



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MOACIR LUCAS BESERRA DE MELO

**ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS
COM SENSORIAMENTO REMOTO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES
DE CRATEÚS**

CRATEÚS

2022

MOACIR LUCAS BESERRA DE MELO

ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS COM
SENSORIAMENTO REMOTO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE
CRATEÚS

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)

M486a Melo, Moacir Lucas Beserra de.
Análise da disponibilidade hídrica em reservatórios artificiais com sensoriamento remoto na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús / Moacir Lucas Beserra de Melo. – 2022.
48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.

1. Volumetria. 2. Açudagem. 3. Disponibilidade Hídrica. I. Título.

CDD 620

MOACIR LUCAS BESERRA DE MELO

ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS COM
SENSORIAMENTO REMOTO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE
CRATEÚS

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.

Aprovado em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Profa. Dra. Larissa Granjeiro Lucena
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Ana Núbia e Zacarias, e aos meus
irmãos, Antnia, Mariana e Gentil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Ana Núbia, meu pai Zacarias, minhas irmãs Antônia de Maria e Mariana, e ao meu irmão Gentil, que sempre me apoiaram e estiveram do meu lado nos momentos mais difíceis. Meus sobrinhos, Paulo Zacarias, Eduardo e Matheus, que me deram mais um motivo para desejar vencer, e meus cunhados, Rosa, Robério e Felipe que para mim são como meus irmãos.

Aos meus amigos queridos Gleycianne e Raul, que desde o início me mostraram que família vai além de laços de sangue, e Lucas Lima, Daniel, Thamires, Caio e Lucas Marques, por serem meus companheiros e estarem comigo durante estes anos.

A minha querida amiga Érica Melo, por ter acreditado na minha capacidade e ter me incentivado sempre. Aos meus amigos que me acompanharam nas últimas disciplinas, Valter, Karol, Eliab e Fco das Chagas, sem os quais tudo teria sido mais difícil. As pessoas importantes nesta jornada, Vanessa, Cidrack, Filipe, João Paulo, Izabel, Samuel, Maria Clara, José Wilson, todos vocês fazem parte da minha história e ajudaram a me tornar quem sou hoje.

Ao meu orientador, Professor Alan Michell, que me incentivou, inspirou e acreditou no meu potencial.

Ao DNOCS, representado por Emanuele Rodrigues, que possibilitou o acesso aos dados desta instituição e que foram de extrema importância para a realização deste trabalho.

A Universidade Federal do Ceará, pelas oportunidades e ensinamentos. Sempre foi um sonho me graduar nesta instituição. Poder fazer parte do Campus de Crateús e do seu desenvolvimento foi um privilégio.

“Nem tudo que é ouro fulgura, nem todos os que vagueiam estão perdidos.”

(John Ronald Ruel Tolkien, 1954).

RESUMO

O acesso às informações de volumes de reservatórios é de ampla importância para um planejamento de recursos hídricos eficaz. Os reservatórios públicos de maior porte já demonstraram que podem não ser capazes de atender às demandas da comunidade ante longos períodos de estiagem. A Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús - RHSC apresenta a necessidade do conhecimento dos volumes e da localização dos reservatórios não monitorados para garantir a segurança hídrica da região. A utilização de métodos indiretos de medição de volumes com o uso de sensoriamento remoto como fonte de dados pode suprir a ausência de tais informações. Métodos simplificados e modificados de cálculo de volumes acumulados a partir de características de espelhos d'água já apresentam uma margem de acurácia maior, trazendo confiabilidade aos valores encontrados, como o método proposto por Pereira *et al* (2019), utilizado com dados fornecidos periodicamente pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME podem apresentar a situação hídrica em espaços temporais singulares, trazendo a realidade dos reservatórios não monitorados para o planejamento dos recursos hídricos da região. De acordo com as informações da FUNCEME para o ano de 2008, havia 363 espelhos d'água na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús - RHSC, dos quais 90 foram selecionados para os cálculos de volume acumulado por se tratarem de reservatórios de interesse social, tendo sido a construção de alguns deles financiada pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS como parte da política de fomento à açudagem no semiárido nordestino. O presente trabalho demonstrou a acurácia da equação de Molle modificada por Pereira *et al* (2019) para os reservatórios característicos da RHSC, a usabilidade das informações da FUNCEME (2008), os volumes não monitorados em estoque, a localização espacial destes volumes e a proporção de acordo com a população de cada município inserido no estudo. Apresentou-se também a classificação dos reservatórios da RHSC e o índice geral de saturação da açudagem para sub bacias da região, demonstrando quais áreas tem uma maior fragilidade hídrica com o processo. Pode-se constatar que a região conta com reservatórios que podem suprir as necessidades da sociedade, além de auxiliar na segurança hídrica e democratização da água na região.

Palavras-chave: Volumetria; Açudagem; Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The access to information on reservoir volumes is widely important for effective water resources planning. Only the larger reservoirs may no longer be capable of meeting the needs of the community in drought periods. The Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús have the need to better know the volumes and location of unmonitored reservoirs to guarantee water security in the region. The use of indirect methods of volume measurement along the use of remote sensing as a data source can supply the absence of such information. Simplified and modified methods of volume mensuration from the characteristics of water surface geometry already shows a larger accuracy margin, bringing more reliability to the obtained values, as is the method proposed by Pereira *et al* (2019), using the data periodically provided by FUNCEME, we can show the hydric situation in a given singular space time, demonstrating the reality of such unmonitored reservoirs to the hydric resources planning of the region. According to the FUNCEME data to the year of 2008, there was 363 reservoirs with areas larger than 5 hectare, of which 90 was selected to accumulated volume calculations, for them being of social interest, being the construction of some of them subsidized by the DNOCS as a part of the promotion to the dam construction in the Brazilian Northeast semi-arid. This given work demonstrated the accuracy of the Molle modified equation by Pereira *et al* (2019) to the characteristic reservoir of the RHSC, the usability of the FUNCEME (2008) data, the unmonitored accumulated volumes in stock, the spatial localization of the given volumes and the proportion to the populations of the cities inserted in the study. It was also shown the classification of the region reservoirs and the General Index of the Dam Saturation for the subbasins of the RHSC, demonstrating which areas have a larger hydric fragility within the process. We can verify that the region has unmonitored reservoirs that can help supply the need of the society, besides assisting with the hydric safety and water democratization.

Keywords: Volumetry; Dams; Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espelhos maiores que 5ha na RHSC	24
Figura 2 - Espelhos detectados por Pekel <i>et al</i> (2016) na RHSC.	25
Figura 3 - Etapas da metodologia.	27
Figura 4 - Regiões hidrográficas do estado do Ceará.	28
Figura 5 - Divisão da RHSC em sub bacias.....	30
Figura 6 - Mapa de distribuição de Vol. (m ³) / Município.	38
Figura 7 - Mapa de distribuição de Vol. (m ³) / Habitantes.....	39
Figura 8 - Mapa de distribuição dos volumes proporcionais por reservatórios.	41
Figura 9 - Mapa de Saturação de açudagem para a RHSC.	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama de caixa dos volumes de projeto e volumes calculados.....	32
Gráfico 2 - Dispersão de áreas em hectares dos espelhos FUNCEME/GWSE.	34
Gráfico 3 - Distribuição em diagrama de caixa para os valores de K mod calculados.....	35
Gráfico 4 - Distribuição em diagrama de caixa para os valores de α mod calculados.	36
Gráfico 5 - Disponibilidade hídrica por município.....	40
Gráfico 6 - Diagrama de caixa dos volumes.....	42
Gráfico 7 - Comparação ponto a ponto dos volumes obtidos.....	42
Gráfico 8 - Relação Volume x Volume acumulado percentual dos reservatórios da RHSC.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espelhos d'água detectados no Ceará e na RHSC.	23
Tabela 2 - Níveis de saturação de bacias.....	26
Tabela 3 - Classificação do PERH (1992) para reservatórios de água.	26
Tabela 4 - Reservatórios com dados oficiais presentes na RHSC.	31
Tabela 5 - Valores estatísticos para α mod e K mod.	35
Tabela 6 - Distribuição de volume acumulado por cidades e variação de resultados obtidos. .	36
Tabela 7 - Distribuição de volume acumulado por cidades e variação de resultados obtidos. .	38
Tabela 8 - Volumes por classe de reservatório.	43
Tabela 9 - Volumes de reservatórios classificados por município.	43
Tabela 10 - Volume total acumulado e área ocupada por classe de reservatório.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
TIF	<i>Tagged Image File Format</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
GIS	<i>Geographical Information System</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
PERH	Plano de Recursos Hídricos
PLANERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
IOCS	Inspetoria de Obras Contra as Secas
GWSE	Global Water Surface Explorer
RHSC	Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús
SHP	<i>Shapefile</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volume
H	Altura da lâmina d'água
K	Coefficiente de abertura
α	Coefficiente de forma
S	Área da bacia hidráulica
V0	Volume inicial de referência
A0	Área inicial de referência
α mod	Coefficiente de forma modificado
K mod	Coefficiente de abertura modificado
A max	Área máxima da bacia hidráulica em m ²
P max	Perímetro máximo da bacia hidráulica em metros
D	Diâmetro do reservatório
π	Pi
λ	A max/ p max
hm ³	Hectômetros cúbicos
m ³	Metros cúbicos
%	Porcentagem
ha	Hectares

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos	18
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>18</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>18</i>
1.4	Delimitação	19
1.5	Roteiro temático	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Método de Molle	20
2.2	Método de Molle modificado	21
2.3	Base de dados de espelhos d'água	22
<i>2.3.1</i>	<i>Dados da FUNCEME</i>	<i>22</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Dados do GWSE</i>	<i>24</i>
2.4	Avaliação do grau de saturação da açudagem	25
3	METODOLOGIA	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	Análise dos dados dos reservatórios	31
<i>4.1.1</i>	<i>Acurácia da equação para a RHSC</i>	<i>31</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Espelhos dos reservatórios</i>	<i>32</i>
<i>4.1.3</i>	<i>Comparação das áreas obtidas</i>	<i>33</i>
4.2	Coefficientes geométricos	34
4.3	Disponibilidade Hídrica	36
<i>4.3.1</i>	<i>Validação do levantamento da FUNCEME para a RHSC</i>	<i>36</i>
<i>4.3.2</i>	<i>Volumes acumulados não monitorados</i>	<i>37</i>
<i>4.3.3</i>	<i>Volume não monitorado disponível per capita</i>	<i>38</i>
<i>4.3.4</i>	<i>Localização proporcional dos volumes não monitorados acumulados</i>	<i>40</i>
<i>4.3.5</i>	<i>Volumes obtidos com coeficientes geométricos médios</i>	<i>41</i>
4.4	Classificação dos reservatórios na RHSC	42
4.5	Índice do grau de saturação da açudagem	44
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O semiárido do nordeste brasileiro enfrenta, desde o início de sua ocupação, diversos obstáculos, dentre eles, o da escassez de água para o seu próprio desenvolvimento. Os barramentos de córregos e rios foram artificios utilizados pelas populações sertanejas, desde a colonização deste ambiente, para mitigar a falta deste recurso. Permitindo assim, o prolongamento do tempo de permanência da água em pontos onde a sua necessidade aumentava conforme as populações cresciam e as cidades se desenvolviam.

Os açudes sempre foram os meios empregados pelos sertanejos para neutralizar os efeitos das secas, desde os primeiros tempos da colonização. Com o seu bom senso prático, compreenderam que era esse o único meio de suprir a falta de rios perenes e de lagos ou lagoas permanentes e, agulhoados pela imperiosa lei da necessidade, iniciaram as represas, trabalho que afinal tornou-se o primeiro e mais necessário em qualquer situação nascente. (JOFILLY, 1923 apud MOLLE, 1994a).

Segundo Molle (1994a), o primeiro regime de fomento à açudagem se deu após as secas na década de 1820, o qual foi interrompido pelo abuso e desvio de verbas, além do início de uma situação climática mais favorável. No início do século 20, com o incentivo por meio de políticas públicas, e com a criação do órgão que viria a se tornar o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS, a construção de açudes foi novamente incentivada com a realização de estudos de campo e projetos, fornecimento de verbas federais e uma fiscalização mais presente (PINHEIRO, 2004). O órgão fomentava a açudagem particular e pública, incluindo pequenos e médios reservatórios, porém não havia um plano de crescimento hidrológicamente sustentável, tendo em vista que não eram realizados estudos sobre o impacto destes reservatórios nas bacias hidrográficas (CAMPOS, 2012).

Atualmente, uma das ações realizadas para atenuar os impactos dos longos períodos de estiagens é o Plano Estadual de Recursos Hídricos – PLANERH (2018), em uma escala maior, que também é realizado em um contexto regional, como o Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús – PRH RHSC (2021). Esses planos são executados buscando promover um melhor entendimento das características e necessidades das respectivas regiões hidrográficas, assim como ter um melhor aproveitamento dos volumes acumulados.

A RHSC está localizada na porção oeste do estado e é amplamente atingida pelos efeitos das estiagens prolongadas e pelo regime de chuvas sazonal. As chuvas se concentram

no primeiro semestre do ano, apresentando valores praticamente nulos para precipitação do segundo semestre.

Um dos grandes desafios para o planejamento hídrico da RHSC é a determinação de volumes armazenados em reservatórios não monitorados, sendo em sua maioria inseridos em áreas particulares. Apesar de, por vezes, não serem considerados estratégicos em um planejamento macro, estes possuem uma grande relevância para as ações localizadas, pertinentes ao contexto socioeconômico da região, principalmente em termos de usos para abastecimento humano rural e dessedentação animal.

1.2 Justificativa

As reservas de águas superficiais possuem grande importância no planejamento das ações do uso dos recursos hídricos nas regiões semiáridas, pois as águas subterrâneas, devido às características do solo e subsolo, não são capazes de suprir por completo o abastecimento humano, como afirmado por Cirilo (2008), sem levar em consideração os demais usos para a sociedade em geral.

Dentre as alternativas utilizadas para melhorar a distribuição de água, destaca-se a interligação de reservatórios por meio do sistema de adutoras, essa foi aplicada como meio de auxiliar o abastecimento hídrico em cidades da RHSC no último grande período de estiagem. Permitindo assim, o uso da água acumulada em bacias hidrográficas vizinhas, sendo essa a forma mais adequada de transporte de água em volumes deste porte de acordo com Cirilo *et al* (2010).

Para a realização de manobras hídricas, buscando dar suporte as cidades mais afetadas pelas longas estiagens, se faz necessário o conhecimento prévio da situação dos açudes da região, os quais podem auxiliar em decisões que trazem segurança hídrica e economia na execução de estratégias da diminuição dos efeitos adversos da estiagem.

Podemos destacar também, a grande variação de armazenagem dos reservatórios e a intensa sazonalidade interanual das precipitações, como sendo obstáculos no planejamento da destinação dos volumes armazenados na superfície em regiões de clima seco. Por tanto, um método de determinação dos volumes que possa ser realizado com facilidade, torna os levantamentos de dados mais robustos e precisos.

O conhecimento destes volumes acumulados, em momentos distintos e de fácil determinação, é fator de extrema importância para o planejamento da utilização dos recursos hídricos de uma região. Desta forma os reservatórios de interesse estratégico são monitorados em tempo real como forma de controle do volume disponível, porém uma grande parcela dos

reservatórios não recebe esse tipo de acompanhamento, mesmo podendo apresentar uma capacidade de regularização plurianual.

Dentre os métodos utilizados para a determinação de volumetria de reservatórios, podemos destacar os indiretos, os quais são utilizados na busca de representar uma aproximação entre os volumes acumulados em reservatórios, em confronto aos métodos diretos, que são mais dispendiosos para a sua execução, como a batimetria de um açude, que deve ser realizada por técnicos capacitados e *in loco*, como demonstrado por Sawunyama (2005), na bacia do rio Limpopo, localizado no Zimbábwe, em que os volumes de pequenos reservatórios podem ser calculados para um aprimoramento dos planejamentos e cálculos sem a necessidade de estudos de campo.

A determinação do volume de água disponível em reservatórios de superfície é um dos grandes desafios do gerenciamento dos recursos hídricos para o atendimento das demandas das comunidades próximas a estes corpos d'água. Esta disponibilidade hídrica não monitorada em reservatórios artificiais é capaz de atender diversas demandas sazonais com pequenas garantias.

Estes reservatórios figuram em grande quantidade, mas distribuídos pela região e apresentando acumulações pequenas e pontuais, não têm seus volumes considerados no sistema de oferta hídrica. Essa distribuição espacial dispersa democratiza o acesso à água, mas afeta diretamente a regularização de vazões e o acúmulo de água, aumentando ainda a perda por evaporação, como apresentado por STUART (2005).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Determinar a disponibilidade hídrica em reservatórios artificiais para Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús - RHSC com uso de sensoriamento remoto.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Analisar a eficiência da equação de Molle modificada por Pereira et al (2019) para os reservatórios da RHSC;
- ✓ Avaliar o uso dos dados dos espelhos d'água obtidos pela Funceme (2008) como entrada da equação de Molle modificada;
- ✓ Avaliar o uso dos coeficientes geométricos médios na obtenção dos volumes.

- ✓ Determinar a capacidade de armazenamento dos reservatórios não monitorados da RHSC;
- ✓ Analisar a distribuição espacial da disponibilidade hídrica na RHSC e seu nível de saturação.

1.4 Delimitação

Este trabalho delimita-se aos reservatórios de água superficiais localizados na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús, que está inserida nos municípios de Ararendá, Poranga, Ipaporanga, Ipueiras, Crateús, Tamboril, Nova Russas, Independência, Novo Oriente e Quiterianópolis e suas sub bacias.

1.5 Roteiro Temático

O presente estudo encontra-se subdividido em 5 seções. A primeira, está seccionada em Contextualização, Justificativa, Objetivos gerais e específicos, Delimitação e Roteiro temático.

A segunda seção apresenta a fundamentação utilizada no estudo realizado, onde será tratada a medição indireta de volumes de reservatórios, sensoriamento remoto, equações de aproximação de volumes atualizadas para os reservatórios cearenses e feições de espelhos d'água distribuídas por órgãos públicos nacionais e internacionais.

Na terceira seção está discriminada a metodologia utilizada, onde detalham-se os meios e etapas necessários para a obtenção dos valores apresentados neste trabalho.

A quarta seção trata dos resultados e discussão dos dados obtidos. As validações de uso de espelhos d'água gerados em momentos diferentes e das equações de aproximação de volumes, a determinação da usabilidade de coeficientes geométricos regionais nas equações de aproximação, volumes acumulados e per capita, a classificação dos reservatórios na RHSC e o índice de saturação da açudagem da RHSC. Foi utilizado o método descrito por Pereira *et al* (2019) como base para os cálculos do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O monitoramento de bacias hidrográficas e de reservatórios de interesse estratégico no estado do Ceará é realizado pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, a qual acompanha 155 reservatórios e disponibiliza seus dados de forma online, em seu site.

Um dos trabalhos de maior referência para a realização da medição indireta de volumes de reservatórios no Brasil, é o desenvolvido por Molle e Cadier (1994), o qual é bastante utilizado como base para a medição. É sabido que as formas de obtenção de dados dos reservatórios a serem estudados evoluiu, partindo da aerofotogrametria, como indicado no estudo citado, até o uso de imagens provenientes de sensoriamento remoto.

As equações propostas foram modificadas e adaptadas aos tipos de reservatórios do Estado do Ceará por Pereira *et al* (2019), que propôs alterações nas aproximações de Molle utilizando a regressão linear das características físicas dos reservatórios cearenses. Foram propostas 3 abordagens, que representam as melhores variações das faixas de volume total.

A Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús - RHSC tem como fonte principal de abastecimento urbano de água os grandes reservatórios públicos. As zonas rurais contam com abastecimentos alternativos, como poços artesianos ou sistemas de abastecimento instalados por projetos governamentais, como o Projeto São José IV, que promoveu o financiamento de sistemas de abastecimento de água em comunidades rurais, além de outras melhorias nas comunidades (CEARÁ, 2019)

O DNOCS possui os dados de projeto dos reservatórios particulares construídos na região, sendo assim uma fonte confiável de informações das características geométricas dos barramentos e suas bacias.

O conhecimento da situação da açudagem na região se mostra de alta importância para as decisões de planejamento futuros acerca da regularização hídrica

2.1 Método de Molle

Entre os métodos de cálculo de volumes com abordagem indireta, o método de Molle (1994b) é um dos utilizados como meio de obtenção das informações desejadas acerca de reservatórios de água. Molle (1994b) propôs as equações (1) e (2) por meio do estudo da geometria de reservatórios dos estados do Nordeste brasileiro.

$$V = K * H^\alpha \quad (1)$$

$$S = \alpha * K * H^{(\alpha-1)} \quad (2)$$

Em que V é o volume do reservatório em m³, H é a altura da lâmina d'água em relação ao ponto mais baixo do reservatório, K é o coeficiente de abertura, α é o seu coeficiente de forma e S é a área da bacia hidráulica.

Estas formulações propostas por Molle (1994b) tiveram o intuito de facilitar a resolução dos problemas referentes a açudagem e ao uso do recurso acumulado, porém ela possui a tendência a superestimar os volumes calculados.

2.2 Método de Molle modificado

Pereira *et al* (2019) utilizou das informações topográficas de 316 reservatórios no Ceará com o intuito de diminuir a porcentagem de erro no cálculo de volumes de espelhos d'água. O modelo de regressão utilizado culminou no desenvolvimento de quatro equações recomendadas por sua simplicidade e performance melhorada em relação a equação original de Molle.

Ainda nesse trabalho, foi apresentada uma modificação da equação de Molle que atende ao uso simplificado com poucas variáveis e que tem eficácia na faixa de volume dos reservatórios não monitorados da RHSC, como apresentada abaixo na equação 3.

$$V = V_0 + A_0 * \left(\frac{A - A_0}{\alpha_{mod} - K_{mod}} \right)^{\left(\frac{1}{\alpha_{mod}-1} \right)} + K_{mod} * \left(\frac{A - A_0}{\alpha_{mod} - K_{mod}} \right)^{\left(\frac{\alpha_{mod}}{\alpha_{mod}-1} \right)} \quad (3)$$

Em que V é o volume do reservatório em m³, V₀ é o volume inicial de referência e A₀ é a área inicial de referência, determinados arbitrariamente por Pereira *et al* (2019) como 2096 m³ e 5000 m², respectivamente, α_{mod} é o coeficiente de forma modificado e K_{mod} é o coeficiente de abertura modificado.

Os coeficientes de forma e abertura para aplicação na equação de Molle modificada são descritos pelas equações 4 e 5 abaixo.

$$\alpha_{mod} = 2,08 + (1,46 * 10^1) * \left(\frac{\lambda}{P_{max}} \right) - (7,41 * 10^{-2}) * \left(\frac{\lambda^2}{P_{max}} \right) - (1,36 * 10^{-8}) * \left(\frac{A_{max} * D}{\lambda} \right) + (4,07 * 10^{-4}) * D \quad (4)$$

$$K_{mod} = 2,55 * 10^3 + (6,45 * 10^1) * \lambda - (5,38 * 10^1) * \left(\frac{D}{\lambda} \right) \quad (5)$$

Em que A é a área da bacia hidráulica em m^2 , A_{max} é a área máxima da bacia hidráulica em m^2 , P_{max} é o perímetro máximo da bacia hidráulica em metros, D é o diâmetro do reservatório (P_{max}/π) em metros e λ é igual a A_{max}/P_{max} em metros.

A equação 3 de cálculo de volumes apresenta uma acurácia maior com volumes entre 10^3 e 10^7 m^3 , abrangendo os reservatórios de menor porte da área estudada.

2.3 Base de dados de espelhos d'água

O presente trabalho faz uso de duas bases de dados referentes aos espelhos de água obtidos por sensoriamento remoto, sendo sua distribuição realizada pela FUNCEME e pelo Global Water Surface Explorer - GWSE respectivamente. As informações determinadas pela FUNCEME foram obtidas através de estudos periódicos realizados pelo órgão, as quais refletem a realidade em um determinado ponto no tempo. Os dados dispostos pelo GWSE são frutos de um trabalho realizado em uma série de 32 anos, para que houvesse a determinação da presença de espelhos d'água na superfície terrestre.

Como base de dados de projeto dos reservatórios característicos da região hidrográfica, foi utilizada a publicação do DNOCS de 2004 intitulada Açudagem Particular em Cooperação no Ceará, de autoria de Francisco Dantas Pinheiro como fonte de informações confiáveis da geometria e capacidade de parte dos reservatórios estudados.

2.3.1 Dados da FUNCEME

O *shapefile* fornecido pela FUNCEME foi gerado em um estudo realizado em 2008 com o intuito de fornecer base de informações para auxiliar os planejamentos de uso dos recursos hídricos, além de integrar a base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH. Esse mapeamento faz parte de um levantamento de espelhos d'água do Brasil, onde a FUNCEME, por já possuir experiência em mapeamentos similares, identificou os reservatórios no estado do Ceará e no restante da região Nordeste que apresentam uma bacia hidráulica maior que 5 hectares, e nas outras regiões do país com áreas maiores que 20 hectares (FUNCEME, 2008)

Os levantamentos de espelhos d'água periódicos da FUNCEME foram analisados em termos de números de espelhos detectados.

Foram realizados levantamentos nos anos de 2008, 2009, 2013, 2016 e 2017. A Tabela 1 apresenta o número de espelhos detectados no Ceará com área acima de 0,5ha e sua quantidade na RHSC no respectivo ano.

Tabela 1: Espelhos d'água detectados no Ceará e na RHSC.

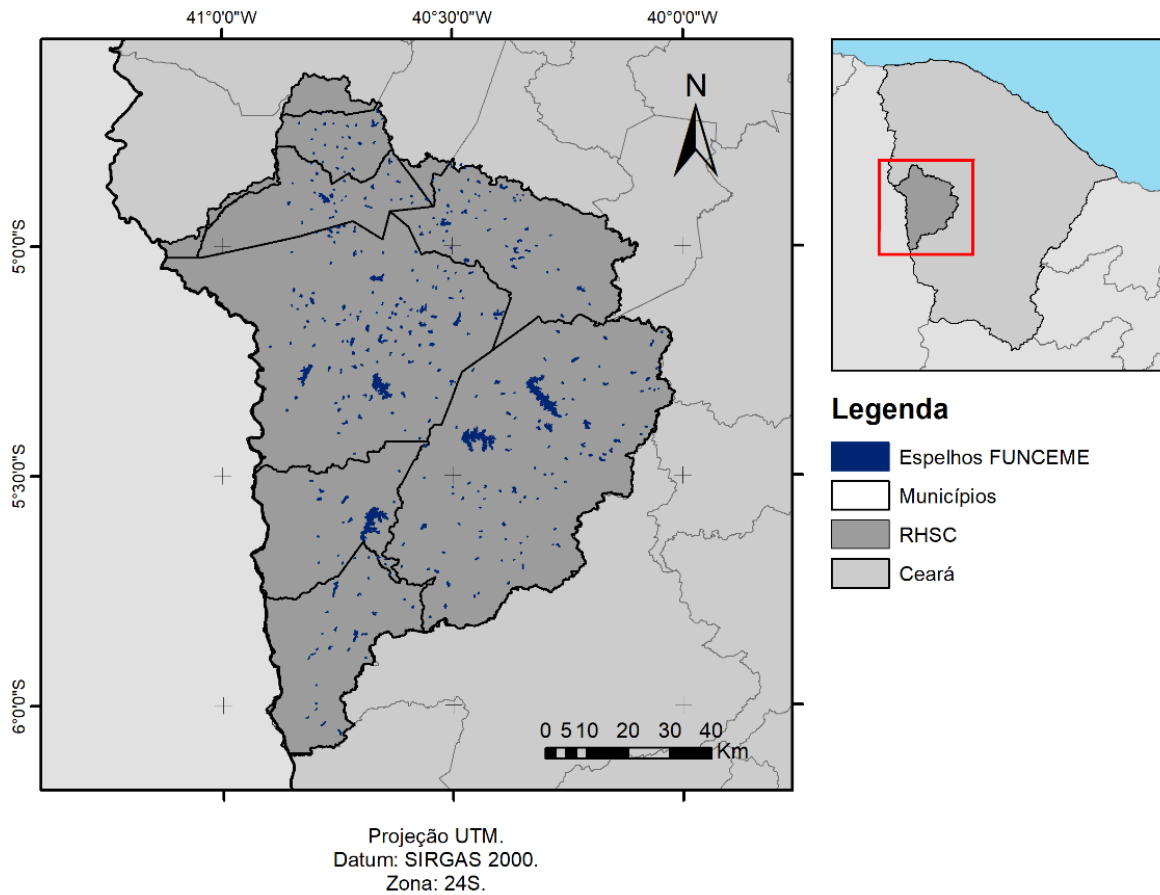
ANO	TOTAL CE	TOTAL RHSC
2008	25347	1616
2009	26236	1133
2013	28195	211
2016	9303	660
2017	10977	644

Fonte: FUNCEME (2022).

A Tabela 1 apresenta as informações que evidenciam que a RHSC já apresentava uma queda no número de espelhos desde o ano de 2009, enquanto o estado do Ceará demonstrou um aumento nos espelhos detectados nos anos de 2009 e 2013, apresentando uma queda abrupta no intervalo do ano de 2013 ao ano de 2016 com um aumento leve no ano de 2017. Constatou-se ainda que, no ano de 2013, o estado exibiu uma máxima no número de espelhos, enquanto a RHSC apresentou o menor número de reservatórios identificados.

Os espelhos detectados na RHSC em 2008 estão apresentados na Figura 1, sendo este o ano que apresentou o maior número de reservatórios de acordo com os levantamentos realizados.

Figura 1: Espelhos maiores que 5ha na RHSC



Fonte: Autor (2022).

2.3.2 Dados do GWSE

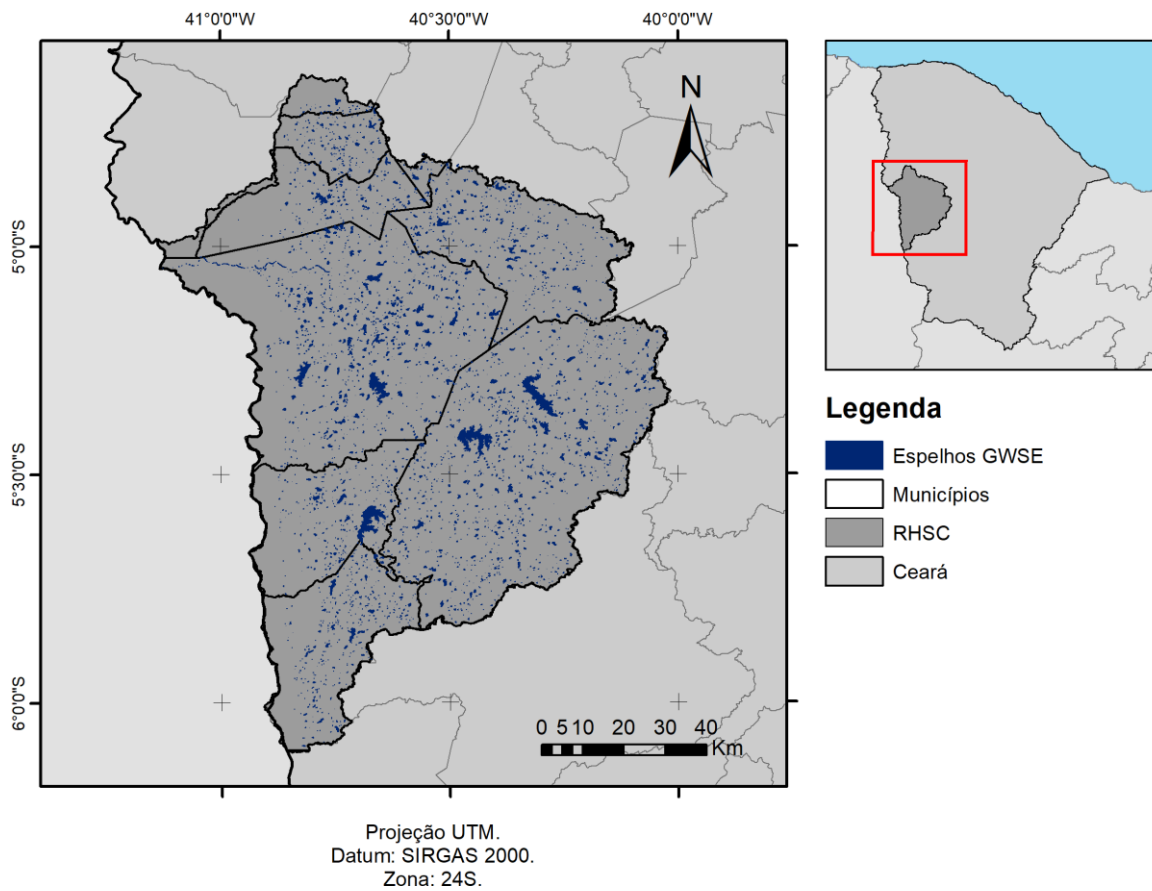
A plataforma online Global Surface Water Explorer – GWSE, armazena e distribui de maneira gratuita dados da água superficial no planeta com o intuito de auxiliar decisões políticas e pesquisas com o uso deste recurso. Os dados disponibilizados demonstram as alterações e a extensão consequentes das mudanças nos regimes hidrológicos.

As informações distribuídas pelo GWSE utilizadas neste estudo foram geradas por Pekel *et al* (2016) como produto de um estudo de levantamento dos espelhos d'água distribuídos no planeta, unidos em um arquivo de imagem TIFF. Foram utilizadas três milhões de imagens do satélite *Landsat* com resolução de 30 metros, em um período de 32 anos, apresentando assim as ocorrências de reservatórios de água na superfície terrestre durante este período.

Os dados contam com a presença de trechos de rios que foram detectados durante a execução do levantamento, além de outros corpos de água, dessa forma, não se pode considerar sua totalidade como reservatórios artificiais de superfície.

O estudo de Pereira *et al* (2019) utilizou como base de dados as informações obtidas nos arquivos disponibilizados pelo GWSE, sendo assim, estes dados serão utilizados para a validação das feições obtidas pelo levantamento realizado pela FUNCEME (2008) para os reservatórios localizados na RHSC. A Figura 2 apresenta os espelhos detectados pelo trabalho de Pekel *et al* (2016) para a RHSC.

Figura 2: Espelhos detectados por Pekel *et al* (2016) na RHSC.



Fonte: Autor (2022).

2.4 Avaliação do grau de saturação da açudagem

Para a determinação do Índice do Grau de Saturação da Açudagem – IGAS, como descrito por Rocha *et al* (2012), os reservatórios devem ser classificados de acordo com seu volume armazenado como determinou o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH (1992). Esta classificação é dividida em 5 classes, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação do PERH (1992) para reservatórios de água.

Classificação	
Aguada	$V < 0,3\text{hm}^3$
Muito pequeno	$0,3\text{hm}^3 \leq V \leq 1,0\text{hm}^3$
Pequeno	$1,0\text{hm}^3 < V < 3,0\text{hm}^3$
Médio	$3,0\text{hm}^3 \leq V \leq 50,0\text{hm}^3$
Grande	$50,0\text{hm}^3 < V$

Fonte: PERH (1992).

O IGAS foi criado como um meio avaliativo da situação da saturação da açudagem em bacias hidrográficas. Com esta análise será possível uma determinação mais assertiva de onde há um alto acúmulo de reservatórios em relação a capacidade hídrica em cada zona da região hidrográfica. Os deflúvios de cada município estão disponíveis no PERH – 1992. O valor do IGAS é obtido pela equação abaixo.

$$IGAS = \frac{V}{Aflu} \quad (6)$$

Onde V é o volume estocado na bacia e $Aflu$ é a vazão afluyente anual útil, que é calculada como o produto do deflúvio médio pela área da bacia menos o volume de aguadas e reservatórios muito pequenos.

Para este índice estão determinados cinco níveis de saturação, como demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3: Níveis de saturação de bacias.

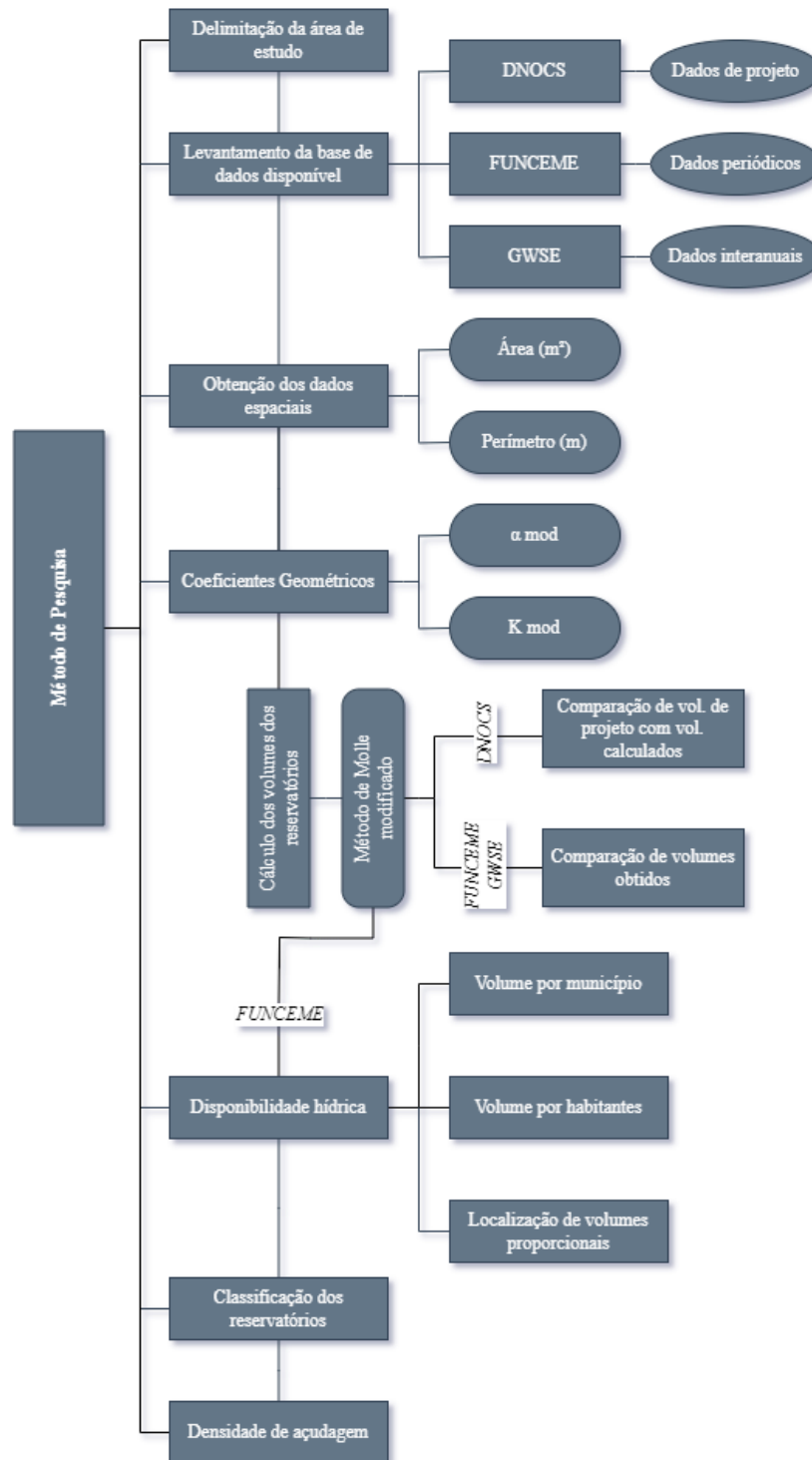
Classificação	
Muito baixa	$0,0 < IGAS < 0,5$
Baixa	$0,5 \leq IGAS < 1,0$
Normal	$1,0 \leq IGAS < 2,0$
Alta	$2,0 \leq IGAS < 3,0$
Muito Alta	$3,0 \leq IGAS$

Fonte: Rocha *et al* (2012).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem natureza quantitativa sobre a disponibilidade hídrica da RHSC. A metodologia adotada nesse estudo é constituída pelos passos apresentados na Figura 3, que possibilitam a resolução dos objetivos apontados.

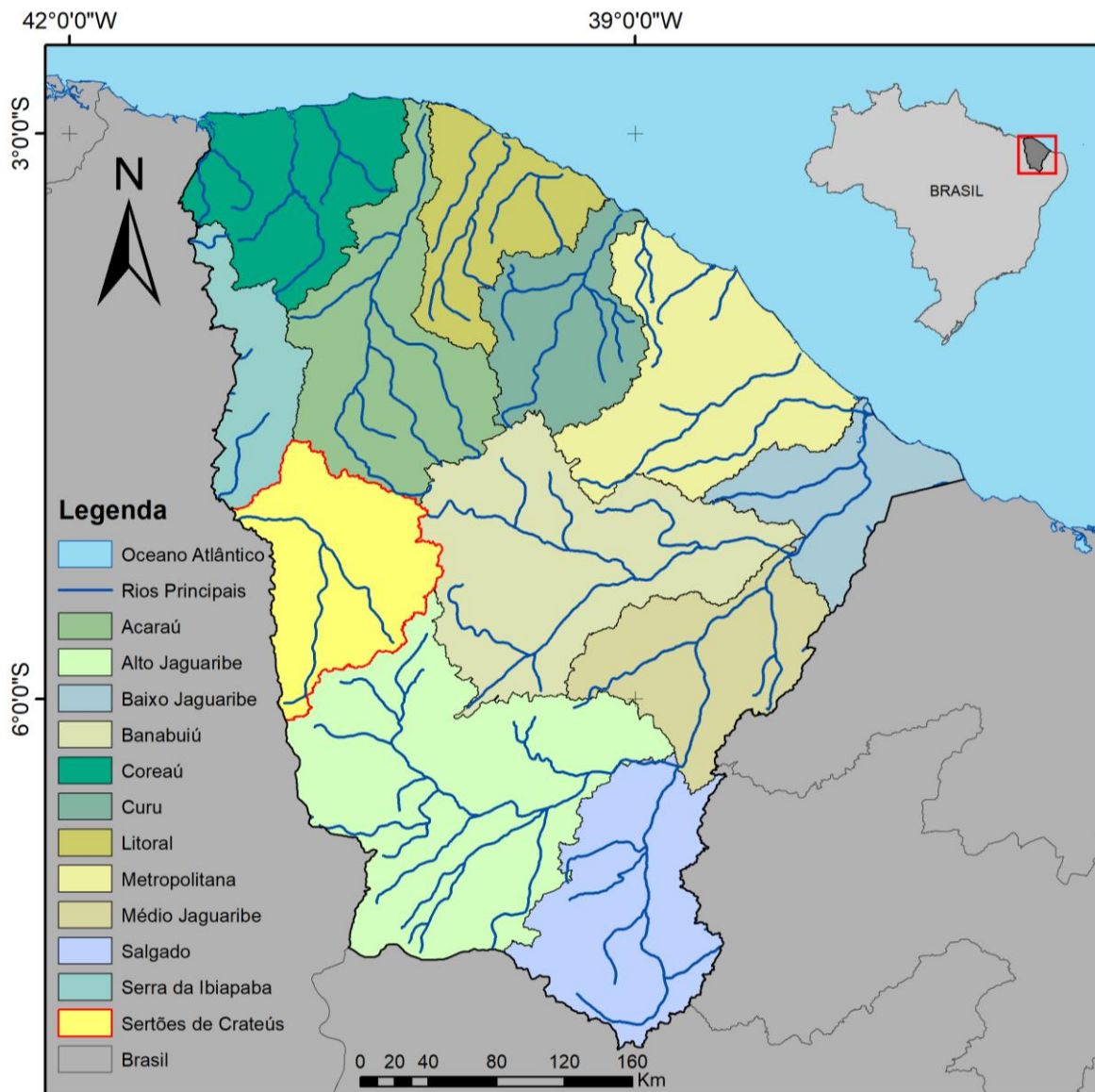
Figura 3: Etapas da metodologia.



Fonte: Autor (2022).

Este estudo se limita à Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús - RHSC, que faz parte da bacia do Poti-Longá juntamente com a região hidrográfica da Ibiapaba (INESP, 2009). É parcela integrante da bacia do Parnaíba, que apresenta a maior parte do seu território no estado do Piauí. São limitantes com a RHSC as regiões hidrográficas da Ibiapaba e do Acaraú ao norte, a região hidrográfica do Banabuiú ao leste e a região hidrográfica do Alto Jaguaribe ao sul, como apresentado pela Figura 4.

Figura 4: Regiões hidrográficas do estado do Ceará.



Fonte: Autor (2022).

A RHSC está inserida nos municípios de Ipueiras, Ararendá, Poranga, Nova Russas, Iporanga, Crateús, Tamboril, Independência, Novo Oriente e Quiterianópolis. Os municípios de Ararendá, Crateús, Independência, Iporanga, Novo Oriente e Quiterianópolis estão inseridos com área igual ou superior a 99,6% na RHSC, desta forma podemos considerá-los totalmente pertencentes à região hidrográfica.

Os municípios de Ipueiras, Nova Russas, Poranga, com 9,3%, 9,1% e 6,5% de seus territórios inclusos na RHSC, respectivamente. O município de Tamboril apresenta 63% de sua área nos limites da RHSC, além de possuir reservatórios significativos para este estudo, desta forma, será o único dos municípios fracionados a ser considerado nos cálculos de disponibilidade hídrica da região.

O compilado de Pinheiro (2004) reúne os dados de projeto de 466 reservatórios particulares no Ceará que tiveram participação do DNOCS em sua construção. Com essa relação foi possível identificar e localizar os reservatórios particulares na RHSC que possuem dados de projeto. Suas características geométricas foram tabeladas e utilizadas para o cálculo dos volumes de acordo com a equação de Molle modificada, assumindo que seus volumes de projeto, como listados pelo autor, seriam seus volumes de armazenamento máximo.

Estes volumes foram então comparados com os volumes obtidos pela equação, demonstrando a acurácia para os reservatórios da região. Este trabalho também buscou determinar quais reservatórios seriam selecionados para a determinação da disponibilidade hídrica não monitorada, levando em conta que os reservatórios citados nesta publicação seriam os de interesse social, tendo sido financiados pelo DNOCS para auxiliar o desenvolvimento socioeconômico da região.

Como forma de representar a capacidade hídrica da RHSC com os dados fornecidos periodicamente pela FUNCEME, o ano de 2008 foi selecionado dos arquivos disponibilizados. As informações geradas por Pekel *et al* (2016) e disponibilizadas pelo GWSE foram utilizadas como forma de validar as informações da FUNCEME e os resultados obtidos pela equação de Molle modificada.

Não foram considerados nos cálculos de disponibilidade hídrica os reservatórios Realejo, Carnaubal, Flor do Campo, Jaburu II, Barra Velha, São José, Sucesso, Cupim, Colina e Batalhão, por já terem seu monitoramento efetuado pela COGERH e por não se encaixarem nos limites de eficiência de cálculo das aproximações propostas por Pereira *et al* (2019).

As informações referentes às características físicas dos reservatórios foram extraídas utilizando o software ArcGIS 10.3, assim como as operações necessárias para a organização e pré-processamento dos dados. Esses dados foram organizados com o software

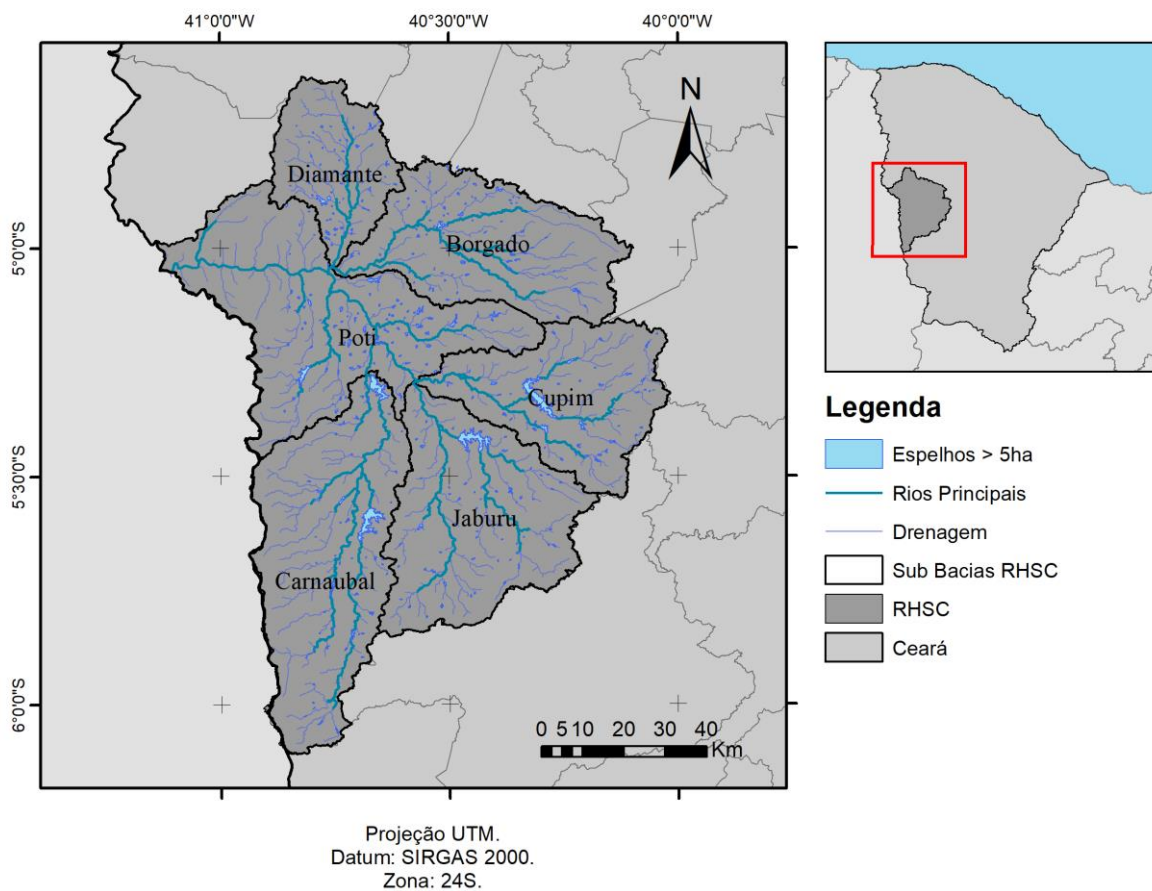
Office Excel, onde também foram realizados os cálculos de aproximação dos coeficientes geométricos e volumes.

Com os reservatórios divididos por classe de acordo com o PERH (1992), podemos determinar o Índice do Grau de Saturação da Açudagem – IGAS, como realizado por Rocha *et al* (2012).

A RHSC foi dividida em sub bacias para uma melhor setorização do IGAS, levando em conta a densidade de reservatórios e tamanho aproximado. A subdivisão da bacia está apresentada na Figura 5.

Os valores de deflúvio por município foram interpolados, gerando isolinhas dos valores, onde foi calculado então uma média de deflúvio para cada sub bacia da RHSC. Estes valores foram utilizados para o cálculo do IGAS de acordo com a metodologia descrita por Rocha *et al* (2012).

Figura 5: Divisão da RHSC em sub bacias.



Fonte: Autor (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos dados dos reservatórios

4.1.1 Acurácia da equação para a RHSC

De acordo com Pinheiro (2004), dezenove reservatórios particulares estão localizados dentro dos limites da RHSC.

O reservatório Caititu, localizado em Crateús, foi utilizado como referência de menor área para a delimitação dos espelhos a serem estudados por apresentar o menor volume de projeto dos reservatórios identificados com base de dados previamente disponíveis.

Estes reservatórios foram identificados como Reservatórios de Controle, com localização e volumes descritos na Tabela 4, assim como seus volumes calculados com a equação proposta por Pereira *et al* (2019) utilizando as áreas descritas por Pinheiro (2004) e um perímetro equivalente, calculado a partir da proporção entre perímetro e área de reservatórios com características pré-determinadas.

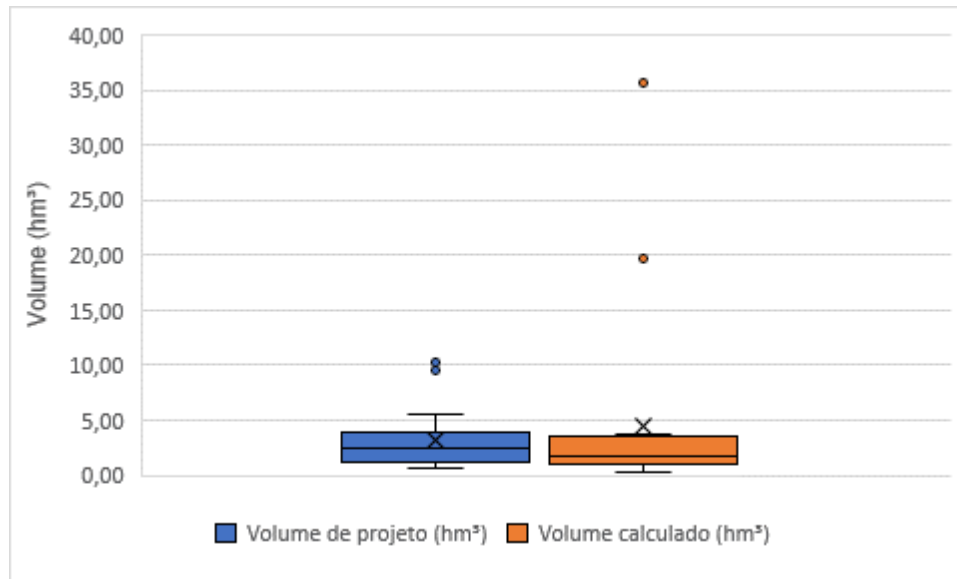
Tabela 4: Reservatórios com dados oficiais presentes na RHSC.

Nome	Município	Vol. de projeto (hm ³)	Vol. calculado (hm ³)
Caititu	Crateús	0,64	0,58
Falcão	Independência	1,23	0,99
Carapinima	Ararendá	1,63	1,06
Santiago	Crateús	1,34	1,73
Portais	Crateús	1,32	1,19
Severino	Crateús	0,65	0,34
Irapuru	Independência	1,13	0,70
Grota Verde	Crateús	1,43	1,21
Moura Fé	Crateús	0,93	0,85
São José dos Campos	Independência	3,09	1,40
Coutinho	Independência	3,32	3,53
Marinheiro	Crateús	2,40	2,17
Arcélia	Crateús	2,43	1,83
Itauru	Ararendá	3,73	2,60
Riacho São José	Independência	5,47	3,79
Apuí	Crateús	4,19	2,47
Irapuá	Crateús	3,99	3,56
Sabóia II	Independência	10,30	35,73
Bezerra de Melo	Crateús	9,57	19,73
TOTAL	-	58,79	85,47

Fonte: Autor (2022).

Realizando a comparação entre os volumes de projeto e realizando os devidos cálculos constata-se que a equação majora os volumes próximos de 10hm^3 , como descrito por Pereira *et al* (2019). Os dados dos volumes estão dispostos em um diagrama de caixa no Gráfico 1, apresentando os outliers majorados.

Gráfico 1: Diagrama de caixa dos volumes de projeto e volumes calculados.



Fonte: Autor (2022).

Com essas informações, corrobora-se a afirmação de que a equação majora volumes próximos e maiores que 10hm^3 . Esses volumes e áreas da bacia hidráulica representam os açudes em sua capacidade máxima, desta forma, pode-se utilizar a equação na base de dados obtida por sensoriamento remoto, tendo em vista que a ocasionalidade de todos os reservatórios estarem com 100% de sua capacidade é extremamente rara para uma região com um regime hidrológico sensível como a RHSC.

4.1.2 Espelhos dos reservatórios

Isolando os dados referentes ao estado do Ceará disponibilizados pela FUNCEME (2008), foram constatados 5598 reservatórios com mais de 5ha no estado, sendo 375 na RHSC, representando 6,7% do total de espelhos levantados no estado.

Os reservatórios selecionados para este estudo foram todos aqueles que apresentavam área maior que o açude Caititu, sendo ele o menor reservatório apresentado por Pinheiro (2004) dos reservatórios particulares executados em cooperação com o DNOCS. O açude Caititu demonstrou uma área de 19ha de acordo com o levantamento da FUNCEME no

ano de 2008.

Desta forma, todos os reservatórios identificados no arquivo da FUNCEME com área superior a 19ha foram selecionados para a aplicação das equações propostas Pereira *et al* (2019) para a determinação dos volumes acumulados não monitorados. Sendo assim, foram contabilizados 90 reservatórios inseridos na RHSC com estas características, excluindo os 10 que não se encaixam no estudo por já serem monitorados.

Crateús apresentou 35 dos 90 reservatórios selecionados no estudo em seu território, seguido por Independência com 24, Tamboril com 15, Quiterianópolis com 5, Novo Oriente com 5, Ipaporanga com 4 e Ararendá com 2 reservatórios.

Os dados referentes aos espelhos d'água localizados no estado do Ceará, gerados partir do estudo de Pekel *et al* (2016), demonstram a presença de 48.396 entidades com áreas superiores a 0,05ha, como representado nos dados disponibilizados pelo GWSE, sendo 5.242 ou 10,8% destas inseridas na RHSC. Contando com áreas maiores que 5ha, temos um total de 7.298 para o estado e 439 para a RHSC, sendo assim 6,1% do total no estado.

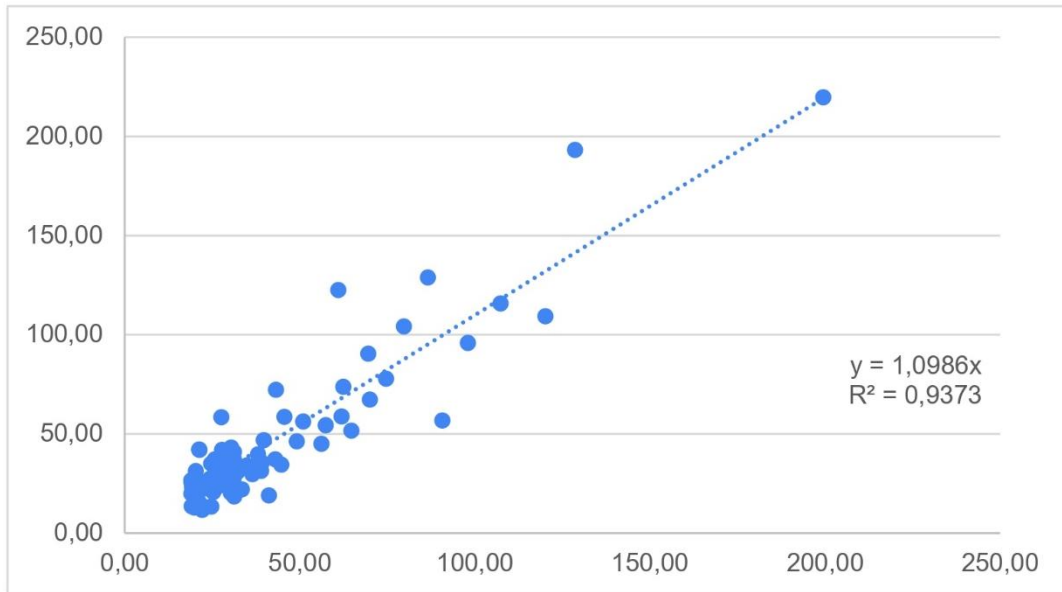
O cruzamento dos dados da FUNCEME e do GWSE mostra que três dos noventa espelhos detectados pela FUNCEME não estão presentes nas feições fornecidas pelo GWSE, dois em Ipaporanga e um em Crateús, não sendo esses açudes nenhum dos identificados na publicação do DNOCS (PINHEIRO, 2004).

4.1.3 Comparação das áreas obtidas

As informações obtidas pelos dados gerados pela FUNCEME e por Pekel *et al* (2016) foram geradas em momentos e de formas diferentes, desta forma seus dados foram comparados para que se constate uma consistência ou inconsistência nas informações a serem extraídas.

Os valores das áreas das feições dos espelhos selecionados foram dispostos no Gráfico 2, que demonstrou uma boa correlação dos dados, apresentando $y=1,0986x$ e um $R^2=0,9373$.

Gráfico 2: Dispersão de áreas em hectares dos espelhos FUNCEME/GWSE.



Fonte: Autor (2022).

Desta forma podemos afirmar que ambos os estudos tem uma representação similar dos mesmos reservatórios, mantendo uma constância nas suas informações.

4.2 Coeficientes geométricos

Os coeficientes α mod e K mod estão relacionados diretamente com as características geométricas do reservatório e sua topografia. Segundo Molle (1994), o coeficiente K é um medidor da abertura geral do cone formado pela forma do reservatório, sendo mais aberto e menos inclinado o vale barrado quando o valor de K for maior. K também pode ser descrito como variável da função $V=K*H^\alpha$, demonstrando que K é equivalente ao volume armazenado em 1 metro de profundidade naquele reservatório. Já α está relacionado com a concavidade das encostas do vale barrado.

Os coeficientes geométricos α mod e K mod obtidos pelas equações 4 e 5, respectivamente, foram calculados e analisados estatisticamente de acordo com as informações apresentadas na Tabela 5.

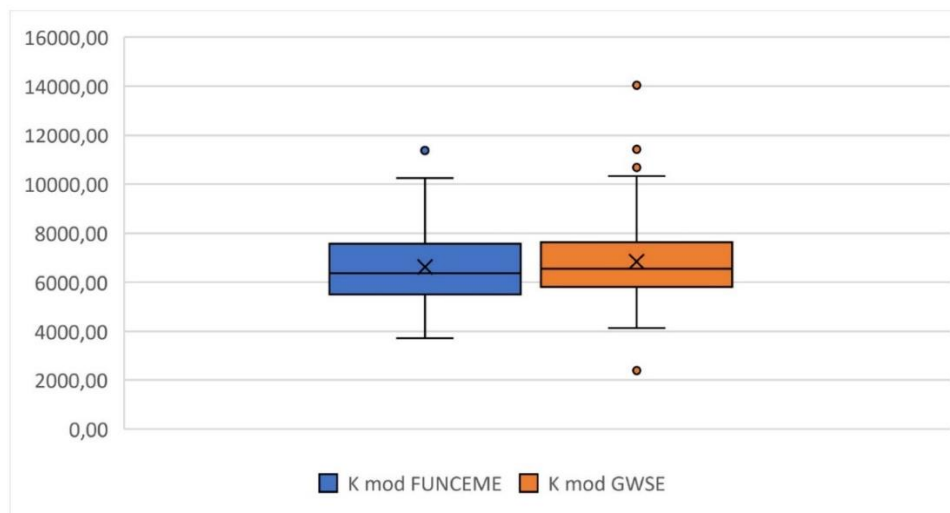
Tabela 5: Valores estatísticos para α mod e K mod.

Medidas Estatísticas	α modificado		K modificado	
	FUNCEME	GWSE	FUNCEME	GWSE
Min	2,64	2,60	3721,35	2383,64
Max	3,08	3,08	11359,74	14035,51
Soma	238,22	238,18	576491,20	595011,50
Média	2,738	2,738	6626,34	6839,21
Erro padrão	0,012	0,012	163,35	181,04
Variância	0,013	0,013	2321550	2851593
Desvio padrão	0,113	0,115	1523,66	1688,67
Mediana	2,690	2,700	6370,34	6550,30
1º Quartil	2,670	2,660	5507,48	5811,27
3º Quartil	2,780	2,760	7571,91	7624,38

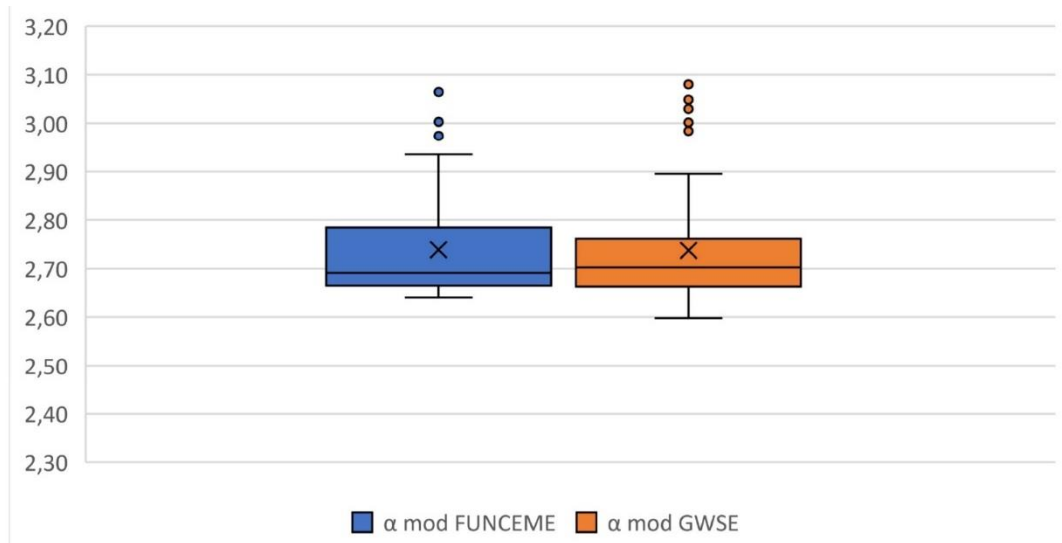
Fonte: Autor (2022).

Pode-se perceber uma menor amplitude nos coeficientes referentes à FUNCEME em comparação aos dados do GWSE, como pode-se atestar pelos diagramas de caixa no Gráfico 3 para K mod e Gráfico 4 para α mod.

Gráfico 3: Distribuição em diagrama de caixa para os valores de K mod calculados.



Fonte: Autor (2022).

Gráfico 4: Distribuição em diagrama de caixa para os valores de α mod calculados.

Fonte: Autor (2022).

4.3 Disponibilidade hídrica

4.3.1 Validação do levantamento da FUNCEME para a RHSC

A Tabela 6 apresenta os volumes dos reservatórios de superfície por município, obtidos de acordo com as equações de Molle modificadas, utilizando os dados fornecidos pela FUNCEME (2008) e os volumes obtidos com os dados fornecidos por Peket *et al* (2016).

Tabela 6: Distribuição de volume acumulado por cidades e variação de resultados obtidos.

Cidade	Nº de reservatórios	Volume FUNCEME (hm ³)	Volume GWSE (hm ³)	Variação Vol. FUNCEME/GWSE	% do Total acumulado
Ararendá	2	2,06	2,03	1,45%	2,78%
Ipaporanga	2	1,11	1,63	-31,86%	1,51%
Tamboril	15	9,65	12,24	-21,22%	13,06%
Crateús	34	32,09	32,47	-1,17%	43,44%
Independência	24	20,10	22,78	-11,73%	27,21%
Novo Oriente	5	4,65	6,83	-31,89%	6,29%
Quiterianópolis	5	4,22	3,87	9,01%	5,71%
MÉDIA	12,43	10,55	11,69	-12,49%	14,29%
TOTAL	87	73,88	81,85	-9,73%	-

Fonte: Autor (2022).

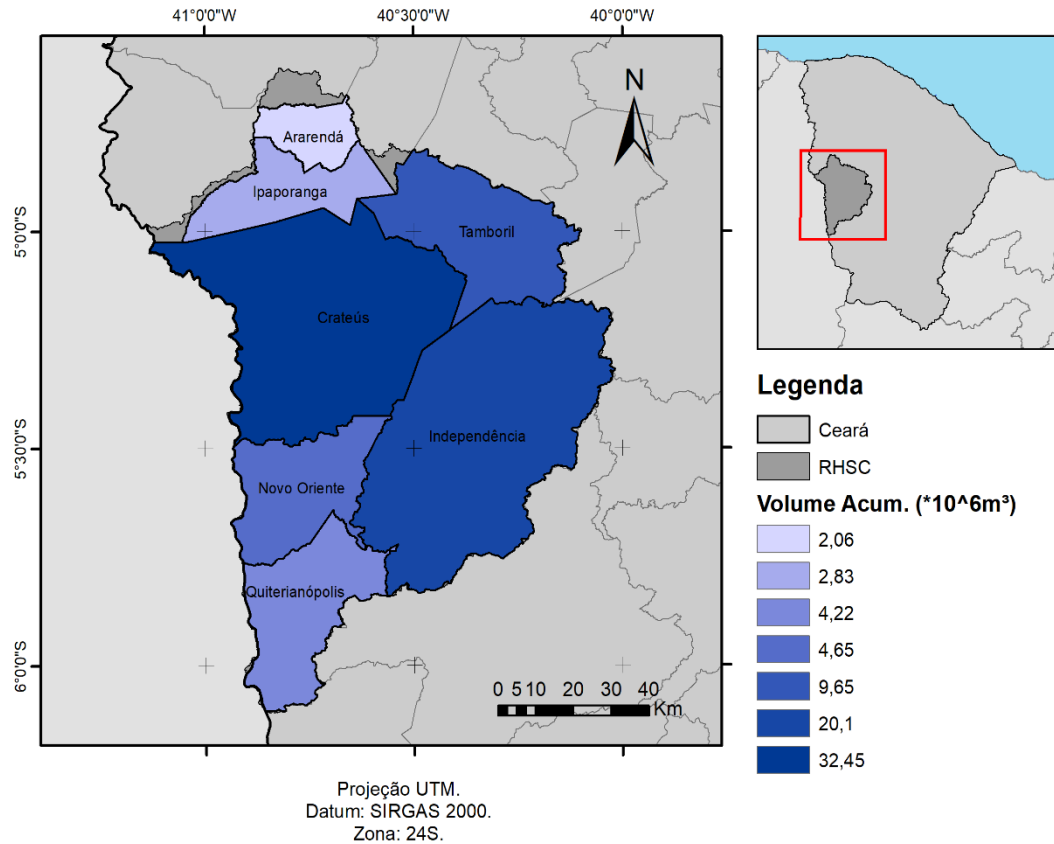
Pode-se constatar, por meio de uma análise dos dados, que os volumes obtidos têm baixa variação quando mudamos as bases de dados no cálculo, fato corroborado pela alta correlação entre as áreas dos shapes. Os dados fornecidos pela FUNCEME representam a situação hídrica no ano de 2008, trazendo uma estimativa mais aproximada da realidade daquele ano. As informações fornecidas pelo GWSE demonstram dados provenientes de uma série de anos, sendo uma estimativa mais aproximada de uma “cheia” na região hidrográfica. Podemos afirmar então que o ano de 2008 foi um ano com um bom acúmulo de água nos reservatórios da região.

4.3.2 Volumes acumulados não monitorados

Podemos afirmar que tanto a equação proposta por Pereira *et al* (2019) como os espelhos identificados pela FUNCEME (2008) representam bem os reservatórios e seus volumes aproximados na RHSC, desta forma serão utilizados somente os dados da FUNCEME (2008) para uma análise de volumes acumulados e para determinar a saturação da região hidrográfica. Foram considerados para o cálculo de volumes aproximados os 90 maiores reservatórios não monitorados e detectados pela FUNCEME. Estes volumes acumulados por município estão apresentados na Figura 6.

Com isso, pode-se afirmar que Crateús possui o maior número de reservatórios não monitorados e o maior volume de água acumulada, com aproximadamente 32,45 milhões de metros cúbicos distribuídos em 35 reservatórios. Ararendá demonstra o menor volume acumulado e a menor quantidade de reservatórios, com 2,06 milhões de metros cúbicos de água em 2 reservatórios, um valor abaixo da média de volume da RHSC, que é de 10,85 milhões de metros cúbicos por município, que apresentou 75,96 milhões de metros cúbicos em sua totalidade nos reservatórios estudados.

Figura 6: Mapa de distribuição de Vol. (m³) / Município.



Fonte: Autor (2022).

4.3.3 Volume não monitorado disponível per capita

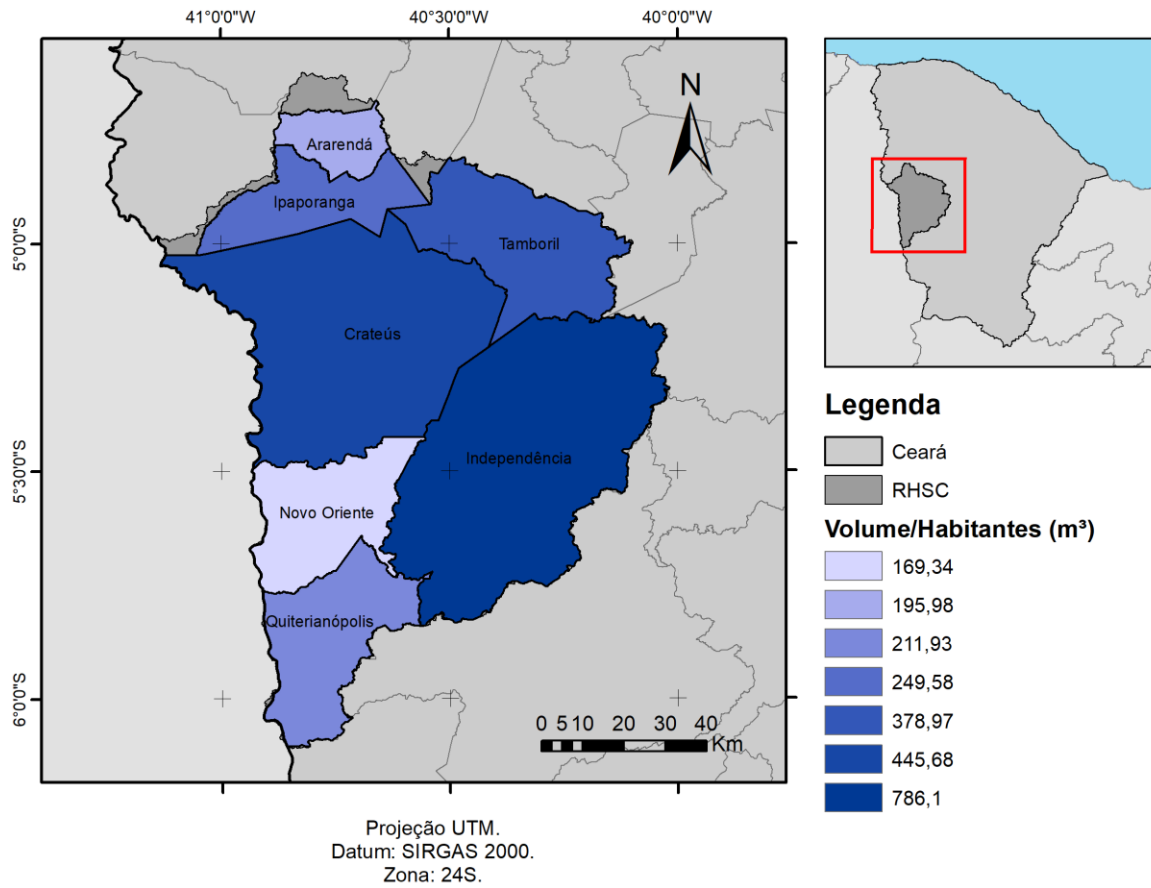
A Tabela 7 apresenta os volumes de cada município e sua disponibilidade pelo número de habitantes. O mapa apresentado na Figura 7 demonstra esta distribuição e quais municípios têm uma maior disponibilidade de água.

Tabela 7: Distribuição de volume acumulado por cidades e disponibilidade por habitantes.

Cidade	Volume (hm ³)	Habitantes	m ³ / Hab.
Ararendá	2,06	10491	195,98
Crateús	32,45	72812	445,68
Independência	20,10	25573	786,10
Ipaporanga	2,83	11343	249,58
Novo Oriente	4,65	27453	169,34
Quiterianópolis	4,22	19921	211,93
Tamboril	9,65	25451	378,97
TOTAL	75,96	193044	2.437,57

Fonte: Autor (2022).

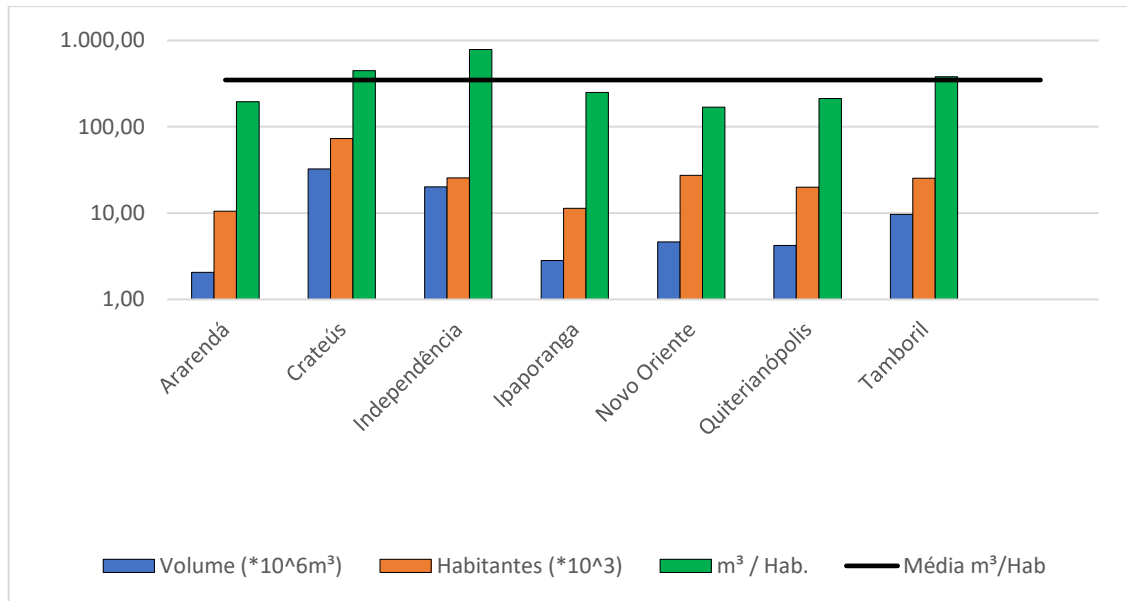
Figura 7: Mapa de distribuição de Vol. (m³) / Habitantes.



Constata-se que o município de Independência tem um volume de água acumulado por habitante de 768,10 m³, sendo este volume distribuído em 24 reservatórios, e Novo Oriente apresenta apenas 169,34 m³ por habitante, distribuídos em 5 reservatórios. A média de volume por habitante da RHSC é de 348,22 m³.

O Gráfico 5 apresenta as variações de volume, população, disponibilidade hídrica dos municípios e a média regional de volume por habitante.

Gráfico 5: Disponibilidade hídrica por município.

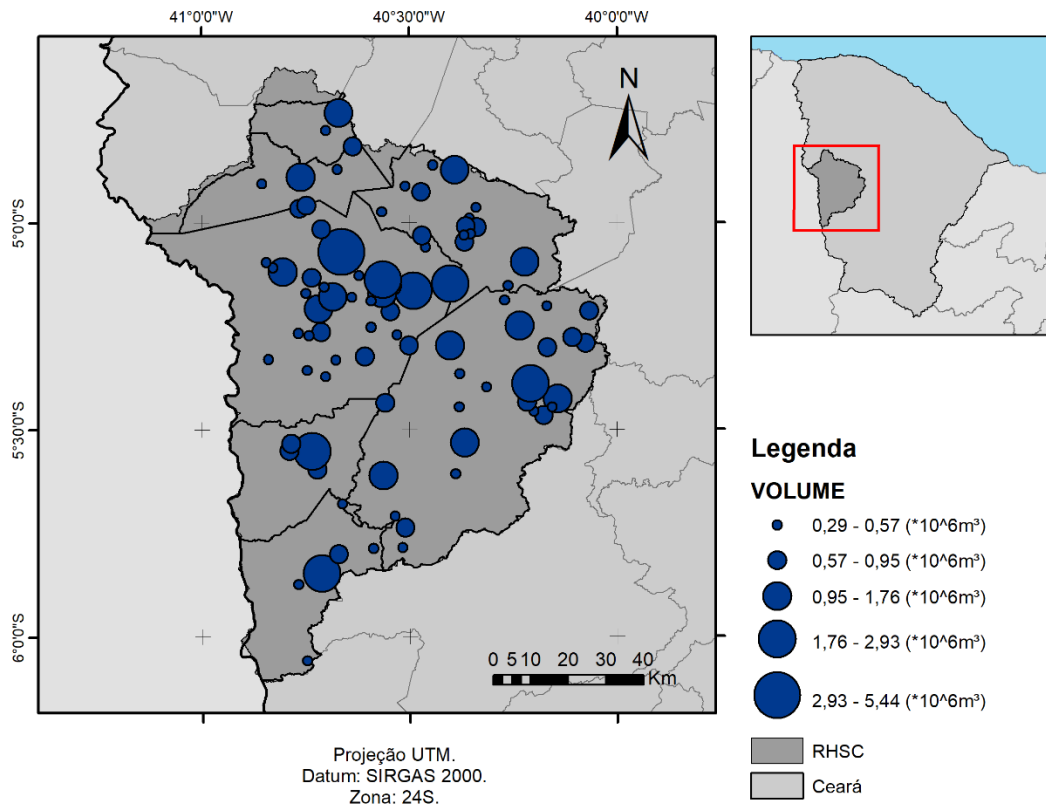


Fonte: Autor (2022).

4.3.4 Localização proporcional dos volumes não monitorados acumulados

A localização espacial dos volumes acumulados interfere diretamente no seu potencial de uso. Volumes maiores em áreas próximas às zonas urbanas têm maior potencial de abastecimento humano. A distância espacial entre os reservatórios também onera ações de transposição de águas, tornando mais difícil a interligação dos recursos presentes na região. No mapa presente na Figura 8 podemos ver as localizações dos reservatórios não monitorados com seus volumes equivalentes distribuídos na RHSC. Pode-se constatar uma presença menor de reservatórios de menor porte nas áreas ao sul da região.

Figura 8: Mapa de distribuição dos volumes proporcionais por reservatórios.



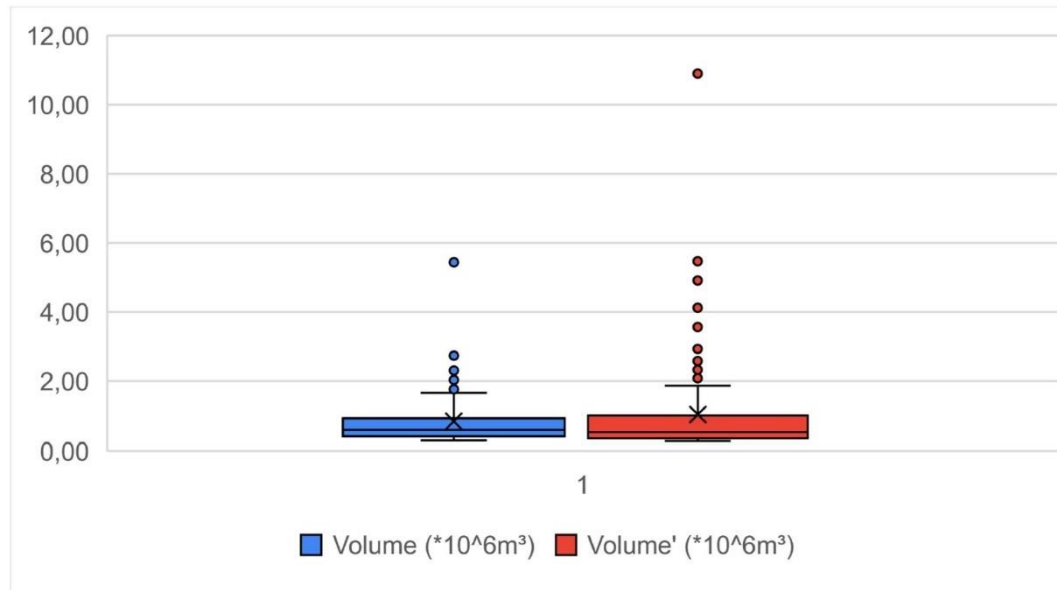
Fonte: Autor (2022).

4.3.5 Volumes obtidos com coeficientes geométricos médios

A viabilidade da utilização de valores regionais de α mod e k mod foi avaliada realizando-se o cálculo de volume dos reservatórios utilizando os valores médios obtidos dos coeficientes geométricos, possibilitando um passo a menos na realização das aproximações de volume.

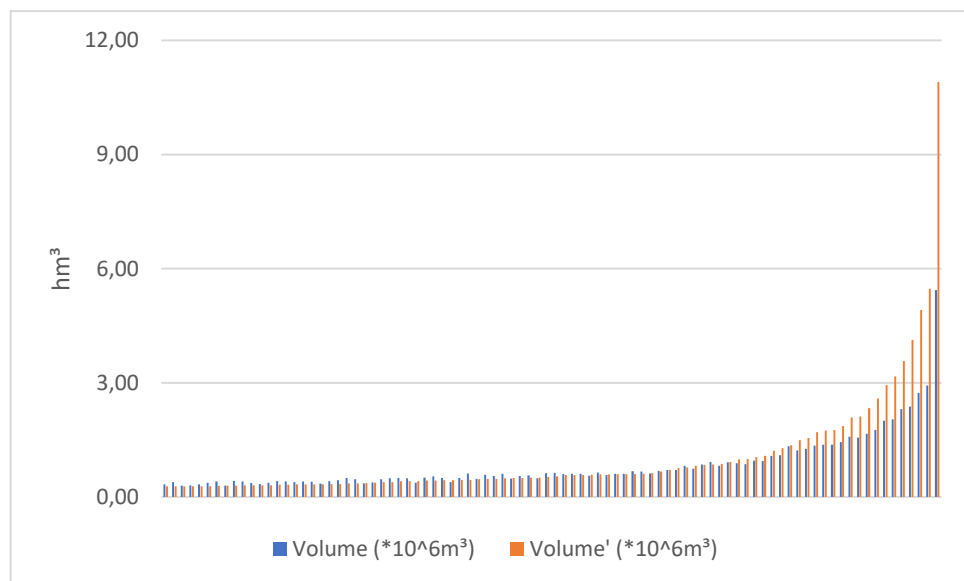
Ao ser realizada a análise os dados obtidos pode-se notar uma majoração nos volumes maiores e uma minoração em volumes menores, além de um aumento no número de outliers quando os dados são dispostos em diagrama de caixa. O Gráfico 6 apresenta o diagrama de caixa dos volumes obtidos anteriormente (Volume) e dos volumes obtidos com α mod e k mod regionais (Volume'). O Gráfico 7 demonstra um comparativo entre os reservatórios onde é possível constatar a superestimação dos reservatórios maiores, aumentando assim o erro descrito por Pereira *et al* (2019).

Gráfico 6: Diagrama de caixa dos volumes.



Fonte: Autor (2022).

Gráfico 7: Comparação ponto a ponto dos volumes obtidos.



Fonte: Autor (2022).

4.4 Classificação dos Reservatórios na RHSC

Desta forma, classificando os reservatórios detectados pela FUNCEME (2008) e sua frequência por classe, obtém-se os dados apresentados na Tabela 8. Sendo realizada a separação por município e por classe, é possível determinar quais áreas têm uma maior ocorrência de reservatórios por classe, como demonstrado na Tabela 9. Constata-se que os

reservatórios classificados como grandes na RHSC têm uma taxa de capacidade de armazenamento alta e uma baixa frequência de ocorrência.

Tabela 8: Volumes por classe de reservatório.

Classe	Volume	Frequência	%	% Acum.
<i>Aguada</i>	28,27	263	70,13%	70,13%
<i>Muito pequeno</i>	41,42	80	21,33%	91,47%
<i>Pequeno</i>	40,02	23	6,13%	97,60%
<i>Médio</i>	48,81	5	1,33%	98,93%
<i>Grande</i>	414,49	4	1,07%	100,00%
Total	573,01	375		

Fonte: Autor (2022).

Tabela 9: Volumes de reservatórios classificados por município.

Classificação	Ararendá	Cratéus	Independência	Ipap.	Ipueiras	Nova Russas	Novo Oriente	Quiteriá-nópolis	Tamboril	TOTAL
<i>Aguada</i>	1,98	9,83	7,77	2,18	0,41	0,38	0,94	1,93	2,86	28,27
<i>Muito pequeno</i>	0,50	14,71	10,53	1,50	0,00	0,33	2,65	2,95	7,12	40,29
<i>Pequeno</i>	1,56	14,67	9,80	1,33	1,32	1,08	2,00	5,33	2,93	40,02
<i>Médio</i>	0,00	36,99	3,77	4,29	0,00	0,00	0,00	0,00	3,75	48,81
<i>Grande</i>	0,00	87,69	215,5	0,00	0,00	0,00	111,30	0,00	0,00	414,49

Fonte: Autor (2022).

Fazendo uma análise de comparação de Volumes e Áreas por classe, constata-se que os grandes reservatórios possuem capacidade de armazenamento 261% maior que as outras classes juntas em uma área que representa 81% da soma das áreas referentes as outras classificações de açudes.

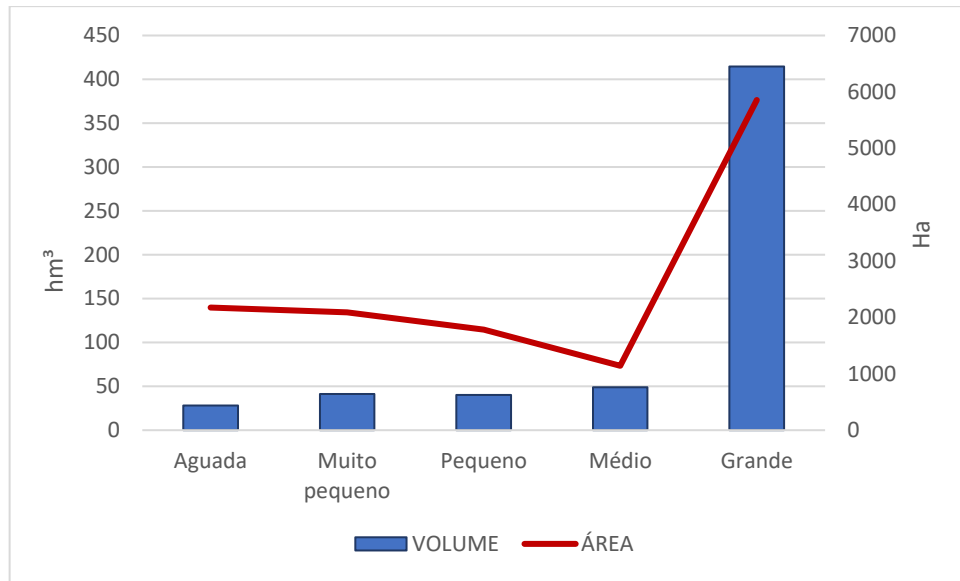
O Gráfico 8 apresenta os dados de Área e Volumes acumulados para cada classe de reservatório para a RHSC.

Tabela 10: Volume total acumulado e área ocupada por classe de reservatório.

	VOLUME (hm³)	ÁREA (ha)
<i>Aguada</i>	28,27	2176,37
<i>Muito pequeno</i>	41,42	2087,71
<i>Pequeno</i>	40,02	1781,55
<i>Médio</i>	48,81	1142,23
<i>Grande</i>	414,49	5855,98

Fonte: Autor (2022).

Gráfico 8: Relação Volume x Volume acumulado percentual dos reservatórios da RHSC.



Fonte: Autor (2022).

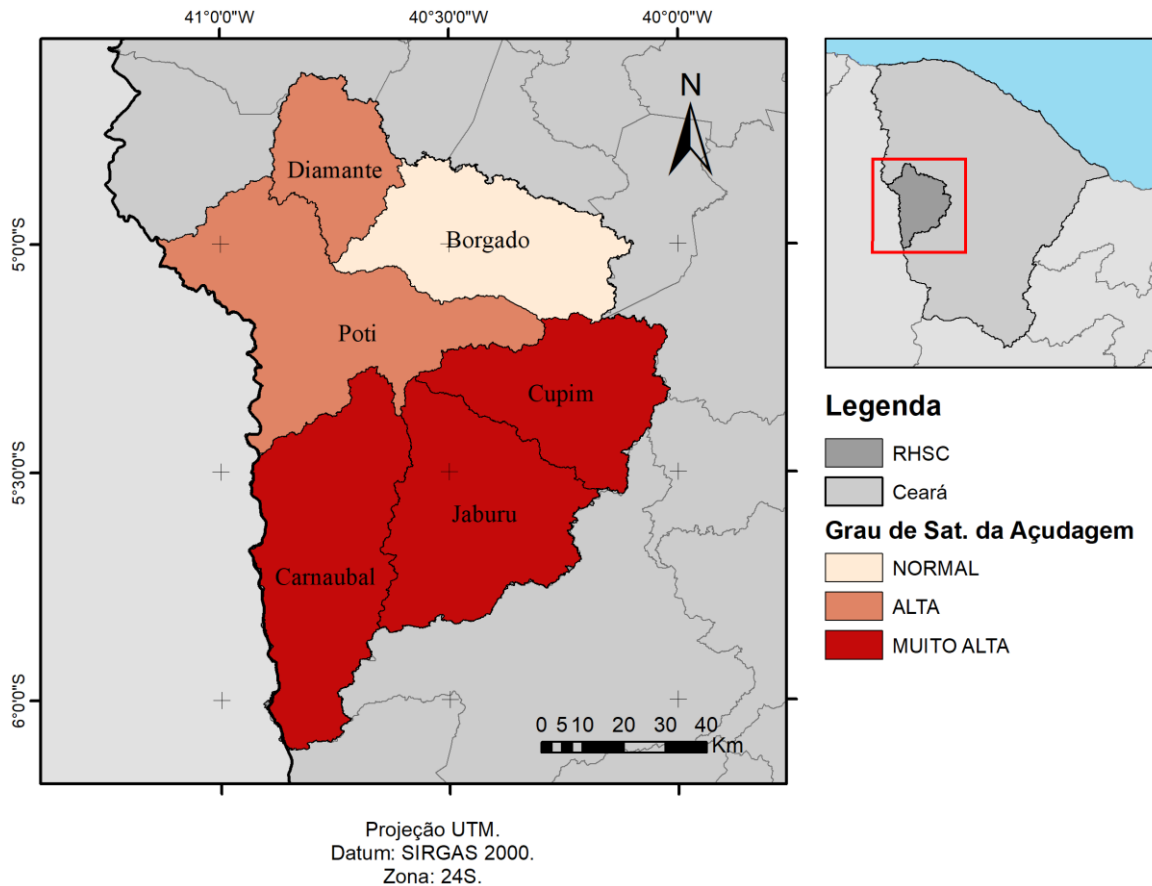
4.5 Índice do grau de saturação da açudagem

O índice do grau de saturação da açudagem permite uma análise da saturação de reservatórios em uma bacia hidrográfica. Os valores para a afluência anual média foram realizados com os deflúvios anuais médios apresentados pelo PERH (1992). A Figura 9 ilustra o IGAS para a RHSC.

Observa-se que as sub bacias Carnaubal, Jaburu e Cupim apresentam uma saturação de açudagem Muito Alta, que pode ser explicado pela presença dos reservatórios Carnaubal e Flor do Campo, na sub bacia Carnaubal, do reservatório Jaburu II na bacia Jaburu e dos reservatórios Barra Velha, Sabóia II e Cupim na bacia Cupim.

A sub bacia Diamante apresentou um grau de saturação alto devido ao reservatório São José. A sub bacia Poti apresentou um grau alto de saturação pela presença de reservatórios médios no seu território, como o Açude Realejo e pela alta densidade de reservatórios pequenos. A sub bacia Borgado foi a única a apresentar um grau de saturação normal, sendo seu maior reservatório o açude Sucesso, com 10hm³ de capacidade de armazenamento.

Figura 9: Mapa de Saturação de açudagem para a RHSC.



5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou apresentar um estudo claro e conciso, o qual objetivou determinar o cenário da acumulação de água na região hidrográfica dos sertões de Crateús e as formas simplificadas para esta determinação.

Utilizou-se o levantamento realizado pela FUNCEME em 2008, o qual possibilitou determinar a existência de 375 espelhos de água inseridos na região com mais de 5 hectares de área de bacia hidráulica.

Através da utilização de ferramentas computacionais, dentre elas o SIG e de metodologias de medição de volume indiretas propostas por Pereira *et al* (2019), foi possível a determinação dos volumes dos reservatórios detectados.

Os 93 maiores reservatórios não monitorados tiveram seus volumes estimados neste estudo para determinação das capacidades acumuladas, como forma de demonstrar a grandeza dos volumes que podem ser inclusos no planejamento hídrico para abastecimento urbano,

dessedentação animal e irrigação.

Dos 375 reservatórios detectados, 263 podem ser considerados como aguadas, 80 como muito pequenos, 23 pequenos, 5 médios e 4 grandes, de acordo com a classificação proposta pelo PERH (1992).

O levantamento periódico realizado pela FUNCEME se mostra como um meio confiável para a determinação da situação hídrica da RHSC em um determinado momento, mostrando a realidade referente a um ano e não apenas em momentos de armazenamento máximo.

Determinou-se também a saturação da açudagem nas sub bacias, que foram separadas considerando a presença de grandes reservatórios, área correspondente e densidade de reservatórios menores. Nota-se que o município de Independência possui uma alta capacidade de armazenamento, mas em contra ponto possui uma alta densidade da açudagem e um baixo deflúvio médio anual, fatores que podem ser causa conjunta do grande impacto que as últimas estiagens tiveram na região.

Podemos observar também que a utilização de coeficientes geométricos regionais agrava o erro da equação proposta, majorando os volumes dos reservatórios maiores.

Como pôde ser observado no estudo, a RHSC é amplamente constituída por reservatórios muito pequenos e aguadas, que trazem pouca importância estratégica e não trazem uma segurança interanual para o armazenamento hídrico. Estes reservatórios menores são por muitas vezes construídos sem acompanhamento técnico pelos donos de terras, que o fazem sem as devidas licenças e estudos, gerando um impacto geral na regularização dos reservatórios maiores, tornando o acúmulo de água sazonal e de pouco ou nenhum impacto estratégico.

Desta forma, os objetivos propostos para este trabalho foram amplamente alcançados com êxito. Sugere-se para trabalhos futuros uma análise de saturação e volumes acumulados seccionados às bacias hidrográficas dos grandes reservatórios da RHSC, como o Jaburu II, Barra Velha, Flor do Campo, Carnaubal e Realejo, gerando um entendimento da açudagem particular à montante destes açudes e os impactos gerados nos seus regimes de regularização hídrica.

É indicado também analisar como este estudo se comportaria em outras regiões hidrográficas, realizando os mesmos processos indicados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- CAMPOS, J. N. B. A evolução das políticas públicas no Nordeste. Em: **A questão da água no Nordeste**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. Brasília/DF: [s.n], 2012. 436 p.
- CEARÁ. Assembleia Legislativa, **Caderno Regional das Bacias Poti-longá** / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará ; INESP. Eudoro Walter de Santana (Coordenador). Fortaleza - CE: INESP, v. 10, 2009. 112 p.
- CEARÁ. Secretária de Desenvolvimento Agrário. Governo do Estado do Ceará. **Projeto São José IV**. Fortaleza/CE: [s.n]. 2020.
- CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; CAMPOS, J. N. B.. A questão da água no semiárido brasileiro. In: Bicudo, C.E. de M; Tundisi, J.G.; Scheuenstuhl, M.C.B.. (Org.). **Águas do Brasil análises estratégicas**. , v. 1, 1º ed. São Paulo/SP: Instituto de Botânica, 2010, 81-91 p.
- CIRILO, J. A. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido**. Estudos Avançados, São Paulo/SP, v. 22, n. 63, 2008, 61-82 p.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Mapeamento dos espelhos d'água do Brasil**. Fortaleza-CE: [s.n], 2008.
- MOLLE, F. **Geometria dos Pequenos Açudes**. 3ª ed., Recife: SUDENE-DPG/PRN/HME, 1994 (a). 139 p.
- MOLLE, F. **Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento**. Recife: SUDENE-DPG/PRN/HME, 1994 (b). 198 p.
- MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do Pequeno Açude**. 3ª ed., Recife: SUDENE-DPG/PRN/HME, 1992. 528 p.
- PEKEL, J. F. et al. **High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes**. Natureza 540. 2016. 418-422 p.
- PEREIRA, B. et al. Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, [s.l.]: [s.n], 2019. 66-79 p.
- PINHEIRO, F. D. **Açudagem Particular em Cooperação no Ceará**. v. 1 Fortaleza/CE: Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS, 2004, 732 p.
- ROCHA, E. da J. T. **Avaliação do nível de saturação da açudagem na bacia hidrográfica do rio Acaraú - Ceará**. Fortaleza - CE: Revista Tecnologia, v. 33, n. 2, 2012, 122–132 p.
- SAWUNYUMA, ENDAI. **Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo river basin using geographical information systems (GIS) and remotely sensed surface**

areas: A case of Mzingwane catchment. v. 31, 15-16 ed, [s. l.]: *Física e Química da Terra*, Partes A/B/C, 2005, 935 – 943 p.

STUDART, T. M. C. et al. **Democratização na distribuição espacial de água no nordeste semi-árido e a eficiência hidrológica de um sistema de reservatórios superficiais.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. Anais... João Pessoa/PB: ABRH, 2005. 1-16 p.