%
Vazão afluyente Total (hm ³ /ano)	12,09	12,31	12,41	12,53
Desvio Padrão (hm ³ /ano)	15,75	15,84	15,88	15,95
Coefficiente de Variação	1,30	1,28	1,28	1,27

Fonte: Própria autoria.

Com base nos dados gerais do reservatório e na série de vazões afluentes ao reservatório foi possível simular os 5.000 anos de operação do reservatório Flor do Campo. Na Tabela 17 é possível identificar os valores de vazões regularizadas, sangria média e evaporação média, para as diferentes garantias analisadas. A Tabela 18 apresenta os resultados dessa simulação em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Tabela 17 – Resultado da simulação do reservatório Flor do Campo modificado.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	1,731	0,554	0,143	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	0,197	0,227	0,240	0,250
Evaporação Média (hm ³ /ano)	10,297	11,557	12,033	12,292
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,0549	0,0176	0,0045	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	0,0062	0,0072	0,0076	0,0079
Evaporação Média (m ³ /s)	0,3265	0,3665	0,3816	0,3898

Fonte: Própria autoria.

Tabela 18 – Balanço hídrico do reservatório Flor do Campo modificado.

Afluência Média (hm³/ano)	Capacidade (hm³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
12,31	105,00	8,53	80%	14,16%	1,60%	84,24%
			90%	4,50%	1,84%	93,66%
			95%	1,14%	1,93%	96,93%
			100%	0,00%	1,99%	98,01%

Fonte: Própria autoria.

De acordo com a Tabela 17 as vazões regularizadas apresentam uma grande variação entre as garantias de atendimento simuladas, com diminuição em torno de 68% e 74% entre as garantias de 80 e 90%, e entre 90 e 95%, respectivamente. Em relação a garantia de

100% a vazão regularizada é igual a zero, ou seja, o reservatório não capaz de disponibilizar uma vazão constante sem falhas de abastecimento. Com relação a sangria média as variações entre as diferentes garantias, a saber: aumento de 10,7% entre as garantias de 80 e 90%, aumento de 4,8% entre as garantias de 90 e 95% e aumento de 4,4% entre as garantias de 95 e 100%. Quanto a evaporação média as variações entre as diferentes garantias apresentam aumento de: 10,9% para as garantias de 80 e 90%, 4,9% entre as garantias de 90 e 95% e de 4,0% para as garantias de 95 e 100%.

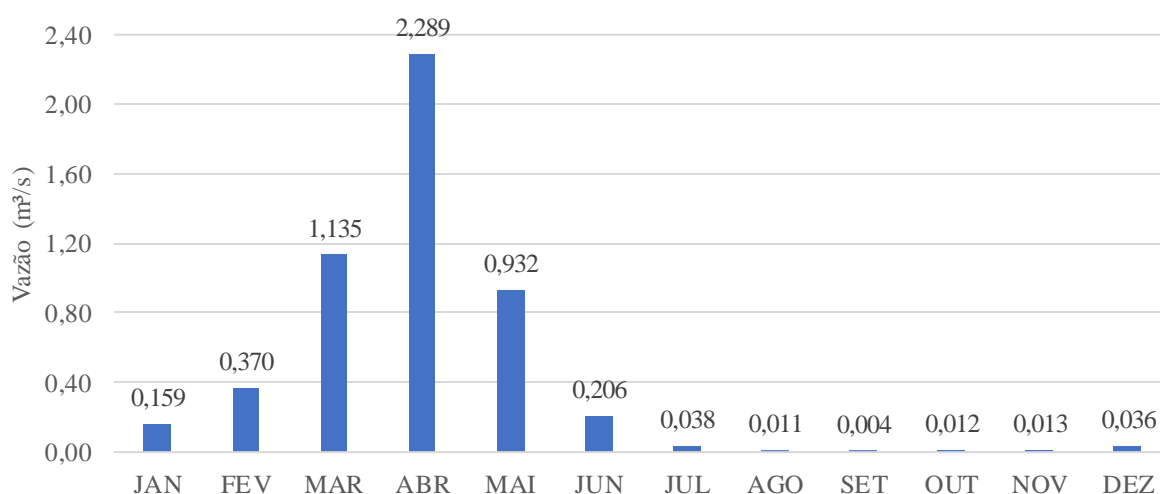
Com o fator de capacidade elevado presente na Tabela 18, onde a capacidade máxima do reservatório é mais que 8 vezes maior que a vazão afluyente média simulada, resultando em altos percentuais de evaporação e baixos percentuais regularizado e sangrado. Tomando como referência a garantia de 90%, somente 4,5% do volume afluyente ao reservatório é efetivamente regularizado e quase 94% é evaporado sobrando somente 1,8% do volume afluyente é vertido. Mesmo apresentando um bom percentual de regularização, o reservatório também apresenta um dos maiores percentuais de evaporação da RHSC tomando o ineficiente devido a esse alta percentual de evaporação.

5.2.1.2 *Cenário 2*

A série pseudo-histórica de vazões naturais afluentes ao reservatório Flor do Campo, 653,68 km², foi calculada através de modelos hidrológicos chuva x vazão. Esta conta com 107 anos, compreendidos entre 1912 a 2018. As vazões consideradas naturais são aquelas onde o regime hidrológico na bacia de contribuição não sofre mudança pela presença de reservatórios artificiais. Como estamos tratando de um sistema de reservatórios já existente, o cenário onde são usadas as vazões naturais são considerados hipotéticos. A série mencionada conta com os seguintes parâmetros: 5,20 m³/s (13,63 hm³/ano) de vazão média anual, 7,73 m³/s (20,34 hm³/ano) de desvio padrão e coeficiente de variação de 1,48. O coeficiente de escoamento obtido na bacia hidrográfica é de 3,43%. A variação sazonal das vazões naturais afluentes ao reservatório é apresentada no Gráfico 22.

O escoamento produzido na bacia natural do reservatório possui os maiores valores médios entre os meses de março a maio, sendo o mês de abril o que apresenta maior escoamento. Em termos de volume quase 84% do total anual esco nos meses mencionados. A vazões médias entre os meses de julho a dezembro são praticamente nulas.

Gráfico 22 – Vazões médias mensais afluentes da bacia natural do reservatório Flor do Campo.



Fonte: Própria autoria.

A partir dos dados gerais do reservatório e a série sintética de vazões mensais afluentes ao reservatório, gerada através do modelo hidrológico SIMRES, foi possível simular os 5.000 anos de operação do reservatório Flor do Campo. Os resultados obtidos da simulação para as vazões regularizadas, sangria média e evaporação média, para os níveis de garantia analisadas podem ser observadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultado da simulação do reservatório Flor do Campo natural no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm³/ano)	2,582	1,193	0,548	0,000
Sangria Média (hm³/ano)	0,445	0,493	0,517	0,540
Evaporação Média (hm³/ano)	10,849	12,039	12,633	13,150
Vazão Regularizada (m³/s)	0,0819	0,0378	0,0174	0,0000
Sangria Média (m³/s)	0,0141	0,0156	0,0164	0,0171
Evaporação Média (m³/s)	0,3440	0,3818	0,4006	0,4170

Fonte: própria Autoria.

As vazões regularizadas apresentam uma grande variação entre as garantias de atendimento simuladas, com diminuição em torno de 54% dos valores entre as garantias de 80 e 90% e 90 e 95%. Em relação a garantia de 100% a vazão regularizada é igual a zero, ou seja, o reservatório não capaz de disponibilizar uma vazão constante sem falhas de abastecimento.

Com relação a sangria média as variações entre as diferentes garantias possuem o seguinte comportamento: aumento de 10,7% entre as garantias de 80 e 90%, aumento de 4,8%

entre as garantias de 90 e 95% e aumento de 4,4% entre as garantias de 95 e 100%. Para a evaporação média as variações entre as diferentes garantias apresentam aumento: de 10,9% para as garantias de 80 e 90%, 4,9% entre as garantias de 90 e 95% e de 4,0% para as garantias de 95 e 100%.

Outra forma de se analisar o comportamento e eficiência de um reservatório é através do balanço hídrico, onde se verifica a divisão do volume afluente em regularização, sangria e evaporação em termos percentuais. A Tabela 20 apresenta os percentuais do balanço hídrico após a simulação.

Tabela 20 – Balanço hídrico do reservatório Flor do Campo natural.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
13,63	105,00	7,70	80%	18,61%	3,21%	78,19%
			90%	8,69%	3,59%	87,72%
			95%	4,00%	3,77%	92,23%
			100%	0,00%	3,94%	96,06%

Fonte: Própria autoria.

Tomando a garantia de 90% como referência para analisamos a eficiência do reservatório, observa-se que a vazão regularizada corresponde ao um percentual em torno de 8,7%, e o percentual do volume sangrado corresponde a cerca de 3,6%, demonstrando a influência do alto valor do fator de capacidade, que implica em baixos percentuais para o volume regularizado e sangrado. Logo, percentual restante corresponde ao volume evaporado que corresponde a 87,7%. Mesmo apresentando um dos maiores percentuais regularizado da RHSC o alto percentual de evaporação do reservatório demonstra ineficiência na operação do reservatório.

5.2.1.3 Comparação dos Cenários

Utilizando a garantia de 90% como referência, a vazão regularizada do reservatório Flor do Campo sem interferência do reservatório Colina, ou seja, compreendendo sua bacia hidrográfica natural (Cenário 2) apresenta uma capacidade de regularização de 1,193 hm³/ano, já sob a influência do reservatório Colina a vazão regularizada cai para 0,554 hm³/ano, representando uma redução de 53,5%.

Deve ressaltar que para o Cenário 1, que considera o reservatório em análise dentro de um sistema de reservatórios, os mesmos devem ser operados em conjunto. Logo, a real

capacidade de regularização do Cenário 1 é soma das vazões regularizadas dos reservatórios que compõe esse sistema.

Na Tabela 21 são apresentadas as vazões regularizadas tanto do sistema Flor do Campo (reservatórios Flor do Campo + Colina) como do reservatório Flor do Campo Hipotético, para as diferentes garantias simuladas.

Tabela 21 – Comparação da regularização do reservatório Flor do Campo.

Garantias	80%	90%	95%	100%
Sistema Flor do Campo (hm ³ /ano)	2,482	0,895	0,342	0,000
Flor do Campo Hipotético (hm ³ /ano)	2,582	1,193	0,548	0,000

Fonte: Própria autoria.

Em termos de volume, o reservatório Flor do Campo sendo operado de forma isolada, ou seja, sem que sua bacia hidrográfica tenha sido modificada, apresenta um melhor resultado para a vazão regularizada nas diferentes garantias, ou seja, a presença dos reservatórios a montante ao reservatório Flor do Campo resulta na perda da capacidade de regularização de aproximadamente 4% para a garantia de 80%, 25% para a garantia de 90% e de 37% para a garantia de 95%.

5.2.2 Reservatório Carnaubal

Resultado do terceiro barramento no rio Poti a partir de sua nascente, à montante deste encontra-se os reservatórios Flor do Campo e Colina. A bacia hidrográfica natural do reservatório Carnaubal abrange uma área de 2.059,81 km², sendo que em torno de 31,7% dessa área é controlada pelo reservatório Flor do Campo. Logo a bacia hidrográfica do Flor do Campo é de 653,68 km² e a área livre ou bacia incremental do reservatório Carnaubal é de 1.406,13 km².

5.2.2.1 Cenário 1

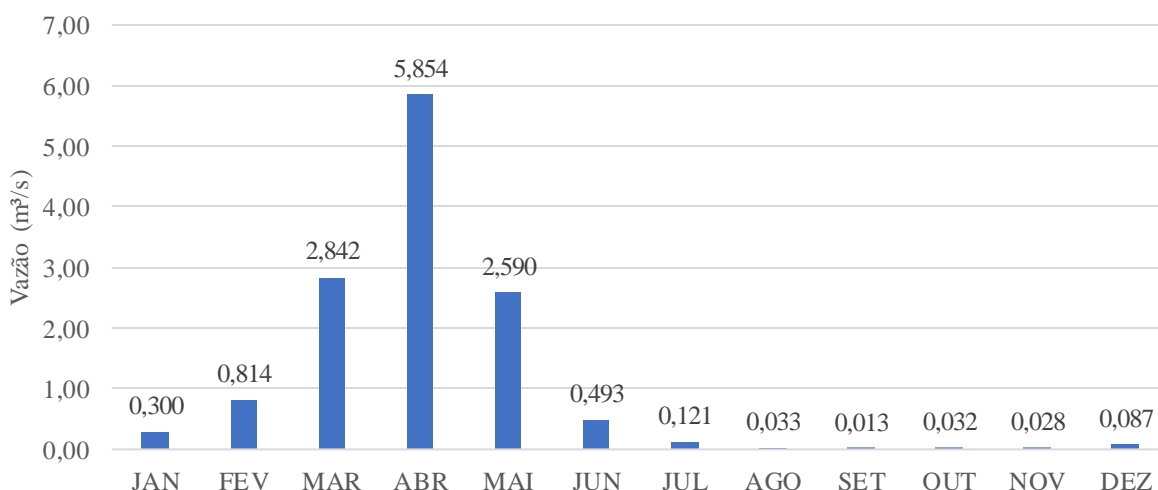
No sistema hídrico do reservatório Carnaubal, a vazão afluente é calculada como a soma da vazão calculada na área livre da sua bacia hidrográfica e a série de vazões sangradas pelo reservatório à montante, no caso o Flor do Campo.

Fundamentada em modelos hidrológicos de chuva x vazão, a série pseudo-histórica de vazão afluente da área livre do reservatório Carnaubal, 1.406,13 km², contado com 107 anos

de precipitações médias, entre os anos de 1912 a 2018, a série de vazão apresenta os seguintes parâmetros: vazão média anual é de 13,21 m³/s (34,61 hm³/ano), desvio padrão de 20,31 m³/s (53,48 hm³/ano) e um coeficiente de variação de 1,53, valor dentro do esperado para a região Semiárida Brasileiro. Já para o coeficiente de escoamento da bacia hidrográfica é de 3,88%. A variação sazonal das vazões afluentes ao reservatório é apresentada no Gráfico 23.

Os meses de maiores médias de escoamento na bacia hidrográfica são março, abril e maio, em termos de volume afluente ao reservatório 85,3% do volume anual se concentra nesses meses. As vazões médias entre os meses de agosto a dezembro são praticamente nulas.

Gráfico 23 – Vazões médias mensais afluentes da bacia incremental do reservatório Carnaubal.



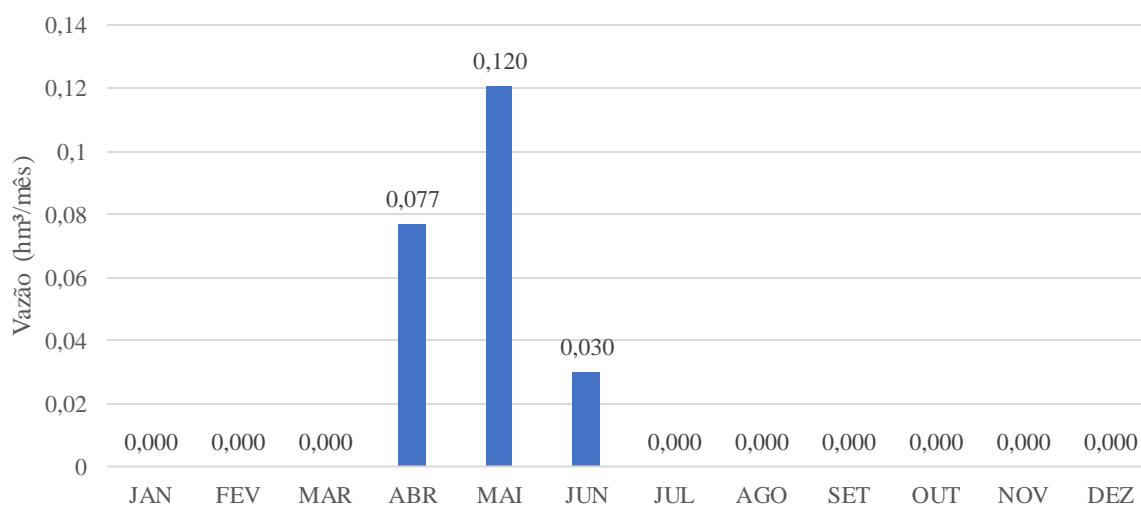
Fonte: Própria autoria.

A série de vazão sangrada do reservatório Flor do Campo obtida após a simulação realizada no item 5.2.1.1. Logo a vazão média sangrada é de 0,227 hm³/ano para a garantia de 90%. No Gráfico 24 é apresentado a variação sazonal das vazões sangrada do reservatório Flor do Campo para a garantia de 90%. Comportamento similar é foi obtido para as demais garantias.

Devido a seu alto fator de capacidade o reservatório Flor do Campo possuir baixos volume vertido, apresentado vertimento somente os meses de abril, maio e junho correspondente aos meses com maiores escoamento da bacia hidrográfica do reservatório flor do Campo.

Na Tabela 22 são apresentados os parâmetros da vazão afluente total ao reservatório Carnaubal, resultado da soma da série de vazões da bacia incremental do mesmo e a série de vazões sangradas do reservatório Flor do Campo.

Gráfico 24 – Vazões médias mensais sagradas do reservatório Flor do Campo.



Fonte: Própria autoria.

Tabela 22 – Parâmetros da série de vazão afluente total do reservatório Carnaubal modificado.

Garantias	80%	90%	95%	100%
Vazão afluente Total (hm³/ano)	34,80	34,83	34,84	34,85
Desvio Padrão (hm³/ano)	55,62	55,70	55,74	55,77
Coefficiente de Variação	1,59	1,60	1,60	1,60

Fonte: Própria autoria.

Com base nos dados gerais do reservatório e na série de vazões afluente ao reservatório foi possível simular os 5.000 anos de operação do reservatório Carnaubal. Na Tabela 23 é possível identificar os valores de vazões regularizadas, sangria média e evaporação média para as diferentes garantias analisadas. A Tabela 23 apresenta os resultados da simulação em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Tabela 23–Resultado da simulação do reservatório Carnaubal modificado no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm³/ano)	6,157	3,436	2,107	0,000
Sangria Média (hm³/ano)	12,457	13,280	13,739	14,514
Evaporação Média (hm³/ano)	16,674	18,225	19,031	20,336
Vazão Regularizada (m³/s)	0,195	0,109	0,067	0,0000
Sangria Média (m³/s)	0,395	0,421	0,436	0,460
Evaporação Média (m³/s)	0,529	0,578	0,603	0,645

Fonte: Própria autoria.

Tabela 24 – Balanço hídrico do reservatório Carnaubal modificado.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
35,05	72,30	2,06	80%	17,45%	35,30%	47,25%
			90%	9,83%	38,01%	52,16%
			95%	6,04%	39,39%	54,57%
			100%	0,00%	41,65%	58,35%

Fonte: Própria autoria.

De acordo com a Tabela 23 as vazões regularizadas apresentam grandes variações entre as garantias de atendimento simuladas, com uma redução de aproximadamente 44,2% entre as garantias de 80 e 90% e uma diminuição em torno de 38,6% entre as garantias de 90 e 95%. E para a garantia de 100% as vazões regularizadas são iguais a zero, logo o reservatório não possui a capacidade de disponibilizar uma vazão constante sem falhas de abastecimento. Para a sangria média e evaporação médias apresenta pequenas variações entre as garantias simuladas, sendo a maior variação entre as garantias de 80 e 90%, que são de: 6,6% para a sangria média e de 9,3% para evaporação média.

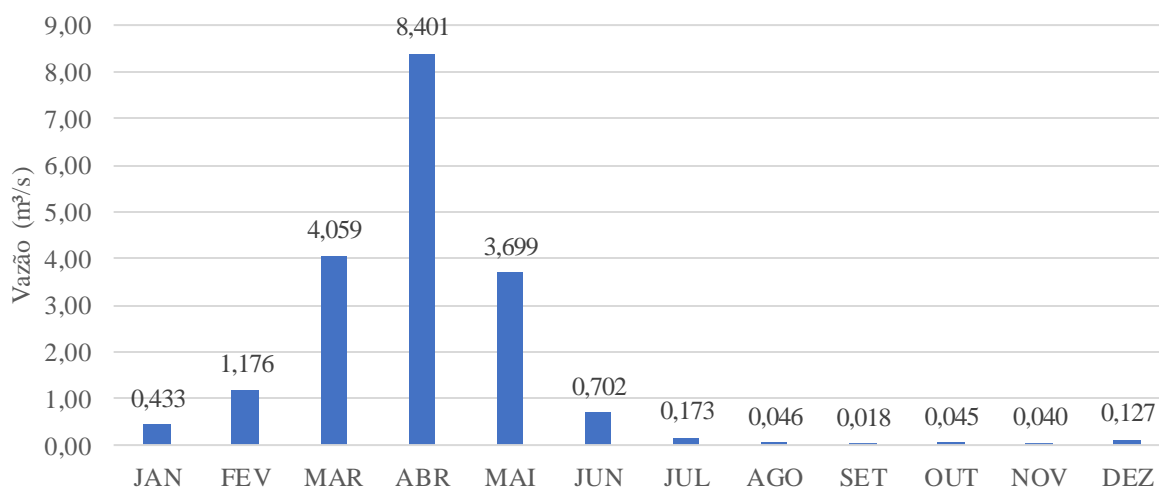
Para analisamos a eficiência que o reservatório demonstra, é importante entender as trocas entre os volumes regularizado, sangrado e evaporado, analisando os resultados da garantia de referência que é de 90% presente na Tabela 24. Temos que quase 10% do volume afluente do reservatório se transforma em vazão regularizada, que para o Semiárido Brasileiro é um valor consideravelmente bom, já o volume sangrado corresponde a 38% do volume afluente. Com isso o reservatório só perde aproximadamente 52% do volume afluente para a evaporação. De forma geral os percentuais apresentados após a simulação do reservatório demonstram uma excelente eficiência do reservatório.

5.2.2.2 Cenário 2

Fundamentada em modelos hidrológicos de chuva x vazão, a série pseudo-histórica de vazão natural afluentes do reservatório Carnaubal, 2.059,81 km², contado com 107 anos, entre os anos de 1912 a 2018. As vazões consideradas naturais são aquelas onde o regime hidrológico na bacia de contribuição não sofre mudança pela presença de reservatórios artificiais. Como estamos tratando de um sistema de reservatórios já existente, o cenário onde são usadas as vazões naturais são considerados hipotéticos. Tal série conta com as seguintes características: vazão média anual é de 18,92 m³/s (49,58 hm³/ano), desvio padrão de 28,93

m³/s (76,15 hm³/ano) e um coeficiente de variação de 1,52, valor dentro do esperado para a região Semiárida Brasileiro. Já para o coeficiente de escoamento da bacia hidrográfica é de 3,80%. A variação sazonal das vazões naturais afluentes ao reservatório é apresentada no Gráfico 25.

Gráfico 25 – Vazões médias mensais afluentes da bacia natural do reservatório Carnaubal.



Fonte: Própria autoria.

Os meses de maiores médias de escoamento na bacia hidrográfica natural são março, abril e maio, em termos de volume afluente ao reservatório 85,4% do volume anual se concentra nesses meses. As vazões médias entre os meses de agosto a novembro são praticamente nulas.

Segundo os dados gerais do reservatório e na série sintética fragmentada de vazões afluentes ao reservatório gerada através do modelo hidrológico SIMRES foi possível simular os 5.000 anos de operação do reservatório Carnaubal. Os resultados obtidos da simulação para as vazões regularizadas, sangria média e evaporação média, para os níveis de garantia analisadas podem ser observadas na Tabela 25. Na Tabela 26 são apresentados os resultados em termos percentuais para uma análise no balanço hídrico do reservatório.

De acordo com a Tabela 25 as vazões regularizadas apresentam grandes variações entre as garantias de atendimento simuladas, com uma redução de aproximadamente 42,8% entre as garantias de 80 e 90% e uma diminuição em torno de 36,8% entre as garantias de 90 e 95%. E para a garantia de 100% a vazão regularizada é igual a zero, logo o reservatório não é capaz de disponibilizar uma vazão constante sem falhas de abastecimento. Para a sangria média e evaporação médias apresenta pequenas variações entre as garantias simuladas, sendo a maior

variação entre as garantias de 80 e 90%, que são de: 6,3% para a sangria média e de 10,4% para evaporação média.

Tabela 25 – Resultado da simulação do reservatório Carnaubal natural no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	9,054	5,176	3,270	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	23,257	24,727	25,545	27,118
Evaporação Média (hm ³ /ano)	17,984	19,872	20,827	22,471
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,2871	0,1641	0,1037	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	0,7375	0,7841	0,8100	0,8599
Evaporação Média (m ³ /s)	0,5703	0,6301	0,6604	0,7126

Fonte: Própria autoria.

Tabela 26 – Balanço hídrico do reservatório Carnaubal natural.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
49,58	73,20	1,48	80%	18,00%	46,68%	35,76%
			90%	10,40%	49,68%	39,92%
			95%	6,59%	51,46%	41,95%
			100%	0,00%	54,69%	45,31%

Fonte: Própria autoria.

Para analisamos a eficiência que o reservatório demonstra, é importante entender as trocas entre os volumes regularizado, sangrado e evaporado, analisando os resultados da garantia de referência que é de 90% presente na Tabela 26. Temos que quase 11% do volume afluente do reservatório se transforma em vazão regularizada, já o volume sangrado corresponde a quase 50% do volume afluente. Com isso o reservatório só perde cerca 40% do volume afluente para a evaporação. De forma geral os percentuais apresentados após a simulação do reservatório demonstram uma excelente eficiência do reservatório.

5.2.2.3 Comparação dos cenários

Utilizando a garantia de 90% como referência, a vazão regularizada do reservatório Carnaubal sem interferência dos reservatórios do Flor do Campo e Colina, ou seja, compreendendo sua bacia hidrográfica natural (cenário 2) apresenta uma capacidade de regularização de 5,176 hm³/ano, já sob a influência dos reservatórios a montante a vazão regularizada cai para 3,436 hm³/ano, representando uma redução de 33,6%.

Deve ressaltar que para o cenário 1, que considera o reservatório em análise dentro de um sistema de reservatório, logo os mesmos devem ser operados em conjunto. Logo a real capacidade de regularização do cenário 1 é soma das vazões regularizadas dos reservatórios que compõe esse sistema.

Na Tabela 27 é apresentado as vazões regularizadas tanto do sistema Carnaubal (reservatório Carnaubal + Sistema Flor do Campo) como do reservatório Carnaubal Hipotético, para as diferentes garantias simuladas.

Tabela 27 – Comparação da regularização do reservatório Carnaubal.

Garantias	80%	90%	95%	100%
Sistema Carnaubal (hm³/ano)	8,639	4,331	2,449	0,000
Carnaubal Hipotéticos (hm³/ano)	9,054	5,176	3,270	0,000

Fonte: Própria autoria.

Em termos de volume, o reservatório Carnaubal sendo operado de forma isolada, ou seja, sem que sua bacia hidrográfica tenha sido modificada, apresenta um melhor resultado para a vazão regularizada para as diferentes garantias, ou seja, a presença dos reservatórios a montante ao reservatório Carnaubal resulta na perda da capacidade de regularização de aproximadamente 4% para a garantia de 80%, 23% para a garantia de 90% e de 25% para a garantia de 95%.

5.2.3 Barragem do Batalhão

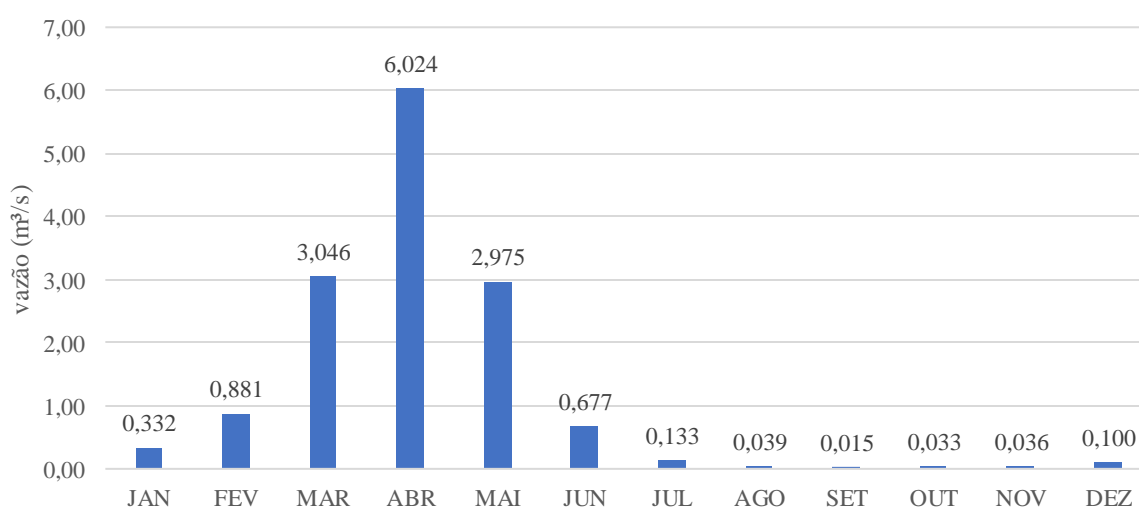
Localizado no encontro do rio Poti e riacho do Meio, a Barragem do Batalhão tem à montante os reservatórios Barra Velha, Carnaubal, Cupim e Jaburu II. A bacia hidrográfica natural corresponde a uma área de drenagem de 5.959,82 km², sendo que 67,8% da sua bacia é controlado pelos reservatórios a montante, correspondendo a 4.048,51 km², assim a área livre ou bacia incremental é de 1.911,31 km².

5.2.3.1 Cenário 1

No sistema hídrico da Barragem do Batalhão, a vazão afluente é calculada como a soma da vazão calculada na área livre da sua bacia hidrográfica e a série de vazões sangradas pelos reservatórios à montante, no caso são o Barra Velha, Cupim, Jaburu II e o sistema Carnaubal.

A série pseudo-histórica de vazões afluente da área livre da Barragem do Batalhão, 1.911,31 km², foi baseada em modelo hidrológico de chuva x vazão, conta com 107 anos de dados abrangendo os anos de 1912 a 2018, apresentando as seguintes características: vazão média anual de 14,29 m³/s (37,46 hm³/ano), desvio padrão de 20,93 m³/s (55,13hm³/ano), coeficiente de variação de 1,45 e o coeficiente de escoamento de 3,24%. Ambos coeficientes estão dentro dos padrões do Semiárido Brasileiro. A variação sazonal das vazões incrementais a Barragem do Batalhão é apresentada no Gráfico 26.

Gráfico 26 – Vazões médias mensais afluentes da bacia incremental da Barragem do Batalhão.



Fonte: Própria autoria.

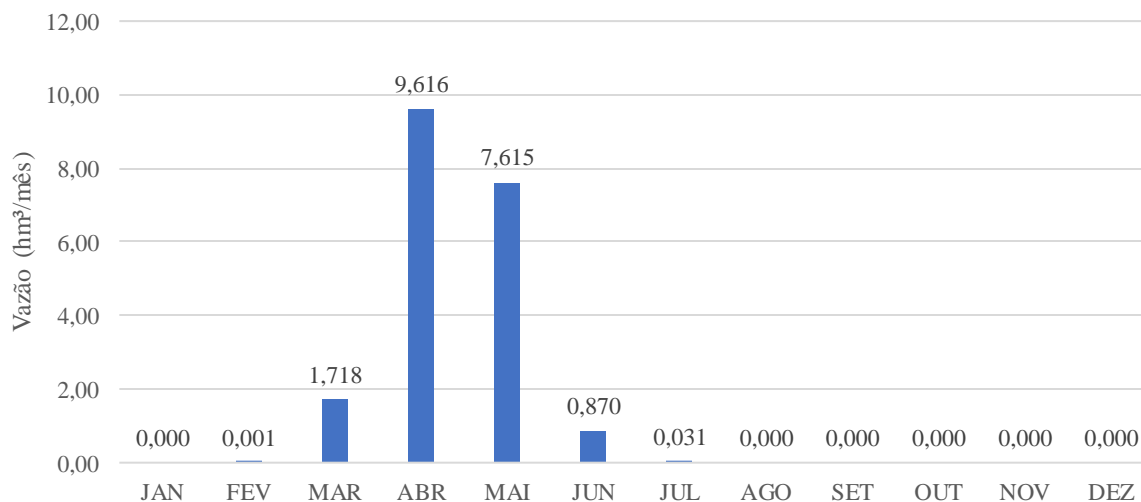
O escoamento produzido na bacia incremental tem suas maiores concentração nos meses de março a maio, sendo abril o mês de maior escoamento, em termos percentuais 84,2% do volume anual escoar nesses meses citados. Para os meses entre agosto e novembro o escoamento é praticamente nulo.

A série de vazões sangrado dos reservatórios a montante obtida após a simulação realizadas nos itens 5.1.4, 5.1.5, 5.1.6 e 5.2.2.1. Logo a vazão média sangrada dos reservatórios a montante é de 19,85 hm³/ano para a garantia de 90%. No Gráfico 27 é apresentado a variação sazonal das vazões sangradas dos reservatórios Barra Velha, Carnaubal, Cupim e Jaburu II para a garantia de regularização de 90%, onde para as outras garantias se tem um comportamento similar.

Os meses de maior vertimento dos reservatórios são abril, maio e junho, sendo o mês de abril o de maior volume sangrado, tal comportamento é similar ao escoamento na bacia hidrográfica dos reservatórios à montantes. Como esperado, o volume vertido entre os meses

de julho a dezembro é nulo, devido ao escoamento afluente a este ser praticamente nulo nesse período.

Gráfico 27 – Vazões médias mensais sangradas dos reservatórios à montante.



Fonte: Própria autoria.

Na Tabela 28 são apresentados os parâmetros da vazão afluente total a Barragens do Batalhão, resultado da soma da série de vazões da bacia incremental do mesmo e a série de vazões sangradas dos reservatórios Barra Velha, Cupim, Jaburu II e o sistema Carnaubal.

Tabela 28 – Parâmetros da série de vazão afluente total da Barragem do Batalhão modificado.

Garantias	80%	90%	95%	100%
Vazão afluente Total (hm³/ano)	56,58	57,66	58,29	59,12
Desvio Padrão (hm³/ano)	78,98	79,89	80,42	81,10
Coefficiente de Variação	1,39	1,38	1,38	1,37

Fonte: Própria autoria.

Com base nos dados gerais do reservatório e na série de vazões afluentes ao reservatório foi possível simular os 5.000 anos de operação da Barragem do Batalhão. Na Tabela 29 é possível identificar os valores de vazões regularizadas, sangria média e evaporação média para as diferentes garantias simuladas.

As vazões regularizadas apresentam grandes variações entre as garantias simuladas, do qual a para as garantias de 80 e 90% há uma diminuição de aproximadamente de 43,8% e para as garantias de 90 e 95% há a redução em torno de 47,5%. A Barragem do Batalhão não apresenta vazão regularizada para a garantia de 100%, ou seja, a barragem não é capaz de disponibilizar uma vazão constante sem falhas de abastecimento. As variações da sangria média

entre as garantias simuladas são pequenas e para a evaporação média apresenta variações de 12,4% para as garantias de 80 e 90% e para as demais são insignificantes devido ao seu baixo percentual.

Tabela 29 – Resultado da simulação da Barragem do Batalhão modificado no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	1,525	0,856	0,449	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	54,368	55,949	56,912	58,137
Evaporação Média (hm ³ /ano)	0,788	0,886	0,935	0,981
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,048	0,027	0,014	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	1,724	1,774	1,805	1,844
Evaporação Média (m ³ /s)	0,025	0,028	0,030	0,031

Fonte: Própria autoria.

Para analisamos a eficiência que o reservatório demonstra, é importante entender as trocas entre os volumes regularizado, sangrado e evaporado. A Tabela 30 apresenta os resultados da simulação em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Tabela 30 – Balanço hídrico da Barragem do Batalhão modificado.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
57,66	1,64	0,03	80%	2,69%	95,92%	1,39%
			90%	1,48%	96,98%	1,54%
			95%	0,77%	97,63%	1,60%
			100%	0,00%	98,34%	1,66%

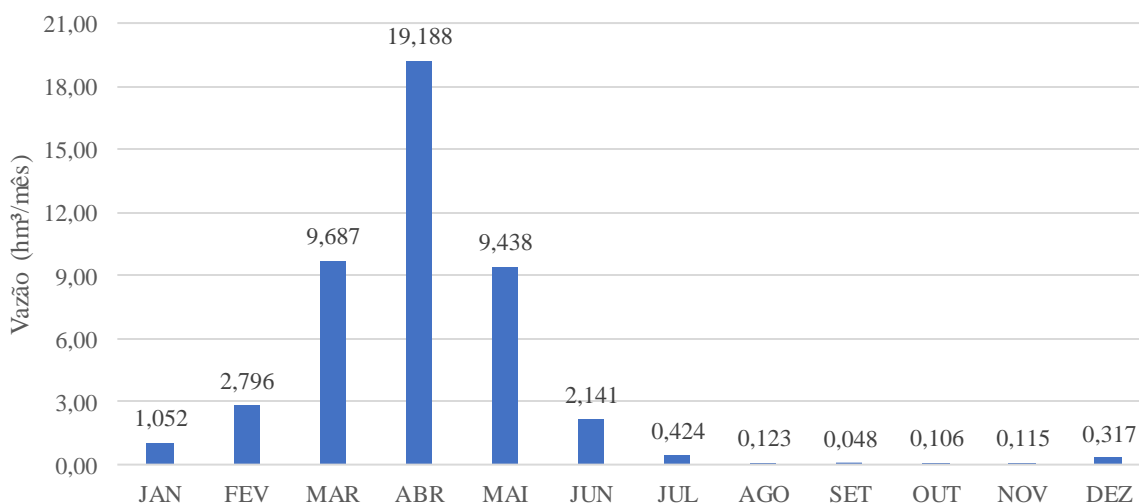
Fonte: Própria autoria.

Tomando a garantia 90% como referência, percebe que quase 97% do volume afluente excede a capacidade de acumulação do reservatório, principalmente em virtude da sua função, que é elevar o nível d'água para a captação, logo possuindo uma baixa capacidade de acumulação refletindo também no fator de capacidade próximo de zero. O restante do volume afluente se dividi em volume regularizado e evaporado, ambos com um percentual em torno de 1,5%. Como sua principal função é diferente dos demais reservatórios estratégicos da RHSC, logo não é possível analisar sua eficiência pelo seu balanço hídrico, conduzido a Barragem apresenta uma boa capacidade de regularização que se pode considerar com eficiente.

5.2.3.2 Cenário 2

Baseada em modelos hidrológicos de chuva x vazão a série pseudo-histórica de vazões naturais afluentes da Barragem do Batalhão. Esta conta com 107 anos, compreendidos entre 1912 a 2018. As vazões consideradas naturais são aquelas onde o regime hidrológico na bacia de contribuição não sofre mudança pela presença de reservatórios artificiais. Como estamos tratando de um sistema de reservatórios já existente, o cenário onde são usadas as vazões naturais são considerados hipotéticos. A série mencionada conta com as seguintes características: vazão média anual de 45,44 m³/s (119,11 hm³/ano), desvio padrão de 66,10 m³/s (174,06 hm³/ano), coeficiente de variação de 1,45 e um coeficiente de escoamento de 3,28%. A variação sazonal das vazões afluente a Barragem do Batalhão é apresentada no Gráfico 28.

Gráfico 28 – Vazões médias mensais afluentes da bacia natural da Barragem do Batalhão.



Fonte: Própria autoria.

O escoamento produzido na bacia hidrográfica natural da Barragem do Batalhão possui os maiores valores médios entre os meses de março a maio, sendo o mês de abril com o maior volume escoado. Em termos de volume afluente a Barragem 84,3% do volume anual se concentra nesses meses.

A partir dos dados gerais do reservatório e na série sintéticas de vazões mensais afluentes a barragem, gerada através do modelo hidrológico SIMRES, foi possível simular os 5.000 anos de operação da Barragem do Batalhão. Na Tabela 31 é possível identificar os valores de vazões regularizadas, sangria média e evaporação média para as diferentes garantias analisadas.

Tabela 31 – Resultado da simulação da Barragem do Batalhão natural no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	1,758	1,254	0,674	0,000
Sangria Média (hm ³ /ano)	118,145	118,538	119,026	119,633
Evaporação Média (hm ³ /ano)	0,818	0,877	0,938	0,994
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,0557	0,0398	0,0214	0,0000
Sangria Média (m ³ /s)	3,7464	3,7588	3,7743	3,7935
Evaporação Média (m ³ /s)	0,0259	0,0278	0,0297	0,0315

Fonte: Própria autoria.

As vazões regularizadas apresentam variações considerável entre as garantias simuladas, para as garantias de 80 e 90% há uma redução em torno de 28,6% e para as garantias de 90 e 95% a uma diminuição cerca de 42,2%. A Barragem do Batalhão não é capaz de regularizar para uma garantia de 100%. Os valores de evaporação média apresentam um aumento de em média de 6,5% entre as garantias, já em relação a sangria média as variações são muito pequenas entre as garantias simuladas.

Para analisamos a eficiência que o reservatório demonstra, é importante entender as trocas entre os volumes regularizado, sangrado e evaporado. A Tabela 32 apresenta os resultados da simulação em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Tabela 32 – Balanço hídrico da Barragem do Batalhão natural.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
119,11	1,64	0,01	80%	1,46%	97,87%	0,68%
			90%	1,04%	98,23%	0,73%
			95%	0,56%	98,66%	0,78%
			100%	0,00%	99,18%	0,82%

Fonte: Própria autoria.

Tomando a garantia 90% como referência, percebe que aproximadamente 98% do volume afluente excede a capacidade de acumulação do reservatório, principalmente em virtude da sua função, que é elevar o nível d'água para a captação e não acumular grandes volumes, logo possuindo uma baixa capacidade de acumulação refletindo também no fator de capacidade praticamente zero. Outro fator interessante é que o menor percentual do balanço hídrico é da evaporação ocorrida que representa uma perda de água de somente 0,73% do volume afluente

e que a capacidade de regularização da Barragem é em torno de 1% do volume afluyente, logo o aproveitamento d'água é maior que a perda d'água.

Como sua principal função é diferente dos demais reservatórios estratégicos da RHSC, logo não é possível analisar sua eficiência pelo seu balanço hídrico, contudo a Barragem apresenta uma boa capacidade de regularização que se pode considerar com eficiente.

5.2.3.3 Comparação dos cenários

Pegando a garantia de 90% como referência, a vazão regularizada da Barragem do Batalhão sem interferência dos reservatórios a montante, ou seja, compreendendo sua bacia hidrográfica natural (cenário 2) apresenta uma capacidade de regularização de 1,254 hm³/ano, já sob a influência dos reservatórios a montante a vazão regularizada cai para 0,856 hm³/ano, representando uma redução de 31,7%.

Deve ressaltar que para o cenário 1, que considera o reservatório em análise dentro de um sistema de reservatório, logo os mesmos devem ser operados em conjunto. Logo a real capacidade de regularização do cenário 1 é soma das vazões regularizadas dos reservatórios que compõe esse sistema.

Na Tabela 33 é apresentado as vazões regularizadas tanto do sistema Batalhão (sistema Carnaubal e os reservatórios Barra Velha, Cupim e Jaburu II) como da Barragem do Batalhão Hipotético, para as diferentes garantias simuladas.

Tabela 33 – Comparação da regularização da Barragem do Batalhão.

Garantias	80%	90%	95%	100%
Sistema Barragem Batalhão (hm ³ /ano)	4,952	2,346	0,941	0,000
Barragem do Batalhão Hipotética (hm ³ /ano)	1,758	1,254	0,674	0,000

Fonte: Própria autoria.

Em termos de volume, a Barragem do Batalhão sendo operado em conjunto com os demais reservatórios, apresenta um melhor resultado para a vazão regularizada para as diferentes garantias, ou seja, a presença dos reservatórios a montante a Barragem do Batalhão resulta no ganho da capacidade de regularização de aproximadamente 181% para a garantia de 80%, 87% para a garantia de 90% e de 40% para a garantia de 95%.

5.2.4 Reservatório Fronteiras

Localizado próximo à Divisa do Estado, o reservatório Fronteiras é o último barramento no leito do rio Poti localizado na RHSC, diante disso os demais reservatórios da região hidrográfica estão à montante do Fronteiras. A bacia hidrográfica natural corresponde a uma área de drenagem de 10.248,84 km², sendo que quase 64% da sua bacia natural é controlado pelos reservatórios São José III, Sucesso e Realejo e o sistema Barragem do Batalhão, assim a área livre ou bacia incremental corresponde a 3.690,91 km².

5.2.4.1 Cenário 1

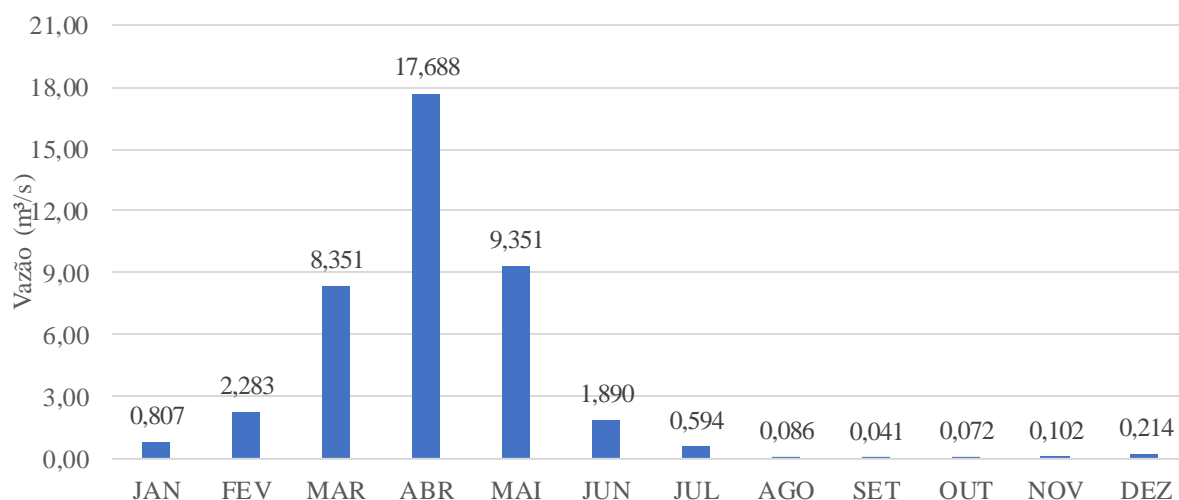
No sistema hídrico do reservatório Fronteiras, a vazão afluente é calculada como a soma da vazão calculada na área livre da sua bacia hidrográfica e a série de vazões sangradas pelos reservatórios à montante.

Baseada em modelo hidrológico de chuva x vazão, a série pseudo-histórica de vazões gerada na área livre do reservatório Fronteiras, 3.690,91 km², consta com 107 anos abrangendo os anos de 1912 a 2018, apresentando os seguintes parâmetros: vazão média anual de 41,48 m³/s (108,90 hm³/ano), desvio padrão de 53,26 m³/s (140,41 hm³/ano), coeficiente de variação de 1,28 e um coeficiente de escoamento de 4,36%. A variação sazonal da série de vazões incrementais do reservatório Fronteiras é apresentada no Gráfico 29.

O escoamento produzido na bacia incremental do reservatório Fronteiras acontece entre os meses de dezembro a julho, sendo que nos meses entre março a maio ocorre 85,3% do volume anual afluente. Já em relação aos meses entre agosto e novembro o escoamento é praticamente nulo.

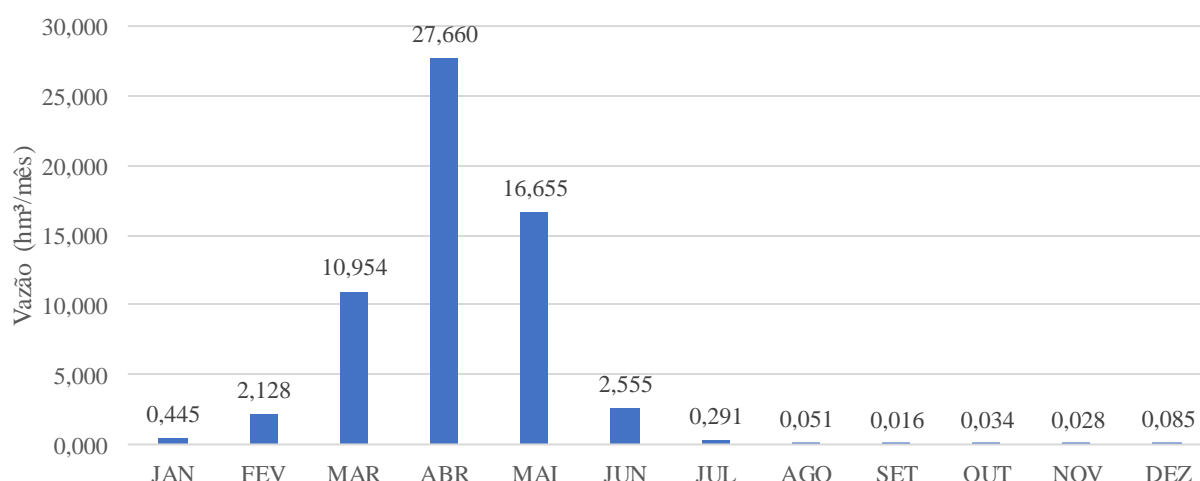
A série de vazões sangrado dos reservatórios à montante obtido após a simulação realizadas nos itens 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 e 5.2.3.1. A vazão média sangrada dos reservatórios a montante é de 60,90 hm³/ano para a garantia de 90%. No Gráfico 30 é apresentado a variação sazonal das vazões sangradas dos reservatórios Realejo, São José III e Sucesso e a Barragem do Batalhão para a garantia de 90%, observa-se que para as demais garantias o comportamento das séries vertidas é similar.

Gráfico 29 – Vazões médias mensais afluentes da bacia incremental do reservatório Fronteiras.



Fonte: Própria autoria.

Gráfico 30 – Vazões médias mensais sangrados reservatórios à montante.



Fonte: Própria autoria.

Analisando o Gráfico 30 observa que os vertimento dos reservatórios à montante do Fronteiras ocorre entre os meses de janeiro a junho, sendo os maiores valores nos meses de março a maio, sendo que entre os meses de julho a dezembro são praticamente nulos. Valem ressaltar que a Barragem do Batalhão possui grande influência nessa série de vazão sangradas, visto que a mesma é responsável por aproximadamente 83% do volume sagrado.

Na Tabela 34 são apresentados os parâmetros da vazão afluente total ao reservatório Fronteiras, resultado da soma da série de vazões da bacia incremental do mesmo e a série de vazões sangradas dos reservatórios São José III, Sucesso e Realejo e o sistema Barragem do Batalhão.

Tabela 34 – Parâmetros da série de vazão afluyente total do Fronteiras modificado no SIMRES.

Garantias	80%	90%	95%	100%
Vazão afluyente Total (hm ³ /ano)	170,41	172,06	173,01	174,27
Desvio Padrão (hm ³ /ano)	166,24	166,73	167,02	167,41
Coefficiente de Variação	0,97	0,97	0,96	0,96

Fonte: Própria autoria.

Ao analisamos a Tabela 34, percebe que o Coeficiente de Variação, do reservatório Fronteiras é em média de 0,97 um valor atípico da região (para a região Nordeste é entre 1,2 e 1,6). Tal valor deve ser por causa da Barragem do Batalhão que controla 58% da bacia hidrológica natural do Fronteiras, e que apresenta uma vazão média sangrada de 55,95 hm³/ano que representa 32,5% da vazão afluyente ao reservatório, assim servindo como um amortecedor da variabilidade temporal da vazão afluyente ao Fronteiras.

Com base nos dados gerais do reservatório e na série de vazão afluyente ao reservatório foi possível simular os 5.000 anos de operação do reservatório Fronteiras. Na Tabela 35 é possível identificar os valores de vazões regularizadas, sangria média e evaporação média para as diferentes garantias simuladas.

Tabela 35 – Resultado da simulação do reservatório Fronteiras modificado no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm ³ /ano)	83,809	67,485	55,743	17,427
Sangria Média (hm ³ /ano)	16,226	19,557	22,421	34,010
Evaporação Média (hm ³ /ano)	74,481	86,555	95,489	122,866
Vazão Regularizada (m ³ /s)	2,658	2,140	1,768	0,553
Sangria Média (m ³ /s)	0,515	0,620	0,711	1,078
Evaporação Média (m ³ /s)	2,362	2,745	3,028	3,896

Fonte: Própria autoria.

O reservatório Fronteiras é o único da RHSC que é capaz de disponibilizar uma vazão regularizada sem qualquer falha, isso é representado pelo valor de 0,553 m³/s de vazão para a garantia de 100%. Os resultados de vazão regularizado, sangria média e evaporação média apresenta variações considerável para os diferentes níveis de garantias, entre as garantias 80 e 90% a: uma diminuição de 19,5% na regularização, um aumento de 20,5% na sangria e aumento de 16,2% na evaporação, entre as garantias de 90 e 95% a: uma diminuição de 17,4% na regularização, um aumento de 14,6% na sangria e aumento de 10,3% na evaporação, entre

as garantias de 95 e 100% a: uma diminuição de 68,7% na regularização, um aumento de 51,7% na sangria e aumento de 28,7% na evaporação.

Para analisamos a eficiência que o reservatório demonstra, é importante entender as trocas entre os volumes regularizado, sangrado e evaporado. A Tabela 36 apresenta os resultados da simulação em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório.

Tabela 36 – Balanço hídrico do reservatório Fronteiras modificado.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
172,06	488,18	2,83	80%	48,02%	9,30%	42,68%
			90%	38,87%	11,27%	49,86%
			95%	32,10%	12,91%	54,99%
			100%	10,00%	19,51%	70,49%

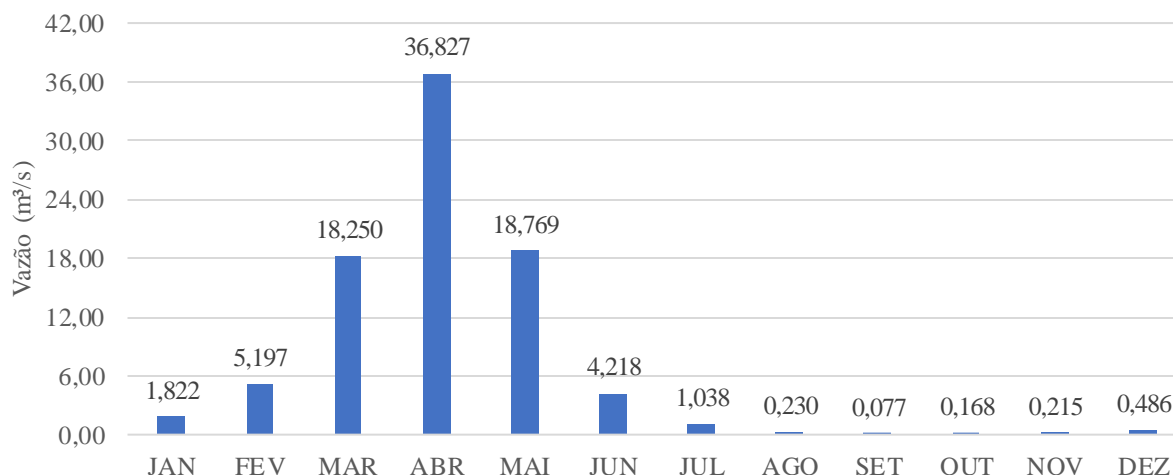
Fonte: Própria autoria.

Tomando a garantia de 90% como referência, percebe que quase 39% do volume afluente ao reservatório é efetivamente regularizado, um percentual extremamente alta para um reservatório na região semiárida e com rios intermitentes como afluentes, consequentemente tornando-o altamente eficiente em termos de disponibilidade hídrica. Outro ponto positivo é que somente 50% do volume afluente se perde por evaporação. Portanto cerca de 11% do volume afluente é vertido retornando ao leito do rio Poti.

5.2.4.2 Cenário 2

Baseada em modelo hidrológico de chuva x vazão, a série pseudo-histórica de vazões naturais afluentes do reservatório Fronteiras consta com 107 anos de dados abrangendo os anos de 1912 a 2018. As vazões consideradas naturais são aquelas onde o regime hidrológico na bacia de contribuição não sofre mudança pela presença de reservatórios artificiais. Como estamos tratando de um sistema de reservatórios já existente, o cenário onde são usadas as vazões naturais são considerados hipotéticos. A série mencionada conta com as seguintes características: vazão média anual de 87,30 m³/s (228,89 hm³/ano), desvio padrão de 122,99 m³/s (324,05 hm³/ano), coeficiente de variação de 1,40 e um coeficiente de escoamento de 3,56%. Os valores dos coeficientes estão condizentes com os valores obtidos para a região semiárida nordestina sobre embasamento cristalino. A variação sazonal das vazões naturais afluentes do reservatório Fronteiras é apresentada no Gráfico 31.

Gráfico 31 – Vazões médias mensais afluentes da bacia natural do reservatório Fronteiras.



Fonte: Própria autoria.

O escoamento produzido na bacia natural do reservatório Fronteiras acontece entre os meses de janeiro a julho, sendo que nos meses entre março a maio ocorre 84,6% do volume anual afluente. Já em relação aos meses entre agosto e dezembro o escoamento é praticamente nulo.

Com base nos dados gerais do reservatório e na série sintéticas de vazão mensais afluente ao reservatório, gerada através do modelo hidrológico SIMRES, foi possível simular os 5.000 anos de operação do reservatório Fronteiras. Os resultados obtidos da simulação para as vazões regularizadas, sangria média e evaporação média, para os níveis de garantia analisadas podem ser observadas na Tabela 37.

Tabela 37 – Resultado da simulação do reservatório Fronteiras natural no SIMRES.

Variáveis	Garantias			
	80%	90%	95%	100%
Vazão Regularizada (hm³/ano)	78,579	55,859	41,640	4,655
Sangria Média (hm³/ano)	73,877	81,200	86,458	102,482
Evaporação Média (hm³/ano)	85,804	97,523	105,298	125,624
Vazão Regularizada (m³/s)	2,492	1,771	1,320	0,147
Sangria Média (m³/s)	2,342	2,575	2,741	3,249
Evaporação Média (m³/s)	2,721	3,092	3,339	3,983

Fonte: Própria autoria.

O reservatório Fronteiras é o único da RHSC que é capaz de disponibilizar uma vazão regularizada sem qualquer falha, isso é representado pelo valor de 0,147 m³/s de vazão

para a garantia de 100%. Os resultados de vazão regularizado, sangria média e evaporação média apresenta variações considerável para os diferentes níveis de garantias, entre as garantias 80 e 90% a: uma diminuição de quase 29% na regularização, um aumento de quase 10% na sangria e aumento de 13,6% na evaporação, entre as garantias de 90 e 95% a: uma diminuição de 25,4% na regularização, um aumento de 6,4% na sangria e aumento de quase 8% na evaporação, entre as garantias de 95 e 100% a: uma diminuição de 88,8% na regularização, um aumento de 18,5% na sangria e aumento de 19,3% na evaporação.

Para analisamos a eficiência que o reservatório demonstra, é importante entender as trocas entre os volumes regularizado, sangrado e evaporado. A Tabela 39 apresenta os resultados da simulação em termos percentuais do balanço hídrico do reservatório. Os valores e percentuais dos volumes regularizado, sangrado e evaporado para a garantia de 90% obtidos das simulações do sistema Fronteiras estão disponíveis na Tabela 38.

Tabela 38 – Balanço hídrico do reservatório Fronteiras natural.

Afluência Média (hm ³ /ano)	Capacidade (hm ³)	Fator de Capacidade	Garantia	Volumes		
				Regularizado	Sangrado	Evaporado
228,89	488,18	2,13	80%	32,98%	31,01%	36,01%
			90%	23,81%	34,61%	41,57%
			95%	17,84%	37,04%	45,12%
			100%	2,00%	44,03%	53,97%

Fonte: Própria autoria.

Tomando a garantia de 90% como referência, percebe que quase 24% do volume afluyente ao reservatório é efetivamente regularizado, um percentual extremamente alta para um reservatório na região semiárida e com rios intermitentes como afluentes, consequentemente tornando-o altamente eficiente em termos de disponibilidade hídrica. Outro ponto positivo é que somente 41,6% do volume afluyente se perde por evaporação, valor esse relativamente baixo para a região. Portanto cerca de 34,6% do volume afluyente é vertido retornando ao leito do rio Poti.

5.2.4.3 Comparação dos cenários

Um caso curioso, as vazões regularizadas no cenário 1 são maiores que no cenário 2, mesmo possuindo uma vazão afluyente menor, isso pode ser explicado pelo coeficiente de variação da vazão afluyente que para o cenário 2 é de 1,40 e o cenário 1 de 0,97.

Pegando a garantia de 90% como referência, a vazão regularizada do reservatório Fronteiras sem interferência dos reservatórios a montante, ou seja, compreendendo sua bacia hidrográfica natural (cenário 2) apresenta uma capacidade de regularização de 55,859 hm³/ano, já sob a influência dos reservatórios a montante a vazão regularizada sobe para 67,485 hm³/ano, representando um aumento de 20,8%.

Deve ressaltar que para o cenário 1, que considera o reservatório em análise dentro de um sistema de reservatório, logo os mesmos devem ser operados em conjunto. Logo a real capacidade de regularização do cenário 1 é soma das vazões regularizadas dos reservatórios que compõe esse sistema.

Na Tabela 39 é apresentado as vazões regularizadas tanto do sistema Fronteiras (sistema Batalhão e os reservatórios Realejo, São José III e Sucesso) como do reservatório Fronteiras Hipotético, para as diferentes garantias simuladas.

Tabela 39 – Comparação da regularização do reservatório Fronteiras.

Garantias	80%	90%	95%	100%
Sistema Fronteiras (hm ³ /ano)	89,352	70,046	56,866	17,427
Fronteiras Hipotético (hm ³ /ano)	78,579	55,859	41,640	4,655

Fonte: Própria autoria.

No caso do reservatório Fronteiras é caso particular, porque somente os resultados da simulação do reservatório no Cenário 1 já é superior aos resultados da simulação no Cenário 2, isso ocorre possivelmente por causa da Barragem do Batalhão. Somando os resultados obtidos das simulações dos demais reservatórios que compõem o sistema, se tem um ganho na capacidade de regularização de aproximadamente 13% para a garantia de 80%, 25% para a garantia de 90%, 36% para a garantia de 95% e 274% na garantia de 100%.

6 CONCLUSÃO

O estudo avaliou a disponibilidade hídrica em termos de vazões regularizadas dos reservatórios estratégicos da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), bem como a influência dos reservatórios à montante sobre a capacidade de regularização de um reservatório.

Primeiramente foram calculadas as séries de vazões pseudo-históricas afluentes aos reservatórios, através do modelo chuva x vazão SMAP – mensal, calibrado em estudo anterior para a região. Os coeficientes de escoamento nas bacias hidrográficas dos reservatórios estudados apresentaram pequenas variações entre si. Os coeficientes de variação das séries de vazões afluentes da maioria dos reservatórios apresentaram valores dentro do esperado região semiárida brasileira, com exceção de quatro situações nos cenários simulados. A relação entre as áreas das bacias hidrográficas e as médias das vazões afluentes geradas possuem um coeficiente de correlação de 99%, representando que o bom ajuste dos dados indicando que as séries de vazões são válidas.

A geração de séries sintéticas de vazões afluentes tem o intuito de entrar na fase de equilíbrio, assim obtendo uma vazão regularizada com variação nula. As séries sintéticas geradas para um horizonte de simulação de 5.000 anos através do método de Monte Carlo, apresenta uma pequena alteração (abaixo de 1%) em seus parâmetros (média e desvio padrão) em relação as séries pseudo-históricas de vazões afluentes.

Para as simulações dos reservatórios foi utilizado o modelo hidrológico SIMRES. A RHSC apresenta uma capacidade de regularização, com 90% de garantia, de 218,5 l/s (sem o reservatório Fronteiras, que se encontra em fase de construção). Deste valor cerca de 50% é proveniente do reservatório Carnaubal, 16% do reservatório Barra Velha e aproximadamente 12% da Barragem do Batalhão, representando os três reservatórios com a maior capacidade de regularizar vazão.

Com a inclusão do reservatório Fronteiras a capacidade de regularização da RHSC é ampliada para 2.358,5 l/s, com 90% de garantia. O Fronteiras representará cerca de 91% da vazão total regularizada.

Através da análise do balanço hídrico de um reservatório por meio do resultado da vazão regularizada, sangrada e evaporada, é possível avaliar a eficiência deste reservatório. Logo, o reservatório São José III apresentara-se extremamente ineficiente, pois além de possuir baixos percentuais de regularizações apresentam percentuais de evaporação acima dos 90%. Os reservatórios como Flor do Campo, Jaburu II e Realejo apresenta percentuais de evaporação

acima de 90% e os reservatórios Cupim e Sucesso apresentam percentuais de regularização abaixo de 1%, assim sendo considerados como reservatórios ineficientes.

Já os demais reservatórios: Barra Velha, Barragem do Batalhão, Carnaubal e Colina; apresenta bons percentuais de regularização e de evaporações, demonstrando uma boa eficiência no comportamento dos reservatórios. O reservatório Fronteiras que também apresenta bons percentuais de regularização e evaporação, é o único reservatório da RHSC a ter a capacidade de regularizar vazões para a garantia de 100%, 553 l/s, que o torna extremamente eficiente.

Ao analisar o impacto dos reservatórios a montante na capacidade de regularização de vazões do sistema de reservatórios, percebeu-se que os reservatórios Flor do Campo e Carnaubal apresentam perda da capacidade de regularização na presença de reservatórios à montante, quando comparados com a situação hipotética da existência apenas do Flor do Campo e Carnaubal, respectivamente, sem reservatórios à montante. Já a Barragem do Batalhão e o reservatório Fronteiras apresentam ganhos nas suas capacidades de regularizações.

Tais resultados demonstram que a capacidade de regularização da RHSC aumentará substancialmente com a construção do reservatório Fronteiras, trazendo mais segurança hídrica para a população. Sugere-se ainda um estudo mais aprofundado em relação aos reservatórios Fronteiras e a Barragem do Batalhão, qual a real influência que um pequeno reservatório à montante que controla a maior parte da bacia hidrográfica natural tem sobre o reservatório a jusante.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ARAÚJO, John Kenedy. **Método dos Fragmentos Aplicado a Rios Intermitentes: Avaliação dos Erros Introduzidos no Cálculo da Disponibilidade de Reservatórios**. Mestrado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará, UFC, Brasil. 1991.
- CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. **A história das Barragens no Brasil: séculos XIX, XX e XXI**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.
- CAMPOS, José Nilson. **Dimensionamento de Reservatórios: O Método do Diagrama Triangula de Regularização**/ Nilson Campos. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2015.
- CAMPOS, José Nilson. STUART, 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.
- CAMPOS, José Nilson B. VIEIRA NETO, João. QUEIROZ, Eveline Alves de. **Impacto acumulativo da pequena açudagem: Estudo de caso do açude Várzea do Boi, em Tauá-Ce**. In: V SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2000, NATAL. ANAIS DO V SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE. NATAL: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICO, 2000, V.1 P.231 -237.
- CAMPOS, José Nilson Bezerra. NETO, João Fenardes Vieira. MARTINS, Eduardo Sávio. **Vulnerabilidade de Sistemas Hídricos: Um estudo de caso**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 2, n. 2, p. 45 – 57. Jul/dez 1997.
- CARVALHO, L. H. DE. **Curso de Barragens de Terra**. DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRAS AS SECAS. v. 1. P. 7 - 9. Fortaleza, 1983.
- 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.
- CEARÁ, Governo Estadual. **Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos**. Fortaleza, 2018.
- CEARÁ, Governo Estadual. **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Fortaleza, 2005.

CEARÁ, Governo Estadual. Decreto nº 23.068, de 11 de fevereiro de 1994. **Regulamenta o controle técnico das obras de oferta hídrica e dá outras providências.** 1994.

CIRILO, José Almir. MONTENEGRO, Suzana M. G. L. CAMPOS, José Nilson B. **A questão da água no semiárido brasileiro.** In: BICUDO, C. E. M., TUNDISI, J. G. e SHEUINSTAHL, M. C. B. (editores). *Água do Brasil: Análise estratégicas*, v. 1. P. 81-91. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010.

COELHO, Paulo Pinheiro. **Calculo da Disponibilidade Hídrica de Pequenos Açudes do Estado do Ceará.** 2000. Monografia (Graduação em Eng. Civil) – Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2000.

COGERH; FUCENE, **Portal Hidrológico do Ceará.** Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/> Acesso em: 10/01/2021.

COGERH; **Atlas de Recursos Hídricos do Ceará.** Disponível em: <http://atlas.cogerh.com.br/> Acesso em: 12/01/2021.

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

FILHO, Ernani Cleiton Cavalcante, **Regularização de Vazões em Reservatórios Através dos Modelos Mensais e Bi sazonal: A duração da estação Seca e a Proposta de Evaporação Equivalente.** 2007. 87 f. Dissertação (Mestre) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

FUNCEME, **Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos hídricos.** Disponível em: <http://www.funceme.br/app-calendario/anual/regioes/media/2020> Acesso em 25/11/2021.

GHEYI, Hans Raj. PAZ, Vital Pedro da Silva. MEDEIROS, Salomão de Sousa. GALVÃO, Carlos de Oliveira. Editores. **Recursos hídricos em regiões semiáridas.** Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. 258 p. 2012.

IPECE, **Instituto de Pesquisa e Estratégias Econômica do Ceará.** Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12.htm> Acesso em: 18/01/2022.

INMET, **Normas Climatológicas Do Brasil.** Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais> Acesso em: 15/01/2021.

LEITÃO, Francisco Thibério Pinheiro. CAMPOS, José Nilson. **A conceituação de um reservatório equivalente usando o método do Diagrama Triangular de Regularização: Aplicação a bacia do rio Banabuiú.** In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017, Florianópolis. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSO HÍDRICO, 2017.

LUCENA, Leandro Ricardo R. STOSIC, Tatijana. **Temperatura do Nordeste brasileiro via análise de lacunaridade.** Revista Sigmae, Alfenos, v.2, n.3, p. 76-80. 2013.

PESSOA, Fernando Mendes de Paula. **Uso do Software SimRes na Avaliação Hidrológica da Bacia do Jaguaribe: uma Análise Comparativa.** Monografia (Bacharel de Eng. Civil) – Departamento de engenharia Hidráulica e Ambiental- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2018.

MALVEIRA, Vanda Tereza Costa. GUNTNER, Andreas. ARAÚJO, José Carlos de. **Disponibilidade de água sob impacto da pequena açudagem: caso da Bacia hidrográfica Alto-Jaguaribe, Ce.** In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2012, Fortaleza. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSO HÍDRICO, 2012.

NOGUEIRA, Marcelo Leão. **Construção de cenários de regime de chuvas no estado do Ceará: aplicabilidade de análise de Fourier.** 2011. 174 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, p. 19, 2011.

ROCHA, Erika da Junta Teixeira. FILHO, Francisco de Assis de Sousa. STUDART, Ticiania Marinho de Carvalho. LUNA, Renata Mendes. **Avaliação de Nível de Saturação da Açudagem na Bacia Hidrográfica do Rio Acaraú- Ceará.** Ver. Tecnol. Fortaleza, v. 33. n. 2. p. 122-132, dez/2012.

ROSA, Caio Soares. **Operação de Reservatórios do Sistema de abastecimento dos Municípios da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús.** 2019. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús. Crateús, 2019.

STUDART, Ticiania M. de Carvalho. CAMPOS, José Nilson B. **Incertezas nas Estimativas da Vazão Regularizada por um Reservatório.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Fortaleza, vol.6, n.3, p. 81-94, Jul/Set 2001.

STUDART, Ticiania M. de Carvalho. **Análise de Incertezas na Determinação de Vazões Regularizadas em Climas Semiáridos.** 2000. 151 f. Tese Doutorado - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2000.

SRH-CE. **Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará.** Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/apresentacao/> Acesso em: 19/01/22.

VIEIRA, Vicente P. P. B. **Desafios da Gestão Integrada de Recursos Hídrico no Semiárido.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Fortaleza, vol. 8, n. 2, p. 7-17. Abr/Jun 2003.

VIEIRA, Vicente P. P. B. **Sustentabilidade do Semiárido Brasileiro: Desafios e Perspectivas.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Fortaleza, vol. 7, n. 4, p. 105-112. Out/Dez 2002.

SUDENE. **Perdas por Evaporação e Infiltração em Pequenos Açudes.** Recife, 1989.