



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL

MARINA DE PAULA MOURA

**USO DE PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA  
ATUALIZAÇÃO DE CURVAS-COTA-ÁREA-VOLUME EM RESERVATÓRIOS DE  
ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM PERNAMBUCO**

Recife  
2021

MARINA DE PAULA MOURA

**USO DE PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ATUALIZAÇÃO DE  
CURVAS COTA-ÁREA-VOLUME EM RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO  
DE ÁGUA EM PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de Concentração:** Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.

Recife

2021

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

M929u

Moura, Marina de Paula.

Uso de produtos de sensoriamento remoto para atualização de curvas cota-  
área-volume em reservatórios de abastecimento de água em Pernambuco /  
Marina de Paula Moura. – 2021.

71 f.: il., figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. ISODATA. 3. Gestão de recursos hídricos. 4.  
Semiárido. I. Ribeiro Neto, Alfredo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-253

MARINA DE PAULA MOURA

**USO DE PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ATUALIZAÇÃO DE  
CURVAS COTA-ÁREA-VOLUME EM RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO  
DE ÁGUA EM PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 05/03/2021.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Bruno Collischonn (Examinador Externo)  
Agência Nacional de Águas

---

Profa. Dra. Iana Alexandra Alves Rufino (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Campina Grande

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tornar tudo isso possível e sempre caminhar do meu lado em todos os momentos.

Aos meus pais, por serem parceiros em todos os momentos, me apoiando e me guiando sempre. Maryelly, minha mãe, por me ensinar a ser uma pessoa melhor a cada dia e Rogério, meu pai, por me fazer acreditar que eu sou capaz do que eu quiser. À minha irmã, Natalia pela parceria e risadas de todas as horas. E a todos meus familiares por me incentivar e me apoiar, meus avós, Jorge e Luzia, a minha tia e madrinha Gisele e meu tio Marcelo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto, de modo especial, por todo aprendizado e apoio ao longo de todo o mestrado, pela confiança e parceria e pela orientação desse trabalho, minha imensa gratidão.

À Thayron Barbosa, meu companheiro para vida, por todo o amor e carinho, pela paciência e parceria em todos os momentos. Aos meus amigos ‘Varzeanos’ por todos os momentos de alegria, em especial à minha grande amiga Arivânia Rodrigues.

A todos meus amigos do GRH, pelas conversas, apoio e aprendizados, em especial à Lysanne, Maiana e Raquel. Aos colegas de pesquisa Gabriel Oliveira e Márcio Emanuel por contribuir com o desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores que compõem o corpo docente do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) pelos aprendizados, em especial a professora Leidjane Oliveira, pelo carinho e atenção.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de pós-graduação, ao Governo do estado de Pernambuco pela disponibilização do banco de dados do PE3D e à APAC pelo fornecimento dos dados, em nome de Wagner Felipe, Luiz Augusto e Suzana Montenegro.

À Agência Nacional de Águas (ANA) pelo fornecimento dos dados que permitiram a realização desse trabalho, em nome de Geraldo Lucatelli, Alexandre do Padro, Diego Pena, Antônio Lima.

## RESUMO

Os reservatórios são a principal forma de abastecimento de água do semiárido pernambucano, devido a constante escassez hídrica que aflige essa região. O conhecimento da quantidade de água disponível é extremamente importante para uma gestão efetiva dos recursos hídricos que atenda a todos os usos. O cálculo do volume de água armazenado nos reservatórios é realizado por meio da relação cota-área-volume (CAV), no entanto, na grande parte dos reservatórios localizados no semiárido, essa relação se apresenta desatualizada. Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo avaliar uma forma alternativa que permita estimar a CAV através do uso de imagens de satélite, além de avaliar a potencialidade de uso de relações volume em função da área superficial. A metodologia para a primeira abordagem foi aplicada para três reservatórios do semiárido pernambucano e para a segunda abordagem foram utilizados 68 reservatórios, sendo que 8 deles tiveram as CAVs atualizadas no desenvolvimento deste trabalho. Os resultados da estimativa das CAVs por imagens de satélite foram comparados com as CAVs atualizadas dos reservatórios, sendo encontrados erros relativos menores que 2% para as capacidades máximas de armazenamento e esse valor foi de 0,5% para o reservatório Barra do Juá. Dessa forma, essa metodologia se mostrou de grande potencial para aplicação em demais reservatórios de regiões semiáridas, para as relações volume-área. Os coeficientes encontrados não apresentaram um padrão de comportamento quando relacionados ao relevo do território pernambucano, no entanto, essa relação pode ser avaliada a partir de outras variáveis, como área superficial e área de drenagem da bacia contribuinte.

Palavras-chave: ISODATA; gestão de recursos hídricos; semiárido.

## **ABSTRACT**

Reservoirs are the main source for water supply in the semiarid region of Pernambuco, due to the constant water scarcity that impacts this region. The monitoring of the amount of water available is important for an effective management of water resources in order to meet all uses. The calculation of the volume of water stored in the reservoirs is carried out using the stage-area-volume (SAV) relationship. However, in most reservoirs located in the semiarid, this relationship is out of date. In this sense, this research aims to evaluate an alternative way that allows to estimate the SAV using satellite images, in addition to evaluating the potentiality of using volume relationships according to the surface area. The methodology for the first approach was applied to three reservoirs in the semiarid region of Pernambuco and, for the second approach, 68 reservoirs were used, with 8 of them having the SAVs updated in the development of this research. The estimates of the SAVs obtained by satellite images were compared with the updated SAVs of the reservoirs, with relative errors lower than 2% found for the maximum storage capacities and this value was 0.5% for the Barra do Juá reservoir. Thus, this methodology showed great potential for application in other reservoirs in semiarid regions. For the volume-area relationships, the coefficients found did not show a pattern of behavior when related to the relief of the Pernambuco territory, however, this relationship can be evaluated using other variables, such as surface area and drainage area.

**Keywords:** ISODATA; water resource management; semiarid.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dimensões e indicadores do índice de segurança hídrica (ISH) .....	19
Figura 2 - Dimensão Resiliência do Índice de Segurança Hídrica de Pernambuco .....	19
Figura 3 - Relação entre o número de reservatórios e açudes artificiais e a área (ha) para o estado de Pernambuco.....	21
Figura 4 - Reservatórios artificiais no estado de Pernambuco .....	21
Figura 5 - Principais usos da água nos reservatórios pernambucanos .....	22
Figura 6 - Ecobatímetros de feixe único (esquerda) e múltiplo feixes (direita).....	26
Figura 7 - Metodologia das duas abordagens adotadas na pesquisa .....	27
Figura 8 - Localização dos reservatórios pernambucanos utilizados para estimar a CAV a partir das imagens de satélite.....	28
Figura 9 - Comportamento espectral do solo seco, da vegetação e da água .....	33
Figura 10 - Representação do processo de classificação de um pixel pelo conceito de distância mínima. As linhas cheias indicam as medidas da distância mínima para um pixel candidato às classes. ....	35
Figura 11 - Localização dos reservatórios pernambucanos utilizados para a construção da relação do tipo $V = f(A)$ .....	41
Figura 12 - Precipitação média anual no estado de Pernambuco .....	41
Figura 13 - Exemplo do produto do mapeamento do PE3D: Ortoimagem do reservatório Barra do Chapéu (A); Modelo Digital do Terreno(B); .....	43
Figura 14 - Curvas de nível geradas a partir do MDT para o reservatório Rancharia.....	44
Figura 15 - Bacia hidráulica adotada para o reservatório Rancharia e buffer de 50 m (linha laranja) (A); Recorte MDT utilizando o buffer (B).....	44
Figura 16 - Exemplo de determinação de $\alpha_1$ e $K_1$ por regressão linear sobre os pares de profundidade e volume .....	46
Figura 17 - Zonas do relevo do PERH e os valores dos coeficientes $\alpha_1$ para os reservatórios selecionados com CAV atualizada .....	50
Figura 18 - Zonas do relevo do PERH e os valores dos coeficientes $K_1$ para os reservatórios selecionados com CAV atualizada .....	50
Figura 19 - Imagem com a composição RGB das bandas 452, para o LANDSAT 5 (A.). Imagem classificada pela metodologia ISODATA (B.). Duas classes que foram identificadas como “água” (C.). União das classes “água” para cálculo da área inundada do reservatório (D.).....	52

Figura 20 - Relação da área superficial da CAV de referência e da estimada com as imagens versus o nível de água do reservatório Poço da Cruz .....	54
Figura 21 - Relação da área superficial da CAV de referência e da estimada com o nível de água do reservatório Barra do Juá .....	56
Figura 22 - Relação da área superficial da CAV de referência e da estimada com o nível de água do reservatório Jucazinho .....	57
Figura 23 - Relação do volume da CAV de referência e da estimada com o nível de água do reservatório Poço da Cruz .....	60
Figura 24 - Relação do volume da CAV de referência e da estimada com o nível de água do reservatório Barra do Juá.....	62
Figura 25 - Relação do volume da CAV de referência e da estimada com o nível de água do reservatório Jucazinho.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos reservatórios selecionados .....	29
Tabela 2 - Data das imagens e dados de nível d'água, utilizados para o reservatório Poço da Cruz .....	31
Tabela 3 - Data das imagens e dados de nível d'água, utilizados para o reservatório Barra do Júá .....	31
Tabela 4 - Data das imagens e dados de nível d'água, utilizados para o reservatório Jucazinho .....	32
Tabela 5 - Características dos reservatórios selecionados para atualização da CAV .....	39
Tabela 6 - Capacidades máximas dos reservatórios com CAV atualizada .....	39
Tabela 7 - Capacidades e área superficial máximas dos reservatórios obtidas com a curva-cota-área-volume a partir do MDT .....	47
Tabela 8 - Coeficientes das relações do tipo $V = f(A)$ para os reservatórios com a CAV atualizada.....	47
Tabela 9 - Coeficientes $\alpha_1$ e $K_1$ da relação $V = f(A)$ em função do relevo.....	49
Tabela 10 - Dados das imagens de satélite do reservatório Jucazinho para comparação das áreas estimadas .....	51
Tabela 11 - Área superficial calculada para as imagens do reservatório Jucazinho em $m^2$ .....	51
Tabela 12 - Área superficial calculada para as imagens do reservatório Poço da Cruz, em $m^2$ e diferenças entre os valores de referência e estimados.....	53
Tabela 13 - Área superficial calculada para as imagens do reservatório Barra do Juá, em $m^2$ e diferenças entre os valores de referência e estimados.....	55
Tabela 14 - Área superficial calculada para as imagens do reservatório Jucazinho, em $m^2$ e diferenças entre os valores de referência e estimados .....	57
Tabela 15 - Volume calculado para as imagens do reservatório Poço da Cruz, em $hm^3$ e diferenças entre os valores de referência e estimados .....	58
Tabela 16 - Parâmetros estatísticos do teste $t$ pareado para os volumes do reservatório Poço da Cruz .....	61
Tabela 17 - Volume calculado para as imagens do reservatório Barra do Juá, em $hm^3$ e diferenças entre os valores de referência e estimados .....	61
Tabela 18 - Parâmetros estatísticos do teste $t$ pareado para os volumes do reservatório Barra do Juá.....	63

Tabela 19 - Volume calculado para as imagens do reservatório Jucazinho, em hm <sup>3</sup> e diferenças entre os valores de referência e estimados .....	63
Tabela 20 - Parâmetros estatísticos do teste <i>t</i> pareado para os volumes do reservatório Jucazinho .....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAV	Curva cota-área-volume
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
ISODATA	Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
PE3D	Programa Pernambuco Tridimensional
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Papel dos reservatórios no abastecimento de água no estado de Pernambuco</b>	<b>17</b>
2.1.1	<i>Segurança e disponibilidade hídrica</i>	17
2.1.2	<i>Reservatórios pernambucanos</i>	20
<b>2.2</b>	<b>Uso de produtos de sensoriamento remoto aplicado a reservatórios</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Geometria de reservatórios</b>	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>Obtenção das curvas cota-área-volume</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Estimativa da curva CAV para reservatórios a partir de imagens de satélite (abordagem 1)</b>	<b>28</b>
3.1.1	<i>Área de estudo</i>	28
3.1.2	<i>Produtos de sensoriamento remoto</i>	29
3.1.2.1	Imagens de satélite	29
3.1.3	<i>Dados topobatimétricos e dados de nível</i>	30
3.1.4	<i>Estimativa da área superficial dos reservatórios</i>	32
3.1.4.1	Índices espectrais	33
3.1.4.2	ISODATA	34
3.1.5	<i>Estimativa do volume nos reservatórios</i>	36
<b>3.2</b>	<b>Relação área em função do volume e geração das curvas CAV (abordagem 2)</b>	<b>38</b>
3.2.1	<i>Área de estudo</i>	38
3.2.2	<i>Produtos de sensoriamento remoto</i>	42
3.2.2.1	Pernambuco Tridimensional (PE3D)	42
3.2.3	<i>Geração da curva cota-área-volume a partir do MDT</i>	43
3.2.4	<i>Relação volume em função da área superficial dos reservatórios</i>	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Relação volume em função da área superficial</b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>Estimativas das áreas superficiais</b>	<b>51</b>
4.2.1	<i>Reservatório Poço da Cruz</i>	52
4.2.2	<i>Reservatório Barra do Juá</i>	55

4.2.3	<i>Reservatório Jucazinho</i>	57
<b>4.3</b>	<b>Estimativas das curvas cota-volume</b>	<b>58</b>
4.3.1	<i>Reservatório Poço da Cruz</i>	58
4.3.2	<i>Reservatório Barra do Juá</i>	61
4.3.3	<i>Reservatório Jucazinho</i>	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas regiões onde a disponibilidade hídrica é reduzida, as crises por incompatibilidade entre oferta e demanda de água são muito recorrentes. Esse é o caso do nordeste brasileiro, com destaque para o semiárido, região na qual a variabilidade temporal dos baixos volumes precipitados associada às características geológicas dominantes, com predomínio de solos rasos no topo das rochas cristalinas, provocam uma reduzida transferência de água do rio para o solo adjacente, e vice-versa (CIRILO, 2008).

Essa condição natural resulta em uma densa rede de rios intermitentes e, conseqüentemente, escassez de água nos períodos secos do ano, sendo, portanto, necessário buscar alternativas que garantam o abastecimento e o suprimento das demandas de água. Nesse sentido, a utilização de reservatórios torna-se uma das principais soluções empregadas na região nordeste, como uma alternativa de armazenamento de água para os períodos de estiagem (FONTES et al., 2015).

Diante dessa realidade de escassez hídrica, o conhecimento da quantidade de água armazenada nos reservatórios de forma precisa e atualizada fornece dados e informações essenciais para auxiliar na gestão efetiva dos recursos hídricos, apoiando os processos de tomada de decisão (ANA, 2016b). Os dados acerca da disponibilidade de água no reservatório são calculados com curvas que relacionam o nível d'água, área de superfície e volume de armazenamento, também chamada de relação cota-área-volume, abreviado como CAV.

A obtenção da CAV é realizada com base em levantamento topográfico antes da construção da barragem ou levantamento batimétrico quando o reservatório está cheio de água. No entanto, as técnicas tradicionais de topobatimetria possuem alto custo e, em muitos casos, os reservatórios não possuem curvas atualizadas após décadas de operação, precisando utilizar os dados da época de construção dos reservatórios. Diante disso, surgem alguns problemas pois a técnica utilizada na época de projeto do reservatório para aquisição das curvas originais muitas vezes é desatualizada e imprecisa, além da falta de informação sobre a metodologia utilizada, que datam em muitos casos da década de 1950-1970, levantam dúvidas sobre a consistência dessa informação (COLLISCHONN e CLARKE, 2016).

Outro problema é referente ao processo de assoreamento natural, no qual ocorre o transporte de sedimentos pelo curso do rio e faz com que esses se depositem no fundo do reservatório diminuindo sua capacidade de armazenamento ao longo do tempo, que resulta na necessidade de atualização periódica das CAVs. Entretanto, são poucos os reservatórios de regularização do semiárido que têm uma sistemática contínua de estimativa da batimetria. Uma alternativa que apresenta um custo reduzido e que permite atualizar as curvas cota-área-volume é o uso de sensoriamento remoto (ABILEAH, VIGNUDELLI; SCOZZARI, 2011).

A utilização de imagens de satélite para monitorar corpos d'água aumentou substancialmente nas últimas décadas. Sobral et al. (2017) observa que, na Diretiva Quadro da Água (DQA) nº 2000/60/CE, documento que estabelece um quadro de ação comunitária no domínio da política da água da União Europeia, o monitoramento dos corpos hídricos por satélite já vem sendo sugerido e implementado para se obter informações sobre a qualidade das águas.

A série temporal das áreas de superfície, obtidas através das imagens de satélite, é usada para monitorar a condição de lagos e reservatórios em todo o mundo levando em consideração aspectos como gestão de recursos hídricos (DEUS e GLOAGUEN, 2013), monitoramento multitemporal (ROKNI et al., 2014; SCHWATKE et al., 2019), variabilidade climática (WANG et al., 2017) e impactos ambientais (LAMSAL et al., 2019). Além disso, também pode ser útil para caracterizar a geometria de lagos em combinação com altimetria de satélite (ARSEN et al., 2014; BAUP et al., 2014) e nível de água in situ (COLLISCHON e CLARKE, 2016).

Diante desse contexto, esse trabalho visa avaliar alternativas para atualização de curvas cota-área-volume de reservatórios com uso de produtos de sensoriamento remoto de acesso gratuito de modo a permitir a redução dos custos com levantamento topobatimétrico. Pretende-se com este trabalho apresentar uma alternativa tecnicamente viável e de baixo custo para a atualização de curvas cota-área-volume ou área-volume para reservatórios de abastecimento em Pernambuco.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, será avaliada uma metodologia de obtenção da área superficial dos reservatórios através do uso de imagens de satélite de acesso gratuito. O valor de área permite obter o volume armazenado nos reservatórios a partir das relações  $V=f(A)$ . Essas relações também serão avaliadas utilizando os dados de

reservatório com as CAVs atualizadas para obtenção de coeficientes de ajuste que serão comparados com os valores indicados no Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) (Pernambuco, 1998).

Nesse sentido, o objetivo geral do trabalho é empregar produtos de sensoriamento remoto em estudos que envolvam a caracterização volumétrica de reservatórios. De forma complementar, os seguintes objetivos específicos foram trabalhados:

- Testar o método de classificação supervisionada ISODATA para estimar a área superficial dos reservatórios em diferentes níveis de elevação da água;
- Calcular a área e volume em reservatórios com o uso de produtos do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D);
- Avaliar a potencialidade de uso de relações que estimam o volume armazenado com a área superficial [ $V = f(A)$ ] para ser aplicado em reservatórios sem monitoramento de nível da água.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A presente seção apresenta uma revisão bibliográfica com o intuito de caracterizar a região de estudo associado ao uso dos reservatórios, além disso será apresentada uma breve discussão acerca da utilização de sensoriamento remoto aplicado a reservatórios. E, por fim, é apresentado também definições sobre a geometria e as CAVs.

### **2.1 Papel dos reservatórios no abastecimento de água no estado de Pernambuco**

A construção de reservatórios de regularização de vazões que armazenem volumes no período de chuvas para garantir o suprimento nos períodos de estiagem é uma solução estratégica, que visa potencializar a disponibilidade hídrica. Sua finalidade é manter a água armazenada durante uma estação seca ou por vários anos. Em concordância com a importância dessas estruturas hídricas, um estudo foi realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) entre 2015 e 2017, cujo objetivo consistiu em analisar os problemas e as potencialidades dos grandes sistemas de reservatórios da região Nordeste, englobando um total de 204 reservatórios (ANA, 2017).

O estado de Pernambuco apresenta 88% de seu território na região semiárida, onde, segundo dados do Atlas de Abastecimento Urbano (ANA, 2010), mais de 83% dos municípios utilizam exclusivamente os mananciais superficiais (rios e reservatórios) como fonte de abastecimento da população. Desses municípios, 75% empregam o uso dos reservatórios na captação de água para o suprimento dessa demanda.

Logo, o conhecimento dos recursos disponíveis nos reservatórios e nos cursos d'água são essenciais para diminuir o grau de incerteza no processo de tomada de decisão e proporcionar uma gestão adequada dos recursos hídricos.

#### *2.1.1 Segurança e disponibilidade hídrica*

A Segurança Hídrica, de acordo com UN-Water (2013), é a capacidade de uma população salvar o acesso sustentável a quantidades adequadas de água com qualidade aceitável, de maneira a permitir o bem-estar humano e o desenvolvimento socioeconômico. Há também o objetivo de assegurar a proteção contra doenças de

veiculação hídrica, e os desastres relacionados com a água, além da preservação dos ecossistemas num clima de paz e estabilidade política.

Trabalhos de pesquisa voltados à gestão da água têm ressaltado a diferenciação entre caminhos que podem ser tomados para a melhoria das condições de segurança hídrica. Os caminhos são denominados “Hard Path” e “Soft Path”, onde o primeiro é relacionado à construção e ampliação de infraestrutura hídrica como reservatórios, adutoras, canais e transposição de bacias, enquanto o segundo relaciona-se a aspectos sociais e organizacionais como cobrança da água, conscientização da população, governança e mudança do comportamento das pessoas (SCOTT; LUTZ-LEY, 2016).

Em muitos casos, estas duas estratégias podem ser combinadas para que o aproveitamento da água seja maximizado sem que se comprometa o meio ambiente, geralmente impactado pela construção de infraestrutura. Dessa forma, o papel dos reservatórios deve ser visto considerando todo o sistema formado pela bacia hidrográfica, e deve ser associado com as estratégias “Soft Path” podendo melhorar a resiliência parcial dada pelas soluções baseadas em infraestruturas (SCOTT; LUTZ-LEY, 2016).

A complexidade dos fatores associados a gestão e uso da água apontam a necessidade de estabelecer indicadores de segurança hídrica que, ao mesmo tempo, retratem as diferenças climáticas, sociais e econômicas das regiões possibilitando o entendimento e aplicação de políticas públicas vinculadas à infraestrutura e gestão da água. Nesse sentido, o Índice de Segurança Hídrica (ISH) foi concebido pela Agência Nacional de Águas (ANA) para retratar, com simplicidade e clareza, as diferentes dimensões da segurança hídrica, incorporando o conceito de risco aos usos da água (ANA, 2019).

A composição do ISH foi apresentada no Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), o qual analisou os graus de segurança hídrica do Brasil. O conceito foi estruturado segundo quatro dimensões: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência, sendo cada dimensão composta por outros indicadores que são formados por uma combinação de variáveis mensuráveis. As dimensões e os indicadores utilizados para compor o ISH estão descritos na 1.

Figura 1 - Dimensões e indicadores do índice de segurança hídrica (ISH)

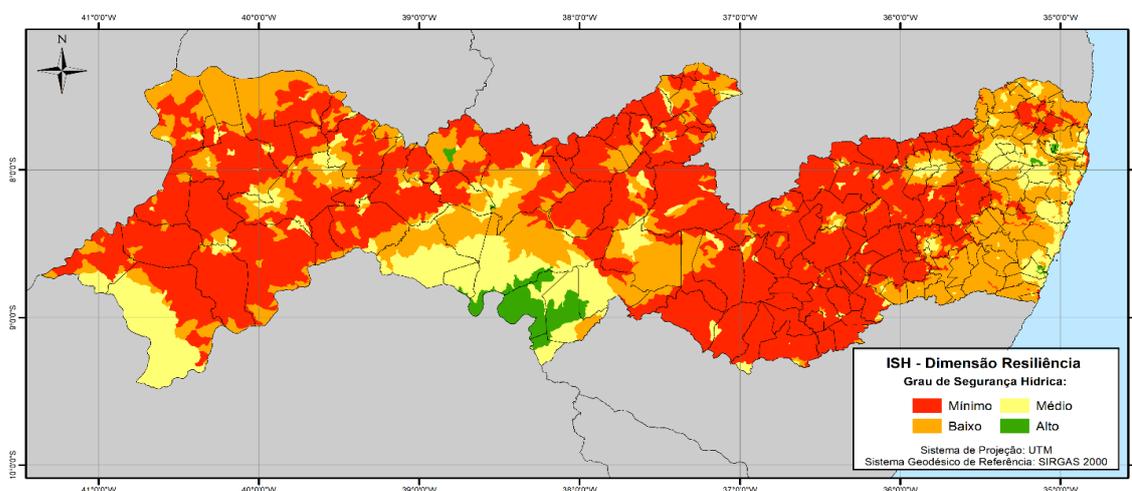
Indicadores do ISH	
DIMENSÃO	INDICADOR
Humana	Garantia de água para abastecimento humano
Econômica	Garantia de água para irrigação e pecuária Garantia de água para atividade industrial
Ecológica	Quantidade adequada de água para usos naturais Qualidade adequada da água para usos naturais Segurança das barragens de rejeito de mineração
Resiliência	Reservação artificial Reservação natural Potencial de armazenamento subterrâneo Variabilidade pluviométrica

Fonte: ANA (2019).

Para quantificar os déficits de atendimento às demandas hídricas do abastecimento humano e do setor produtivo, são verificadas as dimensões humana e econômica. Para identificar as áreas mais críticas e vulneráveis, são verificadas as dimensões ecológica e de resiliência.

O grau de segurança hídrica do Brasil conforme o ISH apresenta cinco níveis de classificação: máximo, alto, médio, baixo e mínimo. No estado de Pernambuco não há nenhuma região classificada com o grau máximo de segurança, pelo contrário, a maior parte do estado (84%), está classificada com um grau de segurança mínima ou baixa para a dimensão resiliência. Apenas 2% do território estadual apresenta a classificação alta, entretanto, essa concentração localiza-se na região limitrófe ao reservatório de Itaparica-BA, podendo ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Dimensão Resiliência do Índice de Segurança Hídrica de Pernambuco



Fonte: Adaptado de ANA (2019).

Analisando os resultados da dimensão de resiliência do ISH para o estado de Pernambuco é notável que a maioria das áreas apresenta grande vulnerabilidade, fato que está associado a parcela do estado que localizada na região semiárida, onde há uma grande variabilidade e baixos índices de precipitação que contribuem para os reduzidos valores de disponibilidade hídrica. Além disso, como dito anteriormente, as condições geológicas dessa região desfavorecem o armazenamento de águas subterrâneas. Sendo assim, o estado requer uma infraestrutura hídrica mais complexa e em geral de caráter integrado, com abrangência regional capaz de mitigar a condição de insegurança hídrica.

A compreensão da disponibilidade hídrica superficial do estado também é um fator importante para avaliar a infraestrutura hídrica necessária para suprimento das demandas e mitigar a insegurança hídrica. Segundo Cruz e Tucci (2008), a disponibilidade hídrica superficial depende da variabilidade temporal das vazões que pode ser expressa por várias funções hidrológicas.

Nesse sentido, com o objetivo de obter uma referência para as atividades de gestão, regulação e planejamento dos recursos hídricos a ANA estabeleceu uma base de referência de Disponibilidade Hídrica Superficial (ANA, 2016a). Essa base apresenta uma estimativa da disponibilidade hídrica superficial brasileira, baseada em planos de informação e estudos elaborados anteriormente que resultaram em uma base vetorial georreferenciada de trechos de rio.

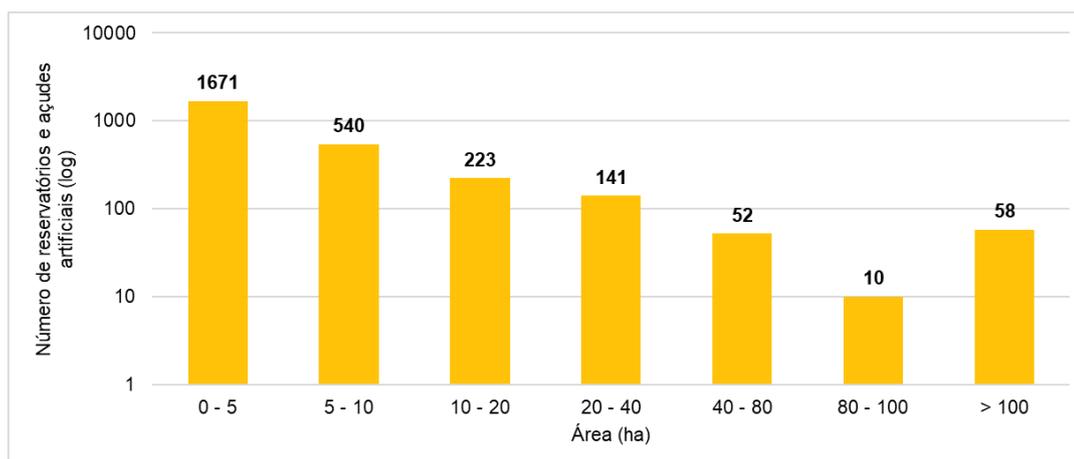
A partir desses dados, a disponibilidade hídrica do semiárido pernambucano apresenta valores das vazões específicas de apenas 20% do valor da disponibilidade hídrica média brasileira, sem a contribuição da bacia amazônica. Além disso, foi identificado que a vazão de regularização dos reservatórios é responsável por quase metade da vazão escoada no semiárido pernambucano, demonstrando a importância da utilização de reservatórios para aumentar a oferta hídrica dessa região.

### *2.1.2 Reservatórios pernambucanos*

As massas d'água são classificadas pela ANA segundo a tipologia de origem em natural ou artificial. Em 2019, o estado possuía um quantitativo de 2.913 massas d'água, sendo 2.695 (93%) dessas classificadas como de origem artificial, ocupando uma área superficial de mais de 54.000 ha, 85% da área total, contra menos de 10.000 ha das massas d'água naturais, 15% do total.

De todos os reservatórios artificiais pernambucanos, a maior parte é considerada como pequeno reservatório, sendo essa a classificação de 82% (2.211) das massas d'água artificiais (área superficial inferior a 10 hectares). Os reservatórios maiores que 100 hectares de área representam apenas 2% do total. A relação entre o número de reservatórios e açudes artificiais por área para o estado de Pernambuco pode ser observada na Figura 3.

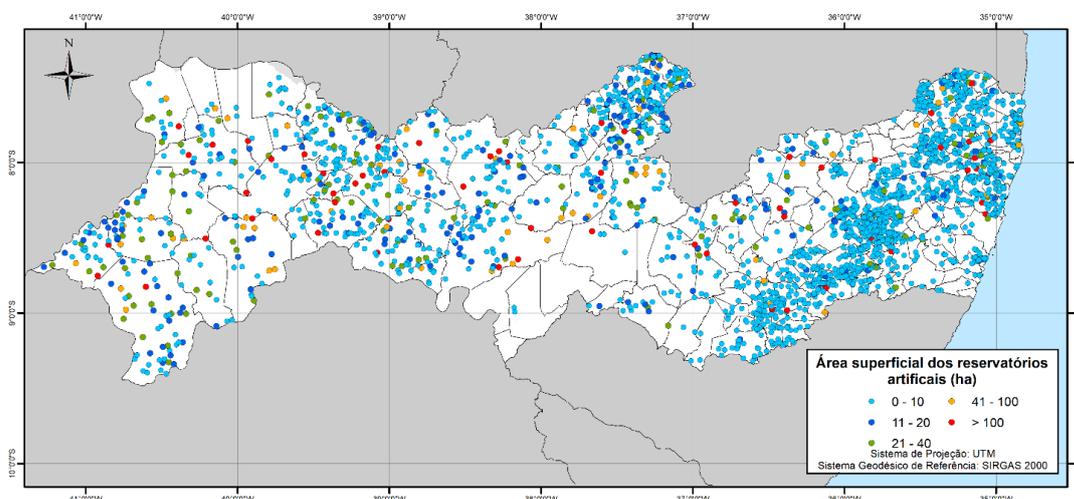
Figura 3 – Relação entre o número de reservatórios e açudes artificiais e a área (ha) para o estado de Pernambuco



Fonte: Adaptado de ANA 2019.

Martins et al. (2007) indicaram que a utilização de pequenos reservatórios está associada à necessidade de distribuição do estoque de água na bacia hidrográfica, uma vez que a disponibilização do recurso hídrico de forma espacializada auxilia no desenvolvimento socioeconômico nas comunidades difusas. A Figura 4 apresenta a distribuição dos reservatórios artificiais no estado, na qual é possível verificar a elevada concentração dos pequenos reservatórios.

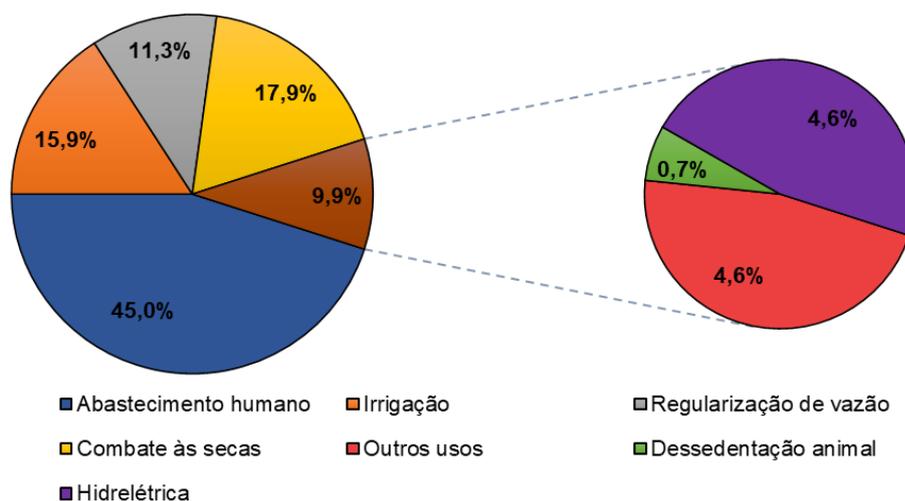
Figura 4 –Reservatórios artificiais no estado de Pernambuco



Fonte: Adaptado de ANA 2019.

Desse banco de dados, apenas 167 reservatórios (cerca de 6%), apresenta informação de volume, totalizando 3.726 hm<sup>3</sup>, sendo todos reservatórios artificiais. Quanto ao uso principal, existem informações para cerca de 151 reservatórios, 5% do total. A Figura 5 apresenta como são distribuídos esses usos.

Figura 5 – Principais usos da água nos reservatórios pernambucanos



Fonte: Adaptado de ANA 2019.

A partir da Figura 5, se observa que o abastecimento humano é o uso preponderante dos reservatórios, seguido dos reservatórios utilizados para o combate às secas e irrigação.

## 2.2 Uso de produtos de sensoriamento remoto aplicado a reservatórios

O sensoriamento remoto é um termo que se refere à obtenção de imagens à distância sobre a superfície terrestre. Estas imagens são adquiridas através de aparelhos denominados sensores remotos. Por sua vez, esses sensores ou câmeras são colocados a bordo de aeronaves ou de satélites de sensoriamento remoto - também chamados de satélites de observação da Terra. Um sensor a bordo do satélite gera um produto de sensoriamento remoto denominado de imagem ao passo que uma câmera aerofotográfica, a bordo de uma aeronave, gera um produto de sensoriamento remoto denominado de fotografia aérea. (STEFFEN et al., 1981).

O uso de produtos de sensoriamento remoto aplicado a reservatórios é uma metodologia que já vem sendo aplicada por diversos autores, com ótimos resultados. As aplicações são diversas como a avaliação da qualidade da água, monitoramento da eutrofização, estimativa da temperatura (SOBRAL et al., 2017), monitoramento de seca

(BACALHAU et al., 2017), estimativa de volume máximo e monitoramento de volume (ABILEAH et al., 2011; AVISSE et al., 2017; BAUP et al., 2014).

A obtenção da curva CAV dos reservatórios utilizando esse tipo de dado foi aplicada por Collischonn e Clarke (2016) que realizaram uma pesquisa com o objetivo de estimar as curvas cota-área-volume de reservatórios do semiárido brasileiro utilizando imagens de satélite e dados de nível d'água. Foram utilizadas imagens Landsat entre os anos de 1994 a 2014. Para quantificar o intervalo de confiança decorrente dessa estimativa, foram avaliados dois métodos. Os resultados foram validados com base em um reservatório que dispõe de batimetria mais atualizada. O volume total do reservatório Boqueirão, resultante da estimativa por sensoriamento remoto, foi de 411 hm<sup>3</sup>, 0,2% inferior ao volume obtido por batimetria convencional (411,7 hm<sup>3</sup>). Para o reservatório Bico da Pedra, foi encontrado uma diferença maior de 10% inferior ao volume máximo obtido da curva atualmente usada. A justificativa desse segundo valor ser maior foi devido à curva atualmente utilizada pelo órgão de controle para essa barragem estar errada, gerando inconsistências no balanço hídrico desse reservatório.

Costa (2019) também utilizou imagens do satélite Landsat para estimar a curva CAV do reservatório Poço da Cruz localizado no semiárido pernambucano. Foram realizadas comparações entre os volumes fornecidos pelo processamento das imagens com os obtidos pelo levantamento topobatimétrico. Os resultados apontaram não haver diferenças significativas entre os volumes obtidos com o processamento das imagens e os registrados pela CAV em levantamento de campo.

Gao et al. (2012) estudaram 34 reservatórios do mundo utilizando dados do MODIS do período de 2000 a 2010. Para o cálculo da área superficial de água, foi utilizada uma classificação não supervisionada. Para os dados de nível, foram utilizados satélites altimétricos. Todas essas informações combinadas foram utilizadas para estimar a CAVs desses reservatórios. Os resultados estimados para o armazenamento foram altamente correlacionados com as observações ( $R = 0,92$  a  $0,99$ ), além disso o erro absoluto médio de armazenamento (expresso como uma porcentagem da capacidade do reservatório) para os reservatórios neste estudo foi de 4%.

Outros trabalhos com o objetivo de estimar a curva CAV dos reservatórios foram elaborados com dados de sensores de bordo em aeronaves como *Ligth Detection and Ranging* (LiDAR), tecnologia utilizada no Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D)

projeto que realizou o recobrimento aerofotogramétrico digital e perfilamento a laser de todo o território estadual (CIRILO et al., 2015).

Nascimento (2017) realizou a comparação das curvas CAVs de barragens monitoradas na bacia do rio Pajeú em Pernambuco, com as curvas obtidas por modelos digitais do terreno de alta resolução provenientes do PE3D, em que foram levantadas as informações de 29 reservatórios. A capacidade de acumulação dos reservatórios secos somadas foi 12,41% inferior ao disponibilizado pelos gestores de recursos hídricos. Cavalcante (2020) também utilizou os MDTs fornecidos pelo PE3D associados aos dados de nível para calcular a CAV de 18 reservatórios localizados no semiárido pernambucano. Apesar de não ter sido utilizado nesta pesquisa, registra-se a utilização do MDT proveniente do PE3D no cálculo da CAV em 9 reservatórios realizado por Ferreira et al. (2019) em Pernambuco.

Nesse sentido, esse trabalho visa contribuir com as estimativas das CAVs empregando produtos de sensoriamento remoto utilizando uma metodologia de classificação para estimar a área superficial dos reservatórios, sendo uma alternativa para os métodos já empregados como o uso dos índices espectrais e valores dos pixels das imagens de satélite. Além disso, a avaliação da potencialidade das relações que estimam o volume armazenado com a área superficial permite a aplicação da metodologia em reservatórios sem monitoramento do nível da água como forma de contribuir para a gestão das águas nas regiões semiáridas.

### 2.3 Geometria de reservatórios

O relevo é um fator determinante para a definição da capacidade de armazenamento em reservatórios. No trabalho pioneiro realizado por Molle (1994), estudou-se a geometria de pequenos açudes do Nordeste do Brasil. A base de dados totaliza 420 reservatórios com volume na ordem de 100.000 m<sup>3</sup> e variação entre 25.000 e 2.000.000 m<sup>3</sup>. O autor apresenta uma função potência para relacionar a profundidade da água e o volume correspondente nos açudes

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

em que  $V$  é o volume em m<sup>3</sup>,  $H$  é a profundidade em metros e  $K$  e  $\alpha$  são parâmetros da relação. De acordo com Molle (1994),  $K$  (chamado de coeficiente de abertura) está

relacionado à abertura geral do cone que representa a área de armazenamento do reservatório. Quanto mais aberto e menos inclinado o vale barrado, maior será o valor de K. O coeficiente  $\alpha$  representa a concavidade das encostas e foi chamado de coeficiente de forma.

Relação semelhante foi proposta por outros autores para relacionar volume com a área superficial (Liebe et al., 2005; Rodrigues e Liebe, 2013):

$$V = K_1 \cdot A^{\alpha_1} \quad (2)$$

Importante ressaltar que os parâmetros  $K_1$  e  $\alpha_1$  possuem valores distintos de K e  $\alpha$  da Equação 1.

Com o uso disseminado de imagens de satélite para estimar a área superficial de reservatórios, a aplicação dessas funções é ainda mais justificada. Pereira et al. (2019) utilizaram os dados dos 420 reservatórios avaliados por Molle (1994) juntamente com outros 312 reservatórios no estado do Ceará com o intuito de testar diferentes abordagens na relação entre a área superficial e o volume. A base para estimativa das áreas foram imagens Landsat e o Global Surface Water Explorer. Pereira et al. (2019) obtiveram um avanço importante na determinação dos coeficientes da Equação 1 por meio do estabelecimento de relações entre os coeficientes e variáveis possíveis de serem obtidas por meio de produtos de sensoriamento remoto: área superficial (A), perímetro do reservatório (P), razão área/perímetro, circularidade dada por  $P^2/A$ , diâmetro, dentre outras variáveis.

As relações entre área da superfície da água e volume armazenado são úteis para, no mínimo, dois tipos de aplicação. A primeira diz respeito à possibilidade de determinação do volume a partir da informação da área nas datas em que há falha de leitura da régua limnimétrica, mas, por outro lado, existe disponibilidade de imagem de satélite para a estimativa da superfície do reservatório. Essa aplicação pode ser uma alternativa para o problema de longas ausências de dados nas séries temporais dos reservatórios. A outra aplicação é a possibilidade de estimativa do volume de água armazenado quando o reservatório está com o nível mínimo detectado, mas não está totalmente seco. É o que acontece no cálculo de CAVs com imagens de satélite como abordado na seção anterior ou no caso do uso do MDT levantado pelo PE3D em que, em alguns casos, o reservatório não está totalmente seco, ou seja, não se tem informação do volume abaixo do nível da água correspondente à data em que foi realizado o sobrevoo. Em ambos os casos, relações como a apresentada na Equação 2 podem ser úteis para estimar o volume correspondente ao nível mínimo no reservatório.

## 2.4 Obtenção das curvas cota-área-volume

A obtenção das curvas cota-área-volume de forma tradicional é realizada através de procedimento em campo onde são realizadas operação batimétricas para levantar a superfície coberta por água e técnicas de topografia complementares para a superfície não coberta pela água.

O levantamento da área coberta pela água é realizado com uso de ecobatímetros de feixe único (single beam) ou múltiplo (multibeam), em barcos que realizam a navegação no lago, em locais preestabelecidos na etapa de planejamento, demarcados por linha de navegação, que são visualizados na tela de um notebook durante a coleta de dados em campo por meio de softwares específicos. A posição da embarcação é corrigida através de um sistema, composto por conjuntos de GPS, no qual o barco recebe correções das coordenadas, através de um sistema de rádio de um GPS instalado em terra em ponto de coordenada estabelecida. A posição do levantamento deve estar georreferenciada ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e o mesmo referencial deve ser empregado para realizar o levantamento da área seca e molhada (Costa, 2019).

Figura 6 – Ecobatímetros de feixe único (esquerda) e múltiplo feixes (direita)



Fonte: KEARNS e BREMAN (2010).

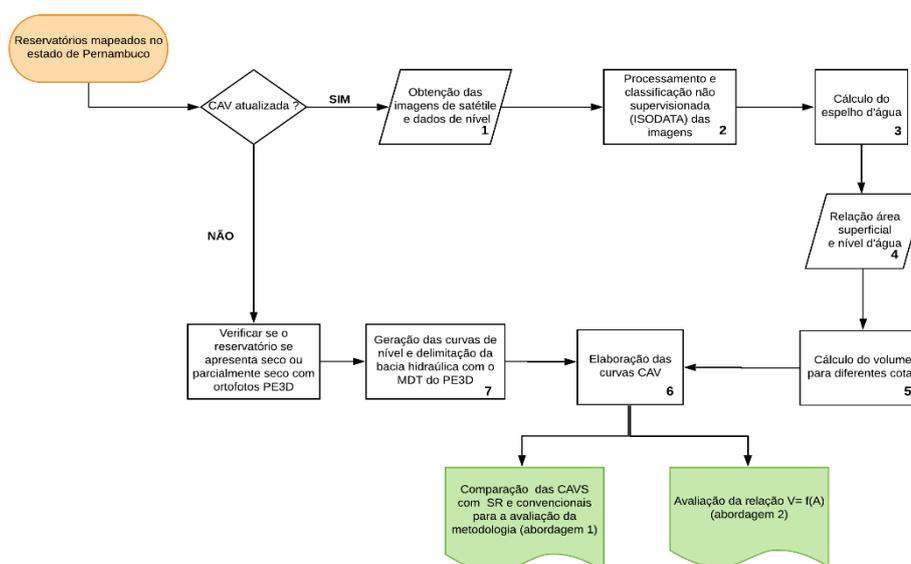
Para a área não coberta por água podem ser realizados levantamento topográficos convencionais ou de perfilamento a laser que possibilita a obtenção de informações altimétricas da cena. Os dados são manipulados em escritório onde se tem como produto uma tabela, que pode ser resumida com a informação de cota da curva de nível, área referente a essa curva e volume abaixo da curva (ANA, 2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho será realizada com duas abordagens distintas, ambas com o objetivo de melhoria na gestão de água nos reservatórios relacionado com as curvas CAV por meio do uso de produtos de sensoriamento remoto. A primeira é o cálculo da curva CAV a partir de imagens de satélite, além da avaliação de uma metodologia alternativa para obtenção da área superficial de água do reservatório. A segunda abordagem é a construção da relação volume em função da área superficial, para que seja possível obter o volume de água em reservatórios que não apresentam dados de nível monitorado ou em que a série apresente muitas falhas que inviabilize seu uso. Para essa abordagem, foram utilizados os reservatórios que apresentam as curvas CAV atualizadas neste trabalho e de outros autores. A Figura 7 apresenta as etapas para aplicação dessa metodologia.

A etapa do quadro 1 do fluxograma (Figura 7) será descrita na seção 3.1.2 e 3.1.3, onde são apresentados os critérios de seleção das imagens de satélite e fontes dos dados de nível. Os quadros 2, 3 e 4 serão descritos na seção 3.1.4, onde serão apresentados dois métodos de obtenção da área superficial dos reservatórios. O cálculo dos volumes para cada nível de água (quadro 5) será descrito na seção 3.1.5 e a geração das curvas de nível para delimitação da bacia hidráulica dos reservatórios utilizando o MDT (quadro 7) será descrito na seção 3.2.3.

Figura 7 – Metodologia das duas abordagens adotadas na pesquisa



Fonte: A autora (2021).

### 3.1 Estimativa da curva CAV para reservatórios a partir de imagens de satélite (abordagem 1)

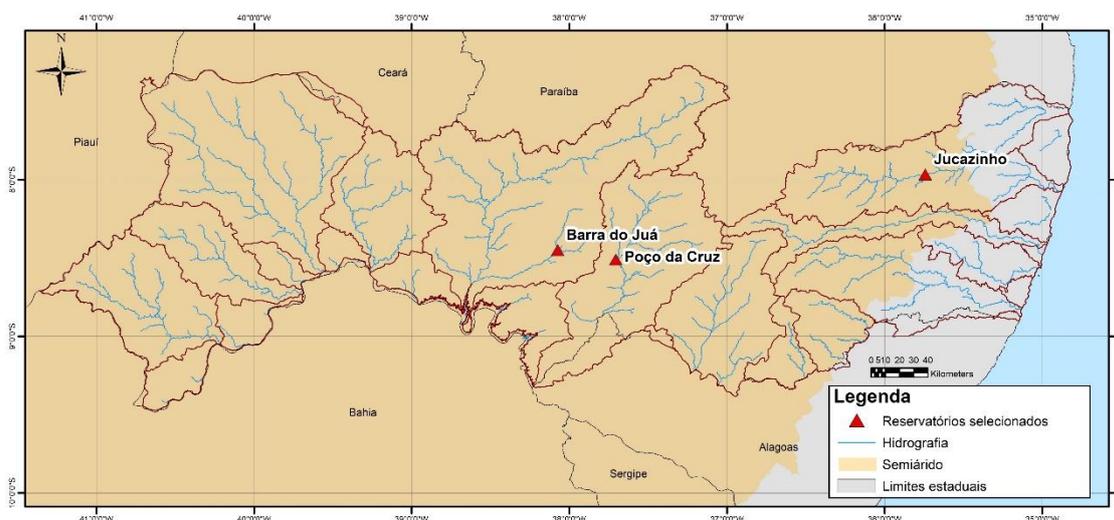
Nas demais seções serão apresentadas a etapas de realização dessa primeira abordagem, na qual será testada uma estimativa para a área superficial de água dos reservatórios que será utilizada para o cálculo da curva CAV.

#### 3.1.1 Área de estudo

O Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) que reúne informações de mais de 500 reservatórios, acompanhados pela Agência Nacional de Águas, apresentam 104 reservatórios pernambucanos, com uma capacidade total estimada em 2.802,39hm<sup>3</sup>.

A estimativa das curvas CAV utilizando as imagens de satélite foi aplicada em três reservatórios com a topobatimetria atualizadas, todos localizados no semiárido do estado de Pernambuco (Figura 8) apresenta as principais características dos reservatórios selecionados.

Figura 8 – Localização dos reservatórios pernambucanos utilizados para estimar a CAV a partir das imagens de satélite



Fonte: A autora (2021).

Tabela 1 – Características dos reservatórios selecionados

<b>Reservatórios</b>	<b>Área superficial máxima (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Capacidade máxima (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Rio</b>
Barra do Juá	13,96	59,52	Riacho do Navio
Jucazinho	13,12	204,82	Capibaribe
Poço da Cruz	56,34	483,72	Moxotó

Fonte: A autora (2021).

### 3.1.2 *Produtos de sensoriamento remoto*

A seguir, apresentam-se os produtos de sensoriamento remoto utilizados na abordagem dessa pesquisa. Trata-se de dados relativos às imagens óticas para estimativa da área do espelho d'água.

#### 3.1.2.1 Imagens de satélite

A determinação da área inundada dos reservatórios selecionados para este trabalho foi realizada a partir das imagens dos satélites LANDSAT 5 e LANDSAT 8 que apresentam uma resolução espacial de 30m. Os dados foram obtidos através do Google Earth Engine (GEE), que é uma plataforma de computação em nuvem que permite acessar os dados geoespaciais e executar análises de um grande conjunto de dados (GORELICK et al., 2017).

A partir dessa plataforma, foi elaborado um programa na linguagem JavaScript que com a inserção das coordenadas do reservatório lista as imagens disponível para cada satélite em todas as datas, dentro do intervalo preestabelecido. A plataforma também permite inserir um filtro com o limite da quantidade de nuvens presentes nas imagens sendo adotado 10% para este trabalho.

Posteriormente, o programa realiza o download das bandas que serão utilizadas já com um recorte contendo somente o reservatório em análise. Para o LANDSAT 5 foram utilizadas as bandas 4, 5 e 2 e para o LANDSAT 8 as bandas 5, 6 e 3 ambas sendo a composição das bandas do infravermelho próximo, infravermelho médio e do verde. A partir das imagens foi verificada a existência de nuvens sobre o espelho d'água do

reservatório, pois para a aplicação da metodologia foram selecionadas somente as imagens sem nuvens na área inundada do reservatório.

### *3.1.3 Dados topobatimétricos e dados de nível*

Os levantamentos topobatimétricos dos reservatórios são necessários para que seja possível validar a metodologia proposta para estimar as curvas cota-área-volume, permitindo a comparação dos valores estimados com os valores de campo. Para os reservatórios Jucazinho e Poço da Cruz foram utilizadas as topobatimetrias atualizadas pela ANA no ano de 2018.

O MDT que representa a topografia da bacia hidráulica desses reservatórios foi construído após integração do levantamento aerofotogramétrico da parte não aquática e levantamento batimétrico da área inundada (PEREIRA, 2018). A partir dessa atualização se obteve uma nova curva CAV que foi utilizada como referência neste trabalho.

O reservatório Barra de Juá não foi contemplado nessa atualização, no entanto, o PE3D foi uma fonte de dados para obtenção do MDT. A partir desse produto, foi possível calcular a curva cota-área-volume dos reservatórios no estado de Pernambuco. Contudo, esse cálculo só é possível em reservatórios que se encontravam vazios na data de passagem do sensor LiDAR, caso do reservatório Barra do Juá permitindo a atualização da sua CAV, conforme apresentado por Nascimento e Ribeiro Neto (2017), sendo essa utilizada como referência para este trabalho.

Os dados de nível de água nos reservatórios foram fornecidos pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e pelo Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) mantido pela ANA. As Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4 apresentam os dados de nível e a data das imagens utilizadas para os três reservatórios selecionados para essa abordagem.

Tabela 2 – Data das imagens e dados de nível d’água, utilizados para o reservatório Poço da Cruz

<b>Data da imagem</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Satélite</b>
05/12/2017	411,24	LANDSAT 8
12/06/2017	411,30	LANDSAT 8
19/11/2017	411,39	LANDSAT 8
04/02/2017	413,45	LANDSAT 8
15/08/2017	413,90	LANDSAT 8
12/08/2016	414,82	LANDSAT 8
01/01/2016	414,93	LANDSAT 8
27/09/2015	415,86	LANDSAT 8
14/01/2015	417,56	LANDSAT 8
08/12/2018	418,33	LANDSAT 8
24/10/2019	418,72	LANDSAT 8
21/08/2019	419,25	LANDSAT 8
02/06/2019	419,72	LANDSAT 8
11/01/2014	420,46	LANDSAT 8
26/12/2013	420,62	LANDSAT 8
10/12/2013	420,72	LANDSAT 8
04/08/2013	422,39	LANDSAT 8
14/04/2013	423,46	LANDSAT 8
12/10/2003	424,25	LANDSAT 5
19/07/2007	430,39	LANDSAT 5
07/12/2006	431,14	LANDSAT 5
18/09/2006	432,02	LANDSAT 5
29/09/2010	432,20	LANDSAT 5
02/11/2005	433,01	LANDSAT 5
07/03/2005	433,16	LANDSAT 5
17/12/2004	433,68	LANDSAT 5
01/12/2004	433,71	LANDSAT 5
10/11/2008	433,80	LANDSAT 5
26/05/2005	433,83	LANDSAT 5
23/09/2008	434,28	LANDSAT 5
20/03/2004	435,05	LANDSAT 5

Fonte: A autora (2021).

Tabela 3 – Data das imagens e dados de nível d’água, utilizados para o reservatório Barra do Júa

<b>Data da imagem</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Satélite</b>
10/11/2017	392,75	LANDSAT 8
16/11/2019	395,50	LANDSAT 8
02/12/2019	395,58	LANDSAT 8
15/10/2019	396,25	LANDSAT 8
13/09/2019	396,88	LANDSAT 8
08/04/2020	397,43	LANDSAT 8
25/09/2006	397,49	LANDSAT 5
31/12/2018	397,74	LANDSAT 8
24/10/2005	397,90	LANDSAT 5

13/11/2018	398,27	LANDSAT 8
28/10/2018	398,48	LANDSAT 8
12/10/2018	398,80	LANDSAT 8
19/12/2008	400,02	LANDSAT 5
22/06/2018	400,26	LANDSAT 8
01/11/2008	400,64	LANDSAT 5
05/04/2007	401,02	LANDSAT 5
19/10/2009	401,23	LANDSAT 5

Fonte: A autora (2021).

Tabela 4 – Data das imagens e dados de nível d'água, utilizados para o reservatório Jucazinho

<b>Data da imagem</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Satélite</b>
23/05/2018	258,00	LANDSAT 8
26/04/2014	272,13	LANDSAT 8
29/08/2007	286,99	LANDSAT 5
17/03/2011	289,87	LANDSAT 5

Fonte: A autora (2021).

### 3.1.4 Estimativa da área superficial dos reservatórios

A estimativa da área superficial dos reservatórios a partir das imagens de satélite pode ser obtida de diversas formas. Uma dessas maneiras é utilizando somente a reflectância da imagem, na qual é gerado um histograma de reflectância e selecionando apenas os pixels com os valores correspondente à superfície da água (COLLISCHONN; CLARKE, 2016).

A utilização de índices espectrais, também, é uma alternativa muito usual para se obter a área da superfície da água (AVISSE et al., 2017; BACALHAU et al., 2017; ZHANG et al., 2017; PEREIRA et al., 2018). Para essa metodologia, é realizado um cálculo a partir dos valores dos pixels e aplicado um limiar permitindo a separação das superfícies que representam água e demais coberturas (solo exposto, vegetação, construções).

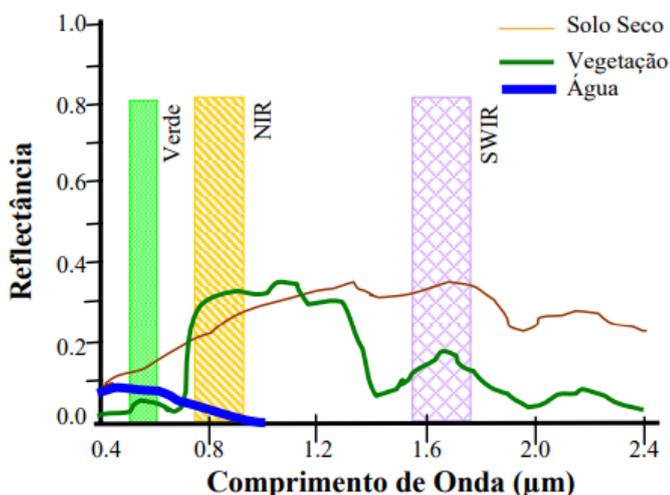
A classificação das imagens de satélite também é uma outra possibilidade. Nesse processo, os pixels das imagens são associados entre si com base nos seus valores digitais formando um número finito de classes individuais que representam objetos do mundo real. Essa estratégia é, também, uma forma de calcular a área superficial de água dos reservatórios (GAO et al., 2012; ELMÍ, 2019).

Para este trabalho, as formas escolhidas para a estimativa das áreas superficiais de água dos reservatórios foram a partir da utilização dos índices espectrais e da classificação não supervisionada de imagens.

#### 3.1.4.1 Índices espectrais

Os índices espectrais são resultados de operações matemáticas entre os valores numéricos dos pixels das bandas de uma imagem de satélite. Os índices utilizam as informações de reflectância de bandas específicas do espectro eletromagnético, dependendo do objeto terrestre que se pretende explorar. Para a água, as bandas espectrais que apresentam melhor visibilidade estão entre os comprimentos de onda de 0,4 a 0,9  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. A Figura 11 apresenta o comportamento espectral de alguns alvos e as bandas espectrais, verde, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (SWIR), relacionando os comprimentos de onda e a reflectância dos pixels da imagem.

Figura 9 - Comportamento espectral do solo seco, da vegetação e da água



Fonte: Polidorio et al. (2005).

O Índice da Diferença Normalizada de Água (Normalized Difference Water Index – NDWI), proposto por McFeeters (1996), possibilita detectar águas superficiais em ambientes de zonas úmidas e permitir a medição da extensão da água superficial. Pode ser calculado conforme a Equação (3).

$$NDWI = \frac{\rho_{VD} - \rho_{IVp}}{\rho_{VD} + \rho_{IVp}} \quad (3)$$

Onde:

$\rho_{VD}$  - reflectância da banda do verde;

$\rho_{IVm}$  - reflectância da banda do infravermelho próximo.

Outro índice espectral que permite detectar a área superficial de água é o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (Modified Normalized Difference Water Index – MNDWI). Proposto por Xu (2006), esse é uma modificação do NDWI e permite um maior destaque do delineamento dos corpos hídricos dos demais alvos da superfície terrestre, visto que maximiza ainda mais a diferença entre as bandas espectrais. A Equação (4) apresenta o cálculo realizado entre as bandas:

$$MNDWI = \frac{\rho_{VD} - \rho_{IVm}}{\rho_{VD} + \rho_{IVm}} \quad (4)$$

Onde:

$\rho_{VD}$  - reflectância da banda do verde;

$\rho_{IVm}$  - reflectância da banda do infravermelho médio.

O cálculo dos índices gera uma nova imagem na qual os valores dos pixels variam entre -1 e 1. Foi adotado neste trabalho o limiar de valor 0 para separar os alvos que são água e os que não são água. Ou seja, todos os pixels com valor igual ou menor que zero são considerados não água, e todos os pixels que possuem valor maior que 0 são água.

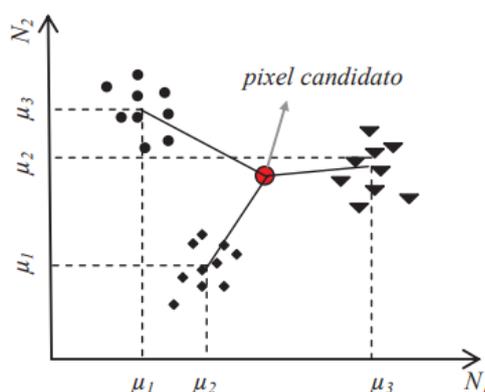
#### 3.1.4.2 ISODATA

A *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique* (ISODATA) é um algoritmo de classificação não supervisionada de imagens de satélite que utiliza o conceito de distância mínima para classificar as imagens. Sendo assim calcula a distância entre as assinaturas espectrais do pixel e da média da classe, associando o pixel à classe que apresentar a assinatura espectral mais próxima com ele, ou seja, a menor diferença espectral (MEMARSADEGHI *et al.*, 2007). A aplicação dessa classificação nas imagens

selecionadas foi realizada através do software *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA).

Inicialmente, a ISODATA define um vetor de classes arbitrário com N centros de médias espectrais e aloca cada pixel na classe mais próxima da média espectral. Depois de todos os pixels alocados é gerada uma nova média espectral das classes definidas, e os pixels são realocados novamente nas classes com maior proximidade da média espectral. Esse processo é repetido iterativamente, sendo ajustados a partir dos parâmetros inicialmente inseridos. A Figura 10 ilustra o processo de designação de um pixel à classe com média espectral mais próxima, ou seja, menor distância.

Figura 10 – Representação do processo de classificação de um pixel pelo conceito de distância mínima. As linhas cheias indicam as medidas da distância mínima para um pixel candidato às classes.



Fonte: Meneses e Almeida (2012).

Os parâmetros iniciais que são considerados nessa classificação não supervisionada utilizando o software SAGA são: (1) número máximo de iterações, (2) número inicial de classes (N), (3) número máximo de classes e (4) número mínimo de pixels em uma classe. O processo define o centro das classes iniciais aleatoriamente utilizando o valor adotado para o parâmetro 2. Posteriormente, a imagem é classificada uma primeira vez e, depois são removidas as classes que apresentaram menos pixels que o valor adotado para o parâmetro 4, ajustando o número de classes limitadas pelo valor máximo adotado no parâmetro 3.

As classes que apresentam proximidade espectral entre suas médias podem ser mescladas em uma única classe. Além disso, quando uma classe apresenta uma menor quantidade de pixels que o estabelecido pelo parâmetro 4, essa também pode ser fundida em outra classe. O procedimento de calcular as médias espectrais das classes e alocar os

pixels de acordo com a proximidade a essa média é repetido várias vezes até atingir o número máximo de iterações adotado no parâmetro 1.

Os valores adotados para os parâmetros em sua maior parte seguiram o padrão indicado pelo SAGA, visto que a modificação desses não provocou alterações significativas no resultado da classificação das imagens. Sendo assim, para o número máximo de iterações foi adotado 20, o número máximo de classes foi 16 e o número mínimo de pixels em uma classe foi de 5 pixels. O número inicial de classes foi o parâmetro que, quando alterado, gerou significativas modificações nos resultados, influenciando diretamente no número final de classes. Portanto, o seu valor foi sendo alterado para cada classificação, sempre objetivando o maior número de classes.

A imagem classificada com o maior número de classes visa separar os pixels de forma mais homogênea, já que a classificação não supervisionada ISODATA classifica todos os pixels da imagem e, portanto, quando um pixel não apresenta média espectral próxima a uma classe, esse é agrupado em outra classe qualquer, mesmo que essa apresente diferenças espectrais significativas com esse pixel.

Após a classificação da imagem pela ISODATA, o arquivo tipo raster gerado é convertido em um arquivo *shapefile* utilizando uma função do software SAGA. Posteriormente, o *shapefile* foi editado no ArcGis Desktop 10.1, no qual foi utilizada a mesma imagem Landsat da classificação para identificar qual classe representava água e, depois foram removidas as classes que não representavam a água. As classes restantes, e que representavam água foram unificadas em uma única classe para que fosse possível obter um polígono que representasse o espelho d'água do reservatório e, por fim, calcular a área de água.

### 3.1.5 Estimativa do volume nos reservatórios

O volume de água foi calculado considerando como um tronco de uma pirâmide a diferença entre os dois níveis d'água das áreas superficiais. O cálculo foi realizado a partir do nível mais baixo de água no reservatório. Nesse sentido, é importante haver uma boa amostragem das imagens com amplitude de nível d'água diferentes para garantir que todo o reservatório seja representado pelas imagens de satélite. A Equação (5) apresenta o cálculo do volume incremental entre duas imagens consecutivas.

$$\Delta V_{n+1} = (H_{n+1} - H_n) \cdot \frac{(A_{n+1} + A_n + \sqrt{A_{n+1} \cdot A_n})}{3} \quad (5)$$

Onde:

$\Delta V_{n+1}$  – o volume incremental entre as áreas superficiais  $A_{n+1}$  e  $A_n$ ;

$H_{n+1}$  e  $H_n$  – são os níveis de água que correspondem às áreas superficiais  $A_{n+1}$  e  $A_n$ ;

O volume total é calculado somando os sucessivos valores de  $\Delta V$ , baseado na Equação (6).

$$V_{n+1} = V_n + \Delta V_{n+1} \quad (6)$$

Onde:

$V_{n+1}$  – o volume acumulado entre as superfícies de água e o fundo do reservatório.

Para os volumes referentes à cota mínima dos reservatórios foi adotado o valor de volume fornecido pela curva de campo. O artifício foi utilizado em virtude da incerteza em extrapolar a curva gerada para o volume coberto por água na imagem de menor elevação (Costa, 2019).

Como forma de validar os resultados obtidos com a estimativa do volume através das imagens de satélite foi aplicado um teste de hipóteses t de *Student* (NAGUETTINI; PINTO, 2007), aplicado pela equação (7). O nível de significância adotado foi de 5% ( $\alpha=0,05$ ).

$$T = \frac{(\bar{X} - \mu_0) \cdot \sqrt{N}}{\sigma} \quad (7)$$

Onde:

$\bar{X}$  – é a média dos dados de volume estimado pela metodologia;

$\mu_0$  – é a média dos dados de volume da curva atualizada;

$N$  – é o número de dados, tamanho da amostra;

$\sigma$  – é o desvio padrão das diferenças observadas entre os dados pareados.

A aplicação do teste foi realizada considerando uma amostra de dados pareados, visto que os valores de volume (variável) foram medidos por duas tecnologias diferentes, no mesmo nível de água e no mesmo reservatório.

Além disso, a fórmula adotada para o cálculo do volume neste trabalho considera que existe uma distância muito pequena entre os valores de nível de água, para que o erro associado na consideração do volume entre os níveis do reservatório como um tronco de pirâmide seja insignificante. No entanto, devido à disponibilidade de imagens e dados de nível dos reservatórios, essa condição não é sempre atendida, sendo assim para validar os resultados obtidos e analisar a metodologia de obtenção da área superficial o teste *t* foi aplicado utilizando os dados dos volumes parciais do reservatório.

### **3.2 Relação área em função do volume e geração das curvas CAV (abordagem 2)**

Nas seções abaixo serão descritas as etapas de elaboração dessa segunda abordagem do trabalho. Nessa abordagem foram atualizadas as curvas CAV de reservatórios do estado de Pernambuco utilizando dados de sensoriamento remoto e, também, foi avaliado o potencial das relações volume em função da área de 68 reservatórios, avaliando uma associação com o relevo do estado.

#### *3.2.1 Área de estudo*

Segundo a base de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) estão localizados no estado 140 reservatórios, dos quais a partir de informações compiladas de levantamentos batimétricos realizados por órgãos governamentais responsáveis pelo monitoramento e gestão dos recursos hídricos no Estado de Pernambuco e de outros trabalhos realizadas com o objetivo de atualizar as curvas CAV, 68 apresentam a relação cota-área-volume atualizadas nos últimos 3 anos.

A relação volume em função da área superficial foi aplicada em 68 reservatórios do estado de Pernambuco, sendo que para 8 desses reservatórios foi atualizada a curva CAV no desenvolvimento deste trabalho utilizando o Modelo Digital do Terreno (MDT), com a metodologia descrita na seção 3.2.3. A Tabela 5 apresenta as principais características desses reservatórios.

Tabela 5 – Características dos reservatórios selecionados para atualização da CAV

<b>Reservatórios</b>	<b>Precipitação média (mm)</b>	<b>Rio</b>
Arrodeio	600	Riacho Ipueiras
Cruz Salina	500	Riacho Cacimbas
Dormentes	500	-
Monte Alegre	600	-
Parnamirim	600	-
Riacho Pequeno	550	-
Tamboril (Eng. Camacho)	600	Riacho dos Bodes e Pradeco
Terra Nova	600	Terra Nova

Fonte: A autora (2021).

A Tabela 6 apresenta as capacidades máximas e o rio onde estão localizados os reservatórios com a curva CAV atualizada que foram utilizados para a construção das relações volume em função da área superficial. A Figura 11 apresenta a localização desses reservatórios (triângulos vermelhos) e dos reservatórios que tiveram suas CAVs atualizadas neste trabalho (triângulos verdes) e que também foram utilizados na construção das relações do tipo  $V = f(A)$ .

Tabela 6 – Capacidades máximas dos reservatórios com CAV atualizada

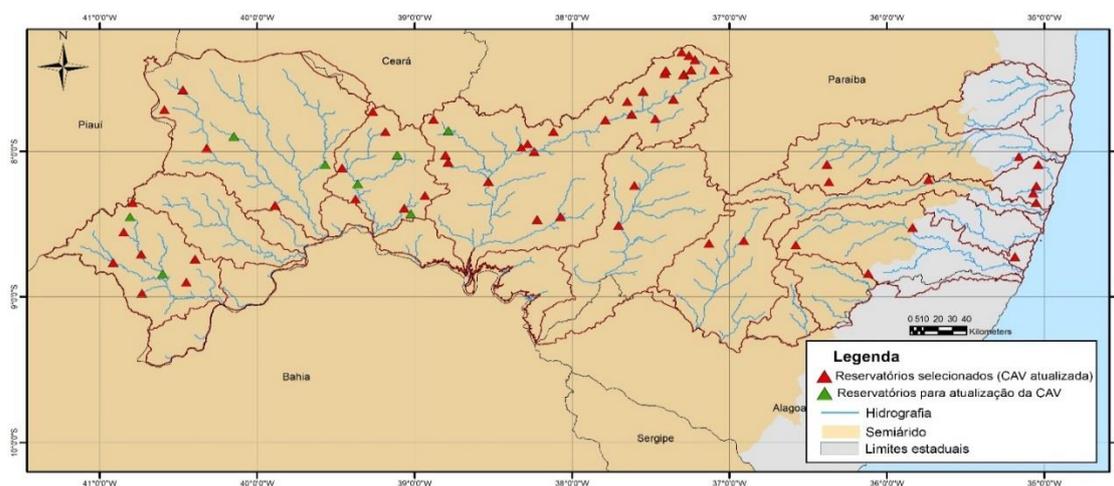
<b>Reservatórios</b>	<b>Capacidade máxima (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Rio</b>	<b>Fonte</b>
Araripina	4,05	Sohen	Cavalcante (2020)
Açude Piedade	0,37	-	Nascimento (2017)
Algodões	0,11	São Pedro	Nascimento (2017)
B. de Melancia	1,55	C. do Roberto	Cavalcante (2020)
B. do Chapéu	1,61	Da Brígida	Cavalcante (2020)
Barra do Juá	59,52	Da Maravilha	Nascimento (2017)
Barrinha	2,02	Barrinha	Cavalcante (2020)
Boa Vista	1,68	Belém	Nascimento (2017)
Bom Sucesso	1,50	Paus Brancos	Nascimento (2017)
Brejinho	0,29	Brejinho	Nascimento (2017)
<b>Reservatórios</b>	<b>Capacidade máxima (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Rio</b>	<b>Fonte</b>
Brotas	9,23	Rio Pajeú	Nascimento (2017)
Cachoeira II	9,55	Córrego Luanda	Nascimento (2017)
Cachoeirinha	0,81	-	Nascimento (2017)
Cacimba Velha	1,30	Riacho Real	CPRM (2012)
Caiçara	10,50	Riacho Pau Ferrado	CPRM (2012)
Cascudo	1,25	Do Tigre	Nascimento (2017)
Chinelo	2,93	Da Chinela	Nascimento (2017)
Cocos	1,89	Riacho da Roça	CPRM (2012)
Conceição Crioulas	1,17	-	CPRM (2012)

Duas Unas	23,55	Duas Unas	CPRM (2012)
Eixo da Serra	1,64	-	CPRM (2012)
Extrema	1,27	-	CPRM (2012)
Gurjão	4,18	Rio Uma	Cavalcante (2020)
Gurjau	3,20	Rio Gurjau	CPRM (2012)
Ingazeira	4,45	Carrapateira	Cavalcante (2020)
Jazigo	6,04	Rio Pajeú	Nascimento (2017)
José Antônio	0,81	Das Batatas	Nascimento (2017)
Juá	4,27	Dos Picos	Cavalcante (2020)
Jureminha	2,08	-	CPRM (2012)
Laje do Gato	0,99	Manicoba	Nascimento (2017)
Livino	2,35	Do Padre	Nascimento (2017)
Mãe D'água	1,34	Rio Aguiar	Nascimento (2017)
Manopla	2,69	São Pedro	Nascimento (2017)
Manuíno	2,46	Manuíno	Cavalcante (2020)
Monte Orobe	2,33	-	CPRM (2012)
Morros (Lagoa Grande)	1,86	Poço D'anta	CPRM (2012)
Mulungu	1,22	Mulungu	Cavalcante (2020)
Oitis	3,02	Brejo da Madre de Deus	CPRM (2012)
Pau Ferro (Petrolina)	1,38	-	CPRM (2012)
Pau Ferro (Quipapa)	12,80	-	CPRM (2012)
Pirapama	60,48	Pirapama	CPRM (2012)
Poço da Cruz	483,72	Moxotó	CPRM (2012)
Poço da Onça	1,09	Riacho do Dormente	CPRM (2012)
Poço Grande	1,18	Das Trairas	Nascimento (2017)
Prata	40,00	Capema	CPRM (2012)
Quebra Unha	3,05	Quebra Unha	Nascimento (2017)
Rancharia	0,94	Bom Jardim	Cavalcante (2020)
Retiro	0,30	Das Lajes	Nascimento (2017)
Rosário	36,45	Da Volta	Nascimento (2017)
Saco I	18,06	Saco	Nascimento (2017)
<b>Reservatórios</b>	<b>Capacidade máxima (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Rio</b>	<b>Fonte</b>
Saltinho	0,18	-	CPRM (2012)
São José I	1,67	Dos Patos	Nascimento (2017)
São José II	6,16	São Gonçalo	Nascimento (2017)
Serrinha	0,98	-	CPRM (2012)
Serrinha II	239,49	Rio Pajeú	Nascimento (2017)
Serrinha Serraria	0,86	Rio Pajeú	Nascimento (2017)
Serrote	1,35	Rio Groairas	Nascimento (2017)
Tabira	0,20	-	Nascimento (2017)
Tapacura	94,20	Tapacurá	CPRM (2012)

Utinga	10,27	Utinga de Baixo	CPRM (2012)
--------	-------	-----------------	-------------

Fonte: A autora (2021).

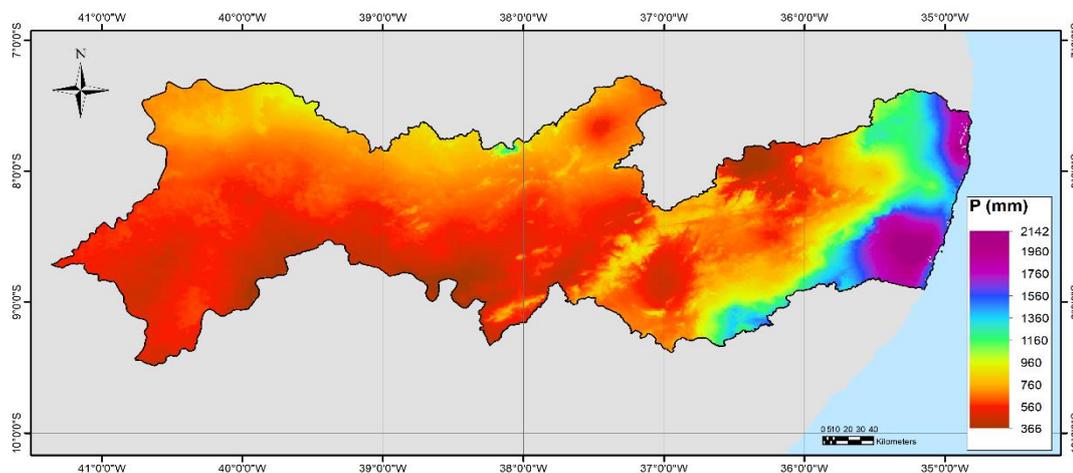
Figura 11 – Localização dos reservatórios pernambucanos utilizados para a construção da relação do tipo  $V=f(A)$



Fonte: A autora (2021).

Os índices pluviométricos do estado apresentam grande diferenciação entre a porção semiárida, a qual não dispõe de um regime regular de precipitações com valores entre 360mm e 960mm de chuva. Já a porção do litoral apresenta valores de precipitação maiores que 1250mm, mostrando que não existe uma uniformidade da distribuição espacial da água sobre o território. A Figura 12 apresenta o comportamento da precipitação média anual distribuída sobre o estado de Pernambuco.

Figura 12 – Precipitação média anual no estado de Pernambuco



Fonte: WorldClim (2020).

### 3.2.2 *Produtos de sensoriamento remoto*

A seguir, apresentam-se os produtos de sensoriamento remoto utilizados na abordagem dessa pesquisa. Trata-se de dados relativos à caracterização da geometria dos reservatórios.

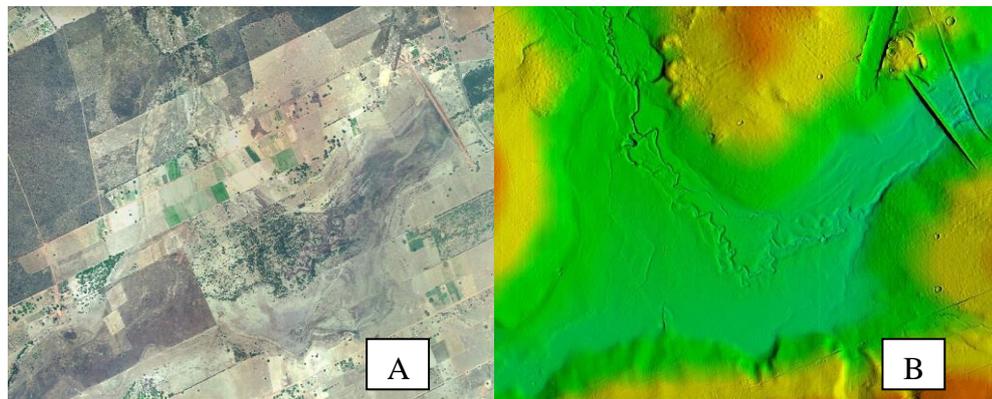
#### 3.2.2.1 Pernambuco Tridimensional (PE3D)

O Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) é um projeto do Governo do Estado de Pernambuco que inclui o recobrimento aerofotogramétrico digital e perfilamento a laser utilizando a tecnologia *Ligth Detection and Ranging* (LiDAR) de todo o território estadual. O LiDAR mede o tempo de viagem da energia de um pulso de laser entre uma aeronave, a superfície do terreno e de volta à aeronave. Quando o pulso atinge a superfície, obstáculos como vegetação, água e construções refletem os feixes e um sensor na aeronave os captura. Para cada feixe de luz emitido, o tempo de viagem e o ângulo do espelho de varredura correspondente ao momento da emissão do pulso são registrados. A associação desses dados com a altitude e a posição relativa da aeronave permite determinar as coordenadas tridimensionais dos alvos da superfície (BLAIR; RABINE; HOFTON, 1999).

O conjunto de dados é apresentado em dois níveis de precisão, o primeiro abrange todo o território de Pernambuco com recobrimento aerofotogramétrico e geração de ortofotos na escala 1:5.000. Esse nível possui precisão altimétrica melhor que 25 centímetros e resolução espacial de 1 metro. Além das ortofotos, foram produzidos, também, Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Elevação (MDE). O outro nível de precisão é na escala 1:1000, resolução de 0,5 m e precisão vertical de 10 cm (PERNAMBUCO, 2020). A Figura 13 apresenta um exemplo dos tipos de dados obtidos pelo PE3D.

Os MDTs desse projeto foram utilizados nesta dissertação para obtenção das curvas cota-área para os reservatórios que estavam secos no momento da passagem do sensor LiDAR, que será descrita na seção 3.4.

Figura 13 - Exemplo do produto do mapeamento do PE3D: Ortoimagem do reservatório Barra do Chapéu (A);  
Modelo Digital do Terreno(B);



Fonte: A autora (2021).

### 3.2.3 Geração da curva cota-área-volume a partir do MDT

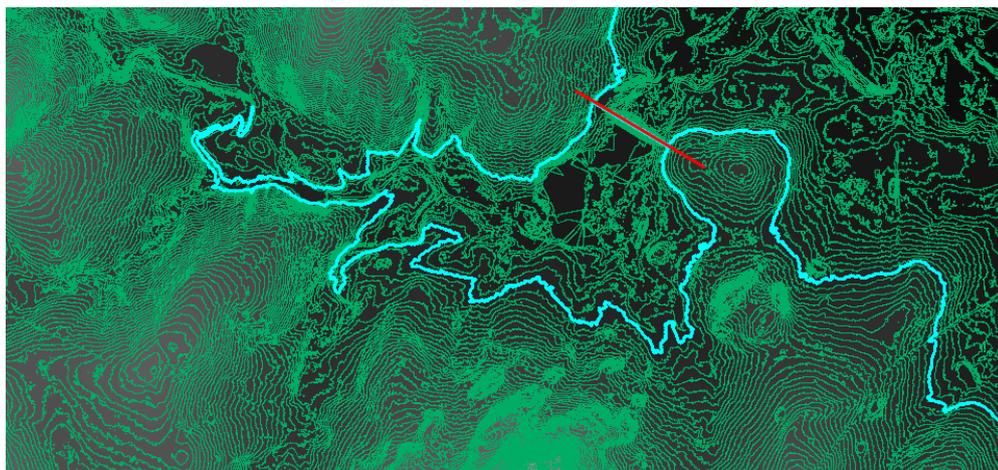
A atualização da curva CAV para os reservatórios que apresentavam essa informação desatualizada foi realizada utilizando o MDT obtido através do PE3D. A principal restrição para aplicação dessa metodologia foi a condição do reservatório no momento da passagem do sensor LiDAR, visto que o reservatório precisava estar seco ou com uma quantidade muito reduzida de água no fundo.

A partir do MDT foi delimitada a bacia hidráulica do reservatório que consiste na limitação da área da superfície que permanece inundada para determinada cota máxima atingida pela lâmina d'água. Essa delimitação foi realizada utilizando as curvas de nível espaçadas em 1 metro geradas com o software QGis 3.6, para a área onde se localiza o reservatório com as coordenadas de localização obtidas na ficha técnica do reservatório junto à APAC.

Posteriormente, foi localizada visualmente com o auxílio das ortofotos a posição do talude da barragem, traçando uma linha no centro para referência e verificar a cota na crista, ou seja, a cota máxima para o reservatório selecionado. A

Figura 14 apresenta as curvas de nível geradas para o reservatório Rancharia e o destaque para a curva de nível que apresenta a cota máxima.

Figura 14 –Curvas de nível geradas a partir do MDT para o reservatório Rancharia

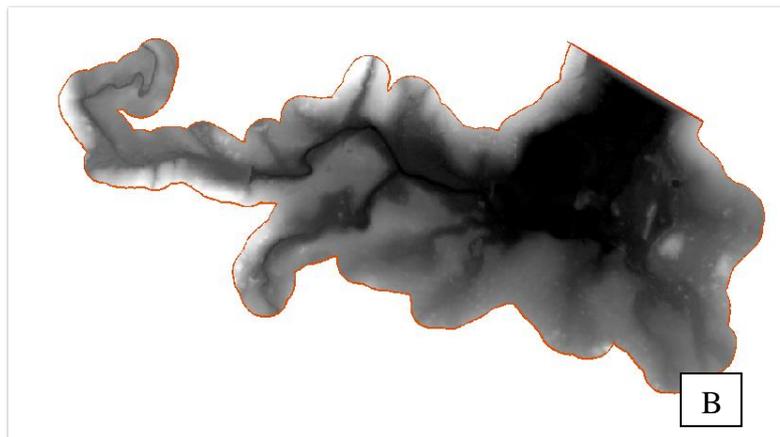


Fonte: A autora (2021).

A curva de nível para a cota máxima foi extraída como um polígono, sendo adotado como a bacia hidráulica máxima para o reservatório, ou seja, a área inundada para a cota máxima. Com a definição da bacia hidráulica, foi gerado um buffer margeando o limite dessa área com uma distância de 50 metros (Figura 15A), sendo esse utilizado para extrair um recorte do MDT permanecendo somente a extensão circundante da área inundada do reservatório (Figura 15B).

Figura 15 – Bacia hidráulica adotada para o reservatório Rancharia e buffer de 50 m (linha laranja) (A); Recorte MDT utilizando o buffer (B)





Fonte: A autora (2021).

Com o recorte do MDT, foi verificada a cota mínima adotada como a cota de fundo do reservatório e a cota da crista como a cota máxima. A partir dos planos horizontais obtidos por essas duas cotas, foi calculado o volume do reservatório. Para isso, foi utilizada a ferramenta *Área e Volume* do ArcGIS Desktop 10.1.

Essa função permite calcular a área e o volume para uma superfície acima ou abaixo de um plano de referência em uma altura especificada. Sendo assim, foi utilizado o polígono traçado para a área da bacia hidráulica como plano de referência superior. Partindo da cota de fundo, foi calculada a área e o volume para as cotas variando de 0,5 em 0,5 metros até o plano de referência superior. Após esse processamento, foi obtida uma série de dados cota-área-volume para cada reservatório.

#### 3.2.4 *Relação volume em função da área superficial dos reservatórios*

A utilização da relação volume em função da área é uma função de grande importância principalmente para reservatórios que não possuem monitoramento do nível da água ou os quais a série de dados apresenta uma quantidade de falhas que inviabiliza o cálculo do volume. Sendo assim foi testado o potencial de uso de relações do tipo  $V = f(A)$ , a partir da equação (8).

$$V = K1 \cdot A^{\alpha 1} \quad (8)$$

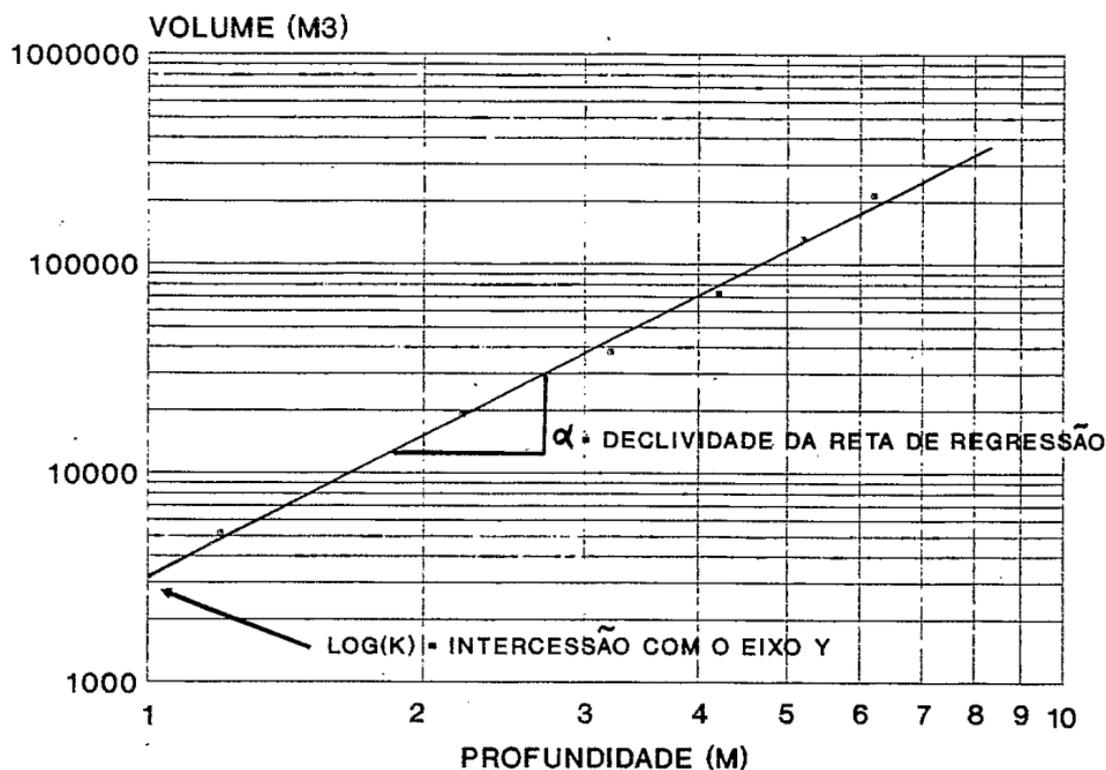
Onde,  $K1$  e  $\alpha 1$  são coeficientes de ajuste que são determinados em função das características geométricas das bacias hidráulicas dos reservatórios.

A obtenção desses coeficientes foi realizada considerando a metodologia descrita por Molle (1994), na qual a partir dos dados de área superficial e volume dos reservatórios, considerando o mesmo nível de água, é aplicada a regressão linear sobre essas variáveis linearizando a equação (8).

$$\log V = \log K1 + \alpha1 \cdot \log A \quad (9)$$

A declividade da reta obtida corresponde a  $\alpha1$ , enquanto  $\log(K1)$  corresponde à interseção da reta com o eixo vertical. A partir desses coeficientes, é elaborada uma equação para cada reservatório. A Figura 16 apresenta um exemplo da aplicação dessa metodologia para os dados de volume e profundidade de um reservatório.

Figura 16 – Exemplo de determinação de  $\alpha1$  e  $K1$  por regressão linear sobre os pares de profundidade e volume



Fonte: Molle (1994).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia descrita anteriormente, assim como as principais discussões a cerca desses resultados.

### 4.1 Relação volume em função da área superficial

As curvas cota-área-volume foram obtidas para 8 reservatórios localizados no estado de Pernambuco e que estavam secos com a passagem do sensor. A Tabela 7 apresenta as capacidades e áreas superficiais para a cota máxima de cada reservatório.

Tabela 7 – Capacidades e área superficial máximas dos reservatórios obtidas com a curva-cota-área-volume a partir do MDT

Reservatórios	Profundidade máxima (m)	Área superficial máxima (m <sup>2</sup> )	Capacidade máxima (hm <sup>3</sup> )
Arrodeio	4	3.438.084,00	6,77
Cruz Salina	8	1.608.385,00	5,42
Dormentes	2	290.612,92	0,52
Monte Alegre	6	467.339,08	1,03
Parnamirim	7	862.205,01	1,74
Riacho Pequeno	10	956.272,00	3,03
Tamboril (Eng. Camacho)	8	5.139.142,00	17,35
Terra Nova	7	578.908,00	1,39

Fonte: A autora (2021).

As relações do volume em função da área superficial, conforme estabelecido na seção 3.2.4, foram calculadas a partir dos reservatórios com a curva cota-área-volume atualizada. Os coeficientes determinados para a relação do tipo  $V = f(A)$ , estão descritos na Tabela 11 para os 68 reservatórios que possuem CAV atualizada em Pernambuco.

Tabela 8 – Coeficientes das relações do tipo  $V = f(A)$  para os reservatórios com a CAV atualizada

Reservatório	$\alpha 1$	K1
Araripina	1,683	0,0006
Açude Piedade	1,302	0,0237
Algodões	1,176	0,0930
Arrodeio	1,951	0,0000
Barra de Melancia	1,277	0,2460
Barra do Chapéu	1,583	0,0011
Barra do Juá	1,477	0,0018

Barrinha	1,082	0,6884
Boa Vista	1,339	0,0413
Bom Sucesso	1,797	0,0001
Brejinho	1,432	0,0330
Brotas	1,633	0,0001
Cachoeira II	3,539	0,0000
Cachoeirinha	1,834	0,0001
Cacimba Velha	1,424	0,0061
Caiçara	1,349	0,0133
Cascudo	1,988	0,0000
Chinelo	1,790	0,0001
Cocos	1,617	0,0010
Conceição Crioulas	1,716	0,0002
Cruz Salina	1,272	0,0365
Dormentes	3,817	0,0000
Duas Unas	1,330	0,0262
Eixo da Serra	1,413	0,0108
Extrema	1,463	0,0039
Gurjão	1,686	0,0003
Gurjau	1,382	0,0148
Ingazeira	1,678	0,0006
Jazigo	1,122	0,1829
José Antônio	3,112	0,0000
Juá	1,309	0,0355
Jureminha	1,856	0,0000
Laje do Gato	1,714	0,0005
Livino	1,516	0,0025
Mãe D'água	1,449	0,0140
Manopla	1,389	0,0093
Manuíno	1,870	0,0001
Monte Alegre	1,394	0,0201
Monte Orobe	1,781	0,0002
Morros (Lagoa Grande)	1,314	0,0551
Mulungu	1,856	0,0002
Oitis	1,649	0,0015
Parnamirim	1,277	0,0678
Pau Ferro (Petrolina)	1,489	0,0030
Pau Ferro (Quipapa)	1,680	0,0010
Pirapama	1,429	0,0081
Poço da Cruz	1,339	0,0193
Poço da Onça	1,224	0,0770
Poço Grande	1,931	0,0000
Prata	1,426	0,0089
Quebra Unha	1,245	0,0682
Rancharia	3,170	0,0000

Retiro	1,948	0,0000
Riacho Pequeno	1,407	0,0142
Rosário	1,485	0,0015
Saco I	1,345	0,0092
Saltinho	1,389	0,0115
São José I	1,308	0,0410
São José II	1,432	0,0052
Serrinha	1,686	0,0005
Serrinha II	2,729	0,0000
Serrinha Serraria	3,191	0,0000
Serrote	1,806	0,0000
Tabira	1,186	0,0540
Tamboril (Eng. Camacho)	1,844	0,0000
Tapacura	1,332	0,0296
Terra Nova	1,626	0,0009
Utinga	1,327	0,0388

Fonte: A autora (2021).

O Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco também apresenta uma relação volume em função da área superficial, onde esses coeficientes são indicados por regiões em função do tipo de relevo do estado, indicados na Tabela 9. A classificação conforme o tipo de relevo foi realizada no âmbito do Plano Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste (PLIRINE), em que a região Nordeste foi dividida em zonas de relevo, denominadas R1 a R7, variando de suave a forte. Para o território de Pernambuco, há ocorrência de três classes (R2, R4, R5).

Tabela 9 – Coeficientes  $\alpha 1$  e K1 da relação  $V = f(A)$  em função do relevo

<b>Relevo</b>	<b><math>\alpha 1</math></b>	<b>K1</b>
R2	15,28	1,207
R4	21,87	1,066
R5	23,10	1,113

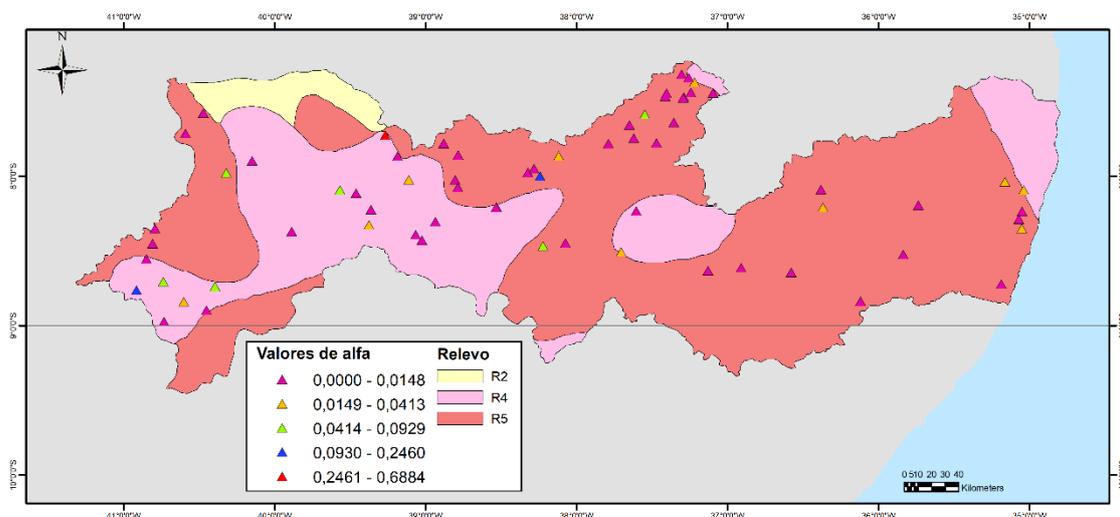
Fonte: Adaptado de PERH (1998).

Os valores médios do coeficiente  $\alpha 1$  obtidos para os reservatórios com a CAV atualizada (0,0292) representam apenas 0,15% dos valores médios de  $\alpha 1$  fornecidos pelo PERH (19,6375). Os valores médios para o coeficiente K1 para as CAV atualizadas (1,6725) representaram 145% dos valores fornecidos pelo PERH (1,1488).

Além disso, a distribuição espacial dos coeficientes não apresentou a classificação segundo o relevo, o que provavelmente indica que os parâmetros apresentados no PERH utilizaram outras unidades para o dado de volume e área. Visto que a ordem de grandeza

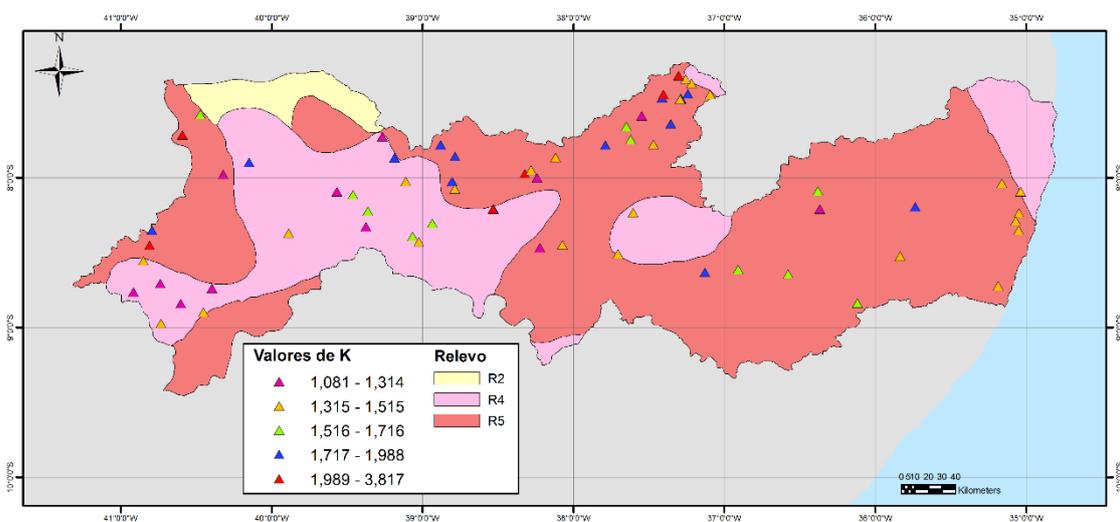
dos valores apresentados está diferente dos valores encontrados, Rodrigues e Liebe (2013) aplicaram essa relação em 42 reservatórios do Brasil e 61 reservatórios de Gana e encontraram valores na mesma ordem de grandezas para esses coeficientes. As Figura 17 e Figura 18 apresentam os valores dos coeficientes distribuídos no território pernambucano e as zonas de relevo indicadas no PERH.

Figura 17 – Zonas do relevo do PERH e os valores dos coeficientes  $\alpha 1$  para os reservatórios selecionados com CAV atualizada



Fonte: A autora (2021).

Figura 18 - Zonas do relevo do PERH e os valores dos coeficientes K1 para os reservatórios selecionados com CAV atualizada



Fonte: A autora (2021).

## 4.2 Estimativas das áreas superficiais

As áreas superficiais foram obtidas a partir da aplicação da metodologia para cada imagem de satélite. Inicialmente foram testadas as duas técnicas, índices espectrais e classificação não supervisionada ISODATA, com duas imagens com sensor e níveis de água diferentes para o reservatório Jucazinho com o objetivo de comparar os resultados de área obtidos com a CAV de referência. A Tabela 10 apresenta os dados das imagens utilizadas e a Tabela 11 apresenta os resultados de área superficial obtidos para cada técnica em m<sup>2</sup> e a porcentagem de correspondência desse valor em comparação com a CAV de referência, valor entre parênteses.

Tabela 10 – Dados das imagens de satélite do reservatório Jucazinho para comparação das áreas estimadas

Imagem	1	2
Data	26/04/2014	17/03/2011
Satélite	LANDSAT 8	LANDSAT 5
Dados de nível (m)	272,13	289,87

Fonte: A autora (2021).

Tabela 11 – Área superficial calculada para as imagens do reservatório Jucazinho em m<sup>2</sup>

Imagem	1	2
CAV	3.894.199,4	11.546.200,0
NDWI	3.484.230,8 (89%)	9.491.410,0 (82%)
MNDWI	3.485.151,3 (89%)	10.311.400,0 (89%)
ISODATA	3.933.900,0 (101%)	11.161.800,0 (97%)

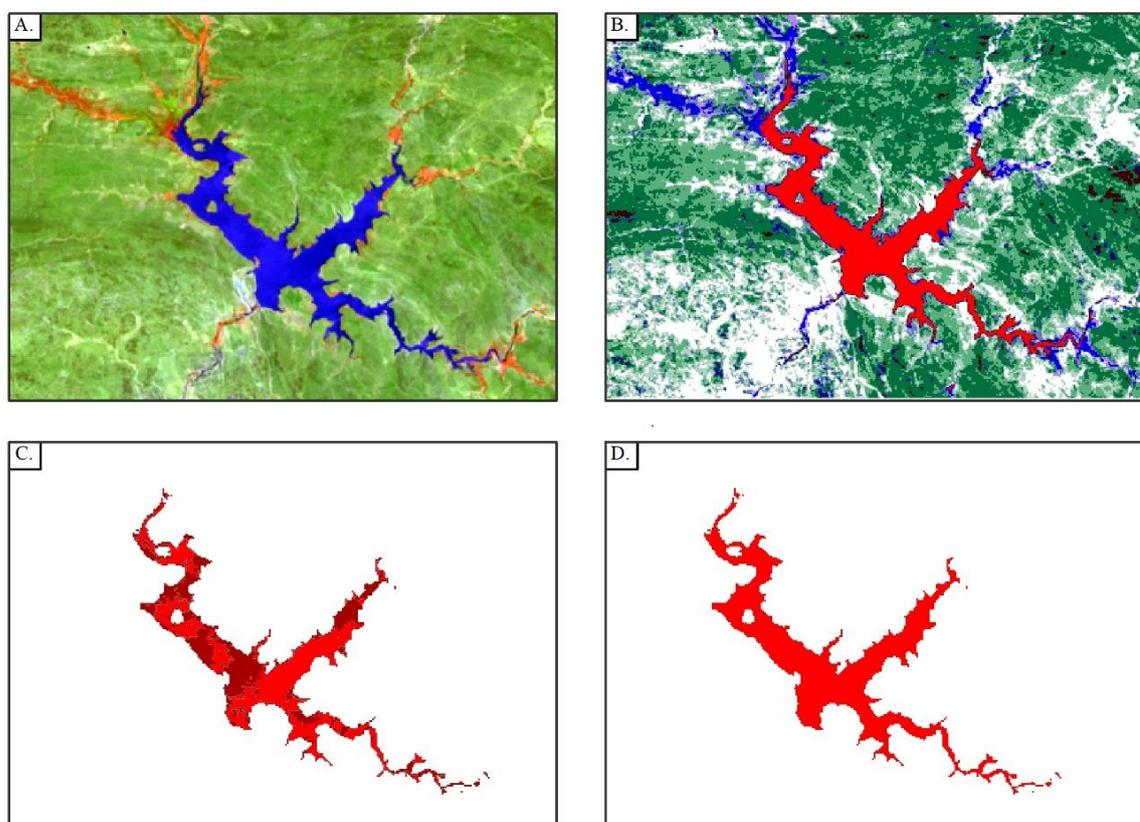
Fonte: A autora (2021).

A partir da observação dos resultados da Tabela 11, a ISODATA se apresentou mais eficiente com erros relativos menores entre 1% e 3%, em comparação com os erros do NDWI entre 11% e 18% e do MNDWI de 11%.

Na aplicação da ISODATA foi considerado que o valor do pixel é muito sensível à profundidade da água, quantidade de clorofila e partículas suspensas no conteúdo da água e, portanto, essa sensibilidade tem influência na classificação, principalmente em composições com a banda do infravermelho próximo (ELMI, 2019). Os pixels que representam a água podem ser incorporados em outra classe que não seja “água”, comprometendo o cálculo da área. Nesse sentido, podem ser consideradas mais de uma classe para representar a água e serão agrupadas para realizar o cálculo da área inundada

dos reservatórios. A Figura 19 apresenta as etapas da execução desse procedimento para uma imagem LANDSAT 5 do reservatório Barra do Juá. Foram selecionadas as bandas 4, 5 e 2 do satélite LANDSAT 5 e 5, 6 e 3 do satélite LANDSAT 8, que correspondem, respectivamente, ao infravermelho próximo e infravermelho médio e verde. Essas bandas foram selecionadas porque fornecem uma boa resposta a presença de água, além de serem as mesmas bandas utilizadas para os cálculos dos índices espectrais (NDWI e MNDWI) que tem o objetivo de delimitar a área de água.

Figura 19 - Imagem com a composição RGB das bandas 452, para o LANDSAT 5 (A.). Imagem classificada pela metodologia ISODATA (B.). Duas classes que foram identificadas como “água” (C.). União das classes “água” para cálculo da área inundada do reservatório (D.)



Fonte: A autora (2021).

#### 4.2.1 Reservatório Poço da Cruz

A Tabela 12 mostra os valores da área superficial processada pela imagem e o nível correspondente para o reservatório Poço da Cruz. Foram utilizadas 31 imagens entre os níveis 411,24 e 435,05m.

Tabela 12 – Área superficial calculada para as imagens do reservatório Poço da Cruz, em m<sup>2</sup> e diferenças entre os valores de referência e estimados

Data da imagem	Cota (m)	Área da curva (m <sup>2</sup> )	Área da imagem (m <sup>2</sup> )	Diferença (%)
05/12/2017	411,24	1.345.325	2.158.200	60,4%
12/06/2017	411,30	1.369.582	2.849.400	108,0%
19/11/2017	411,39	1.407.998	2.143.800	52,3%
04/02/2017	413,45	2.833.543,42	2.818.800	-0,5%
15/08/2017	413,90	3.172.033,90	2.437.200	-23,2%
12/08/2016	414,82	3.931.839,67	3.972.600	1,0%
01/01/2016	414,93	4.025.968,19	4.297.500	6,7%
27/09/2015	415,86	4.896.453,86	5.347.140	9,2%
14/01/2015	417,56	6.669.446,12	6.298.200	-5,6%
08/12/2018	418,33	7.599.297,94	7.652.700	0,7%
24/10/2019	418,72	8.117.503,71	8.040.600	-0,9%
21/08/2019	419,25	8.845.338,31	8.562.600	-3,2%
02/06/2019	419,72	9.556.382,72	8.997.300	-5,9%
11/01/2014	420,46	10.753.628,65	10.199.700	-5,2%
26/12/2013	420,62	11.016.383,84	10.704.600	-2,8%
10/12/2013	420,72	11.182.050,18	10.944.900	-2,1%
04/08/2013	422,39	14.359.642	13.390.200	-6,8%
14/04/2013	423,46	16.761.088	16.454.700	-1,8%
12/10/2003	424,25	18.626.564	17.622.000	-5,4%
19/07/2007	430,39	36.494.969	36.351.900	-0,4%
07/12/2006	431,14	39.194.955	39.224.700	0,1%
18/09/2006	432,02	42.600.753	42.843.600	0,6%
29/09/2010	432,20	43.321.864	41.385.600	-4,5%
02/11/2005	433,01	46.780.883	46.089.900	-1,5%
07/03/2005	433,16	47.445.996	43.543.800	-8,2%
17/12/2004	433,68	49.797.215	46.235.700	-7,2%
01/12/2004	433,71	49.935.439	46.684.800	-6,5%
10/11/2008	433,80	50.352.653	46.764.000	-7,1%
26/05/2005	433,83	50.492.031	50.702.400	0,4%
23/09/2008	434,28	52.632.710	50.085.900	-4,8%
20/03/2004	435,05	56.336.510	54.621.900	-3,0%

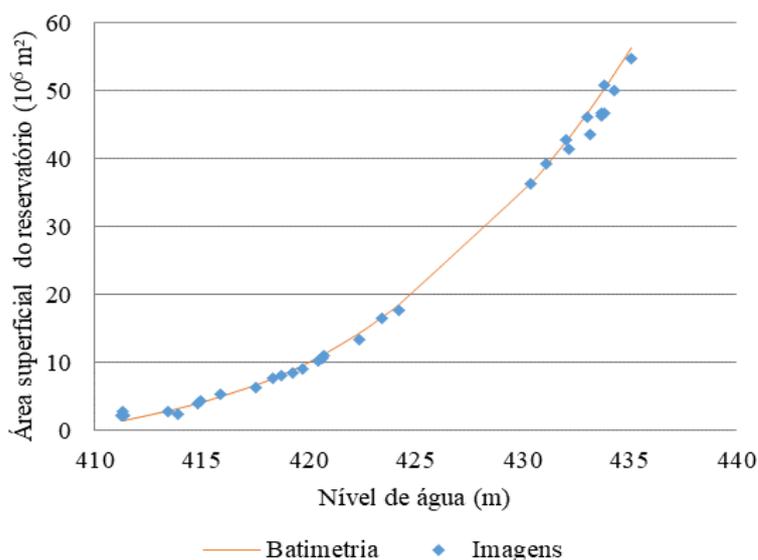
Fonte: A autora (2021).

A comparação da área de superfície calculada com imagens de satélite e fornecida pela CAV de referência mostrou uma tendência de subestimação, especialmente com o nível da água elevado (mostrado na Figura 14). No nível máximo da água, a subestimação é de 3,04% (56,34 km<sup>2</sup> para a batimetria e 54,62 km<sup>2</sup> para a imagem). O erro relativo médio para as áreas superficiais foi de 2,4%, sendo as maiores diferenças encontradas para os menores níveis, e conseqüentemente, os menores valores de área. Esse resultado se deve à resolução das imagens de satélite utilizadas neste trabalho, que apresentam resolução

espacial de 30 m e, portanto, conforme a área inundada diminui o erro na estimativa aumenta (COLLISCHONN; CLARKE, 2016).

O reservatório Poço da Cruz já apresenta uma estimativa de área superficial utilizando os índices espectrais elaborado por Costa (2019) que permite a comparação dos resultados obtidos. Em comparação com os valores de área superficial calculados por Costa (2019) utilizando os índices espectrais, que apresentaram um erro relativo médio de -6,1%, o método de classificação ISODATA apresentou vantagem com um erro médio, cerca de 2,5 vezes menor. A Figura 20 apresenta a relação da área superficial com o nível, para os valores estimados e os valores de referência.

Figura 20 – Relação da área superficial da CAV de referência e da estimada com as imagens versus o nível de água do reservatório Poço da Cruz



Fonte: A autora (2021).

Pela observação da Figura 20 é possível identificar que entre as cotas 425,00 e 430,00m não houve imagens disponíveis para aplicação da metodologia. Esse fato se deve, principalmente, pela ausência de dados de nível d'água monitorado em alguns períodos. No entanto, ainda houve uma boa amostragem de imagens com diferentes valores de níveis para esse reservatório.

Também é possível notar que os valores da parte superior da curva, com níveis de água maiores, apresentaram-se levemente subestimados em comparação com a curva de referência. Já alguns pontos do início da curva, valores com nível menor e com os maiores

erros se apresentaram superestimados. E os demais valores mostraram uma boa aderência à curva de referência.

#### 4.2.2 Reservatório Barra do Juá

A curva cota-área-volume de referência utilizada para validar a metodologia no reservatório Barra do Juá foi obtida através dos dados do PE3D, conforme mencionado na metodologia, sendo necessário o ajuste dos valores de cota para que fosse possível comparar os valores de volume e área inundada considerando o mesmo nível, visto que ambos apresentavam níveis de referência diferentes. A ficha técnica da barragem informa a cota do vertedouro, que também pode ser identificada no MDT do PE3D. A diferença entre essas elevações é o fator que deve ser adicionado à medição do nível d'água na estação para se ter a mesma referência do MDT. A Tabela 13 mostra os valores da área superficial processada pela imagem e o nível correspondente para o reservatório Barra do Juá. Foram utilizadas 17 imagens entre os níveis 392,75 m e 401,23m.

Tabela 13 – Área superficial calculada para as imagens do reservatório Barra do Juá, em m<sup>2</sup> e diferenças entre os valores de referência e estimados

<b>Data da imagem</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Cota PE3D (m)</b>	<b>Sensor</b>	<b>Área da curva (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área da imagem (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Diferença (%)</b>
10/11/2017	392,75	395,05	LC08	1.310.136	1.382.400	5,5%
16/11/2019	395,50	397,80	LC08	3.629.927	3.597.300	-0,9%
02/12/2019	395,58	397,88	LC08	3.706.857	4.014.000	8,3%
15/10/2019	396,25	398,55	LC08	4.346.142	4.464.000	2,7%
13/09/2019	396,88	399,18	LC08	4.984.727	4.946.400	-0,8%
08/04/2020	397,43	399,73	LC08	5.626.241	5.662.800	0,6%
25/09/2006	397,49	399,79	LT05	5.696.224	5.814.000	2,1%
31/12/2018	397,74	400,04	LC08	5.994.989	6.158.700	2,7%
24/10/2005	397,90	400,20	LT05	6.210.282	5.596.200	-9,9%
13/11/2018	398,27	400,57	LC08	6.708.145	6.613.200	-1,4%
28/10/2018	398,48	400,78	LC08	6.990.717	6.866.100	-1,8%
12/10/2018	398,80	401,10	LC08	7.451.214	8.049.600	8,0%
19/12/2008	400,02	402,32	LT05	9.582.656	9.644.400	0,6%
22/06/2018	400,26	402,56	LC08	10.071.062	9.826.200	-2,4%
01/11/2008	400,64	402,94	LT05	10.844.373	10.422.900	-3,9%
05/04/2007	401,02	403,32	LT05	11.693.715	10.143.000	-13,3%
19/10/2009	401,23	403,53	LT05	12.170.966	10.364.400	-14,8%

Fonte: A autora (2021).



### 4.2.3 Reservatório Jucazinho

A Tabela 14 mostra os valores da área superficial processada pela imagem e o nível correspondente para o reservatório Jucazinho. Foram utilizadas 4 imagens entre os níveis 258,00 e 289,87m.

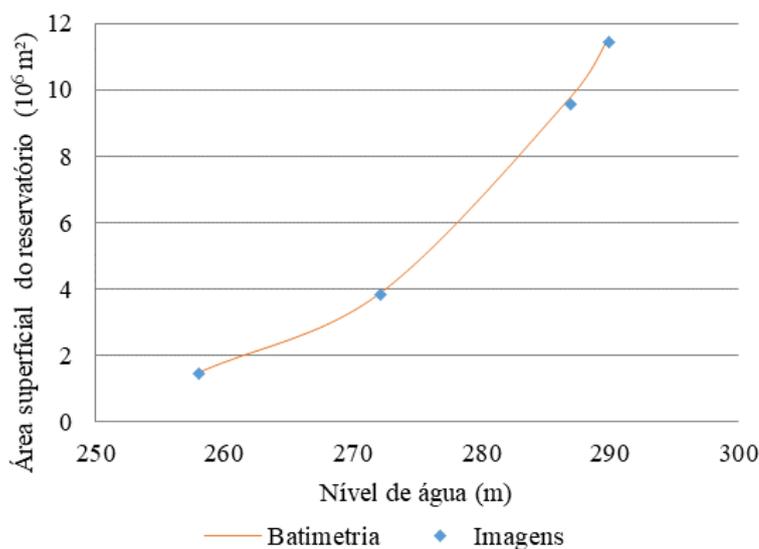
Tabela 14 – Área superficial calculada para as imagens do reservatório Jucazinho, em m<sup>2</sup> e diferenças entre os valores de referência e estimados

Data da imagem	Cota (m)	Sensor	Área da curva (m <sup>2</sup> )	Área da imagem (m <sup>2</sup> )	Diferença (%)
23/05/2018	258,00	LC08	1.504.921,42	1.440.900,00	-4,3%
26/04/2014	272,13	LC08	3.894.199,40	3.834.273,50	-1,5%
29/08/2007	286,99	LT05	9.819.996,51	9.576.900,00	-2,5%
17/03/2011	289,87	LT05	11.584.727,57	11.420.338,20	-1,4%

Fonte: A autora (2021).

O reservatório não apresentou uma quantidade significativa de imagens devido à incidência de nuvens sobre o mesmo durante grande parte do tempo. Apesar disso, as imagens encontradas exibem uma boa variação das áreas inundadas. O erro médio relativo para a estimativa das áreas superficiais foi de -2,4%. A Figura 22 apresenta a relação da área superficial com o nível para os valores estimados e os valores de referência.

Figura 22- Relação da área superficial da CAV de referência e da estimada com o nível de água do reservatório Jucazinho



Fonte: A autora (2021).

Apesar da quantidade reduzida de imagens, a estimativa da área de água desse reservatório é importante para obter mais dados que permitam avaliar o método de classificação ISODATA. Pela observação da Figura 22 é possível notar a boa aderência dos valores de área estimado à curva de referência em todas as faixas de nível da água.

### 4.3 Estimativas das curvas cota-volume

A partir da estimativa da área superficial de água com a metodologia ISODATA e dos dados de nível, foi calculado o volume como descrito na seção 3.1.5 obtendo a relação cota-volume para cada reservatório.

#### 4.3.1 Reservatório Poço da Cruz

A Tabela 15 apresenta os valores de volume calculados a partir da área superficial e do nível de água para o reservatório Poço da Cruz. Conforme explicado na metodologia, foi adotado o mesmo valor da curva de referência para volume inicial dessa estimativa de modo que não há diferença entre esses valores.

Tabela 15 – Volume calculado para as imagens do reservatório Poço da Cruz, em  $\text{hm}^3$  e diferenças entre os valores de referência e estimados

Data da imagem	Cota (m)	Volume da curva ( $\text{hm}^3$ )	Volume imagem ( $\text{hm}^3$ )	Diferença (%)
05/12/2017	411,24	3,95	3,95	-
12/06/2017	411,30	4,03	4,10	1,6%
19/11/2017	411,39	4,16	4,32	3,9%
04/02/2017	413,45	8,31	9,42	13,4%
15/08/2017	413,90	9,66	10,60	9,7%
12/08/2016	414,82	12,92	13,52	4,6%
01/01/2016	414,93	13,36	13,98	4,6%
27/09/2015	415,86	17,50	18,45	5,4%
14/01/2015	417,56	27,28	28,34	3,9%
08/12/2018	418,33	32,76	33,70	2,9%
24/10/2019	418,72	35,83	36,76	2,6%
21/08/2019	419,25	40,32	41,16	2,1%
02/06/2019	419,72	44,64	45,29	1,4%
11/01/2014	420,46	52,15	52,38	0,5%
26/12/2013	420,62	53,89	54,06	0,3%
10/12/2013	420,72	55,00	55,14	0,3%

04/08/2013	422,39	76,22	75,43	-1,0%
14/04/2013	423,46	92,85	91,36	-1,6%
12/10/2003	424,25	106,82	104,79	-1,9%
19/07/2007	430,39	272,89	267,11	-2,1%
07/12/2006	431,14	301,26	295,44	-1,9%
18/09/2006	432,02	337,23	331,54	-1,7%
29/09/2010	432,20	344,97	339,12	-1,7%
02/11/2005	433,01	381,44	374,53	-1,8%
07/03/2005	433,16	388,51	381,25	-1,9%
17/12/2004	433,68	413,79	404,59	-2,2%
01/12/2004	433,71	415,28	405,99	-2,2%
10/11/2008	433,80	419,80	410,19	-2,3%
26/05/2005	433,83	421,31	411,65	-2,3%
23/09/2008	434,28	444,51	434,36	-2,3%
20/03/2004	435,05	483,72	474,63	-1,9%

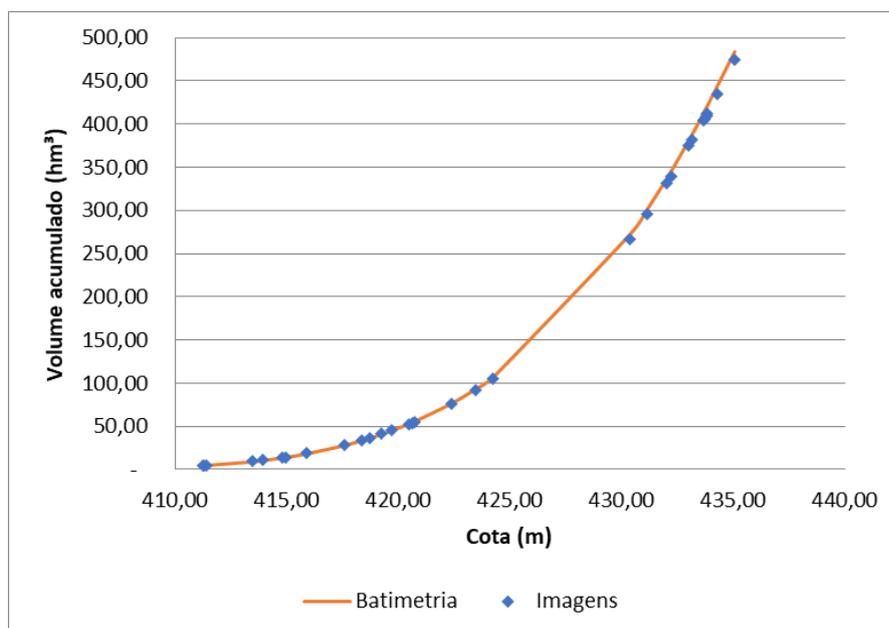
Fonte: A autora (2021).

O erro relativo médio para os volumes estimados foi de 0,9%. Coerente com os valores de área, os maiores erros também foram encontrados para os níveis mais baixos. Em comparação com os valores calculados por Costa (2019) utilizando os índices espectrais, que apresentaram um erro relativo médio de -8,0%, o método de classificação ISODATA, novamente, apresentou grande vantagem com um erro médio, de aproximadamente 9 vezes menor.

Para a cota máxima (435,05m), também é observada essa mesma vantagem, visto que o erro relativo encontrado para a estimativa do volume utilizando o método de classificação não supervisionada foi de -1,9%. Já o volume calculado utilizando os índices espectrais (Costa, 2019) apresentou um erro relativo de -5,5%.

A Figura 23 apresenta a relação volume da curva de referência com o nível d'água do reservatório Poço da Cruz e os pontos de volume estimado pela aplicação da metodologia deste trabalho.

Figura 23- Relação do volume da CAV de referência e da estimada com o nível de água do reservatório Poço da Cruz



Fonte: A autora (2021).

Observa-se que os valores de volumes apresentaram boa aderência à curva de referência. O comportamento dos volumes calculados para as demais cotas se apresentou pouco superestimado em comparação com os volumes fornecidos pela batimetria para os níveis inferiores da curva, sendo encontrado um erro médio relativo de cerca de 3,8%. Para os níveis superiores, maiores que 420,72m, os volumes se apresentaram levemente subestimados com erro relativo médio de -1,9%.

As maiores diferenças entre os valores de volume, em termos absolutos, permaneceram entre os níveis 433,01m a 435,05m, sendo a maior diferença de 10hm<sup>3</sup> para o nível de 434,28m. Esse resultado pode ser justificado pela forma da estimativa do volume do reservatório, que considera os valores anteriormente encontrados com a aplicação da metodologia para o cálculo do volume do próximo nível, sendo assim, há um acúmulo dos erros ao longo dos níveis e, portanto, as maiores diferenças se acumularam nos últimos níveis, condizente ao esperado.

A validação dos resultados foi realizada utilizando o teste de hipóteses *t* de *Student*, com um nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ). A Tabela 16 apresenta o resultado desse teste para o reservatório Poço da Cruz, na qual podemos observar que não foi possível rejeitar a hipótese nula de que os volumes medidos através da metodologia deste trabalho são iguais aos volumes obtidos a partir da CAV de referência.

Tabela 16 – Parâmetros estatísticos do teste *t* pareado para os volumes do reservatório Poço da Cruz

<b>Hipótese nula (H0)</b>		Volumes calculados = Volumes medidos (CAV)		
<b>Hipótese alternativa (H1)</b>		Volumes calculados ≠ Volumes medidos (CAV)		
$(\bar{X} - \mu_0)$ (hm <sup>3</sup> )	$\sigma$ (hm <sup>3</sup> )	N	Grau de liberdade	T
0,30	0,85	30	29	1,95

Fonte: A autora (2021).

No entanto, é importante ressaltar que o teste *t* realiza uma análise para toda a curva e assim não informa detalhes sobre os valores de volume de cada nível de água, o que seria importante para a utilização das CAVs estimadas pelos órgãos gestores. Ainda o fato de não rejeitar a hipótese nula não significa que as duas amostras são estatisticamente iguais, pode ser indicações de duas alternativas: a metodologia de estimação das CAVs por sensoriamento remoto é boa ou existe uma reduzida quantidade de pontos não possibilitando o teste de rejeitar a hipótese, por falta de dados.

#### 4.3.2 Reservatório Barra do Juá

A Tabela 17 apresenta os valores de volume calculados a partir da área superficial e do nível de água para o reservatório Barra do Juá.

Tabela 17 – Volume calculado para as imagens do reservatório Barra do Juá, em hm<sup>3</sup> e diferenças entre os valores de referência e estimados

<b>Data da imagem</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Cota PE3D (m)</b>	<b>Sensor</b>	<b>Volume da curva (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume imagem (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Diferença (%)</b>
10/11/2017	392,75	395,05	LC08	2,06	2,06	-
16/11/2019	395,50	397,80	LC08	8,72	8,67	-0,6%
02/12/2019	395,58	397,88	LC08	8,98	8,95	-0,3%
15/10/2019	396,25	398,55	LC08	11,73	11,81	0,7%
13/09/2019	396,88	399,18	LC08	14,60	14,77	1,2%
08/04/2020	397,43	399,73	LC08	17,53	17,69	0,9%
25/09/2006	397,49	399,79	LT05	17,85	18,03	1,1%
31/12/2018	397,74	400,04	LC08	19,22	19,53	1,6%
24/10/2005	397,90	400,20	LT05	20,27	20,47	1,0%
13/11/2018	398,27	400,57	LC08	22,70	22,73	0,1%
28/10/2018	398,48	400,78	LC08	24,08	24,14	0,3%
12/10/2018	398,80	401,10	LC08	26,33	26,53	0,8%
19/12/2008	400,02	402,32	LT05	36,72	37,30	1,6%
22/06/2018	400,26	402,56	LC08	39,09	39,64	1,4%
01/11/2008	400,64	402,94	LT05	42,85	43,49	1,5%

05/04/2007	401,02	403,32	LT05	47,29	47,40	0,2%
19/10/2009	401,23	403,53	LT05	49,81	49,55	-0,5%

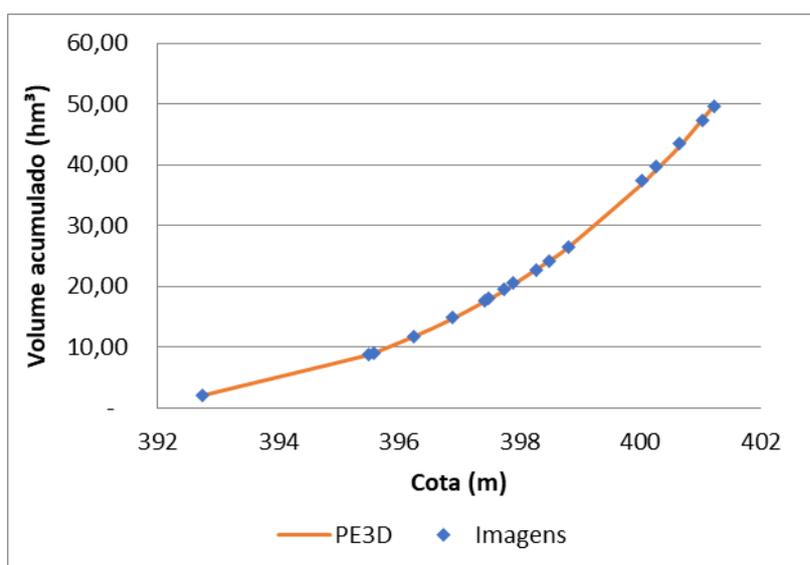
Fonte: A autora (2021).

Dentre os 17 pontos de níveis d'água no qual foi estimado o volume pelos dados de sensoriamento remoto, aproximadamente, 80% apresentou um valor de volume levemente superestimado em relação a curva de referência, sendo o erro médio relativo de todos os pontos de 0,7%. O maior erro relativo para o volume estimado foi de 1,6%, para as cotas 397,74 m e 400,02 m.

As maiores diferenças entre os valores de volume, em termos absolutos, foram observadas para os níveis de água em torno de 400 m, com o maior valor de 0,64 hm<sup>3</sup> para a cota 400,64m. Para a cota máxima do Barra do Juá, esse erro relativo foi de - 0,5%, que correspondem em termos de volume a 0,26 hm<sup>3</sup>.

A Figura 24 apresenta a relação volume da curva de referência com o nível d'água do reservatório Barra do Juá e os pontos de volume estimado pela aplicação da metodologia deste trabalho, onde se observa que os valores de volumes apresentaram boa aderência a curva de referência.

Figura 24- Relação do volume da CAV de referência e da estimada com o nível de água do reservatório Barra do Juá



Fonte: A autora (2021).

A validação dos resultados foi realizada a utilizando o teste de hipóteses *t* de *Student*, com um nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ), a Tabela 18 apresenta o resultado

desse teste para o reservatório Barra do Juá, na qual também podemos observar que não foi possível rejeitar a hipótese nula de que os volumes medidos através da metodologia desse trabalho são iguais aos volumes obtidos a partir da CAV de referência.

Tabela 18 – Parâmetros estatísticos do teste *t* pareado para os volumes do reservatório Barra do Juá

<b>Hipótese nula (H0)</b>		Volumes calculados = Volumes medidos (CAV)		
<b>Hipótese alternativa (H1)</b>		Volumes calculados ≠ Volumes medidos (CAV)		
$(\bar{X} - \mu_0)$ (hm <sup>3</sup> )	$\sigma$ (hm <sup>3</sup> )	N	Grau de liberdade	T
0,02	0,21	16	15	0,31

Fonte: A autora (2021).

#### 4.3.3 Reservatório Jucazinho

A Tabela 19 apresenta os valores de volume calculados a partir da área superficial e do nível de água para o reservatório Jucazinho.

Tabela 19 – Volume calculado para as imagens do reservatório Jucazinho, em hm<sup>3</sup> e diferenças entre os valores de referência e estimados

<b>Data da imagem</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Sensor</b>	<b>Volume da curva (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume imagem (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Diferença (%)</b>
23/05/2018	258,00	LC08	14,90	14,90	-
26/04/2014	272,13	LC08	50,01	50,82	1,6%
29/08/2007	286,99	LT05	147,16	147,28	0,1%
17/03/2011	289,87	LT05	178,57	177,45	-0,6%

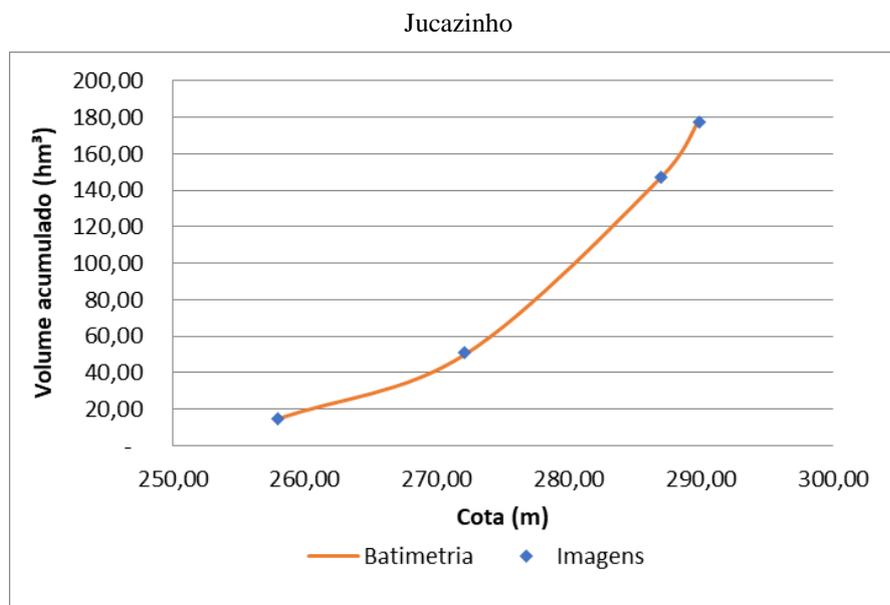
Fonte: A autora (2021).

O reservatório estava com uma capacidade de 87% do volume máximo para a cota máxima de 298,87m, na qual foi realizada a estimativa do volume, sendo o valor de 177,45 hm<sup>3</sup>, que corresponde a - 0,6% do volume obtido pela batimetria.

Os demais níveis apresentaram o volume levemente superestimado em relação aos volumes da batimetria, sendo o erro médio relativo da totalidade das amostras das imagens de 0,4%. Sendo o maior erro relativo para o volume estimado de 1,6% encontrado para o nível d'água de 272,13 m. Em termos absolutos, o maior erro foi de 1,12 hm<sup>3</sup> para a cota máxima.

A Figura 25 apresenta a relação volume da curva de referência com o nível d'água do reservatório Jucazinho e os pontos de volume estimado pela aplicação da metodologia desse trabalho, onde se observa que os valores de volumes apresentaram boa aderência a curva de referência.

Figura 25- Relação do volume da CAV de referência e da estimada com o nível de água do reservatório



Fonte: A autora (2021).

A validação dos resultados foi realizada utilizando o teste de hipóteses *t* de *Student*, com um nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ). A Tabela 20 apresenta o resultado desse teste para o reservatório Jucazinho, na qual também podemos observar que não foi possível rejeitar a hipótese nula de que os volumes medidos através da metodologia deste trabalho são iguais aos volumes obtidos a partir da CAV de referência.

Tabela 20 – Parâmetros estatísticos do teste *t* pareado para os volumes do reservatório Jucazinho

<b>Hipótese nula (H0)</b>		Volumes calculados = Volumes medidos (CAV)		
<b>Hipótese alternativa (H1)</b>		Volumes calculados $\neq$ Volumes medidos (CAV)		
$(\bar{X} - \mu_0)$ (hm <sup>3</sup> )	$\sigma$ (hm <sup>3</sup> )	N	Grau de liberdade	T
0,37	1,05	3	2	0,61

Fonte: A autora (2021).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O uso de produtos de sensoriamento remoto para atualização de curvas cota-área-volume em reservatórios de abastecimento de água em Pernambuco se mostrou eficiente. A obtenção e processamento das imagens de satélite para determinação da área superficial por meio da classificação não supervisionada ISODATA apresentou resultados muito consistentes, além disso essa metodologia se mostrou mais eficiente do que outros métodos comumente utilizados.

Os três reservatórios analisados exibiram resultados satisfatórios, com erros relativos menores que 2%, para a máxima capacidade de armazenamento. Dentre eles o reservatório de Barra do Juá mostrou o menor valor de menos 0,5%, mesmo esse sendo o menor reservatório avaliado e, que, portanto, apresentaria a maior influência da resolução das imagens de satélite adotadas nesse trabalho.

No entanto, a metodologia ainda apresenta algumas limitações, principalmente, pela disponibilização dos dados. Os dados de sensoriamento remoto (imagens de satélite) não devem ser de longo prazo, mais que 15 anos, por exemplo, visto que o reservatório pode apresentar alterações devido ao assoreamento que ocorre naturalmente ao longo dos anos comprometendo a relação cota-área-volume.

Além disso, é necessário que nas imagens escolhidas não haja a presença de nuvens em cima da área inundada do reservatório, pois inviabiliza a aplicação da metodologia. Isso restringe a aplicação em reservatórios presentes em zonas costeiras, por exemplo, onde há uma incidência praticamente constante de nuvens. No entanto, vale destacar, os avanços alcançados em anos recentes a respeito da utilização de métodos de preenchimento de pixels como forma de remoção de nuvens de imagens de satélite. Por outro lado, o uso de imagens pode ajudar na identificação da alteração das características geométricas dos reservatórios e indicar a necessidade de atualização da CAV. Para o reservatório de Poço da Cruz, ficou clara a alteração da relação cota-área quando se utilizam imagens anteriores a 2004.

Além dos dados de sensoriamento remoto, os dados de monitoramento de nível são essenciais para a aplicação da metodologia. Nesse sentido, é importante ressaltar que existem incertezas associadas a esse tipo de dado também. A falta de monitoramento em alguns períodos faz com que haja a necessidade de interpolação dos dados de nível d'água,

aumentando a incerteza associada aos resultados, além disso, o possível deslocamento das réguas pode trazer dúvidas quanto aos valores de nível monitorados. Uma alternativa às cotas medidas nas estações pode ser o uso de altimetria radar capaz de estimar o valor da elevação da água por meio de sensores a bordo de satélites como Sentinel-3A, -3B, Jason-3 e futuras missões previstas para serem lançadas.

Apesar dessas limitações, existe uma quantidade considerável de reservatórios que permitem a replicação dessa metodologia, visto que há sempre a necessidade de atualização das curvas cota-área-volume para que seja possível realizar uma gestão efetiva dos recursos hídricos. Nesse sentido, a metodologia avaliada se torna uma alternativa viável e de custo reduzido, quanto se comparada a procedimentos tradicionais, exibindo resultados muito satisfatórios.

A segunda abordagem deste trabalho, de realizar a atualização da curva cota-área-volume de alguns reservatórios que não possuam a curva atualizada utilizando o MDT e avaliar a potencialidade de uso de relações  $V = f(A)$  para ser aplicado em reservatórios sem monitoramento de nível da água, apresentou importantes conclusões quanto à distribuição espacial dos coeficientes de ajustes. A obtenção das curvas CAV utilizando o MDT fornecidos pelo PE3D apresenta uma forma alternativa e eficiente de atualizar as curvas por meio de dados de sensoriamento remoto.

As relações de volume em função da área superficial é uma metodologia que visa auxiliar na gestão dos recursos hídricos, visto a elevada quantidade e a importância dos reservatórios utilizados no abastecimento de água e que em muitos deles não há monitoramento de nível da água. Os valores dos coeficientes obtidos, a partir das curvas atualizadas, não apresentaram um padrão de comportamento quando relacionados ao relevo do território pernambucano como estabelecido no PERH.

Os processos de obtenção das CAVs foram aprimorados ao longo dos anos a partir do surgimento de novas tecnologias, que se apresentam mais precisas produzindo resultados mais próximos à situação real dos reservatórios. Nesse sentido, essa pode ser uma justificativa para as significativas diferenças existentes entre os valores dos coeficientes fornecidos pelo PERH e os calculados.

No entanto, outras formas de classificação dos parâmetros podem ser testadas para identificação de quais características geométricas influenciam os valores de  $\alpha$  e  $K$  das relações  $V=f(A)$ . Dessa forma, na intenção de encontrar um padrão de distribuição

espacial, variáveis como área superficial dos reservatórios, capacidades máximas, declividade do terreno, declividade longitudinal e bacias hidrográficas onde se localizam entre outros, sendo essa uma potencialidade para realização de trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

ABILEAH, R.; VIGNUDELLI, S.; SCOZZARI, A. A completely remote sensing approach to monitoring reservoirs water volume. **International Water Technology Journal**, v. I, n. 1, p. 59-72, 2011.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, 2019.

ANA-Agência Nacional de Águas. Reservatórios do semiárido brasileiro: Hidrologia, balanço hídrico e operação. **Relatório Síntese**. Brasília-DF, 88 p., 2017

ANA-Agência Nacional de Águas. **Definição da base de referência de Disponibilidade Hídrica Superficial**. NT016SPR2016 023323/2016-47, 2016a.

ANA – Agência Nacional de Águas. Sistemas de Informação na gestão de águas: conhecer para decidir. **Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos**. Brasília -DF. p. 122 v.8. ISBN: 978-85-89629-98-0, 2016b.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Brasília, DF: ANA, 2013.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil – Abastecimento Urbano de Água**. Brasília, DF, 2010

ARSEN, A., J. F. CRETAUX, and R. A. DEL RIO. Use of SARAL/AltiKa over Mountainous Lakes, Intercomparison with Envisat Mission. **Marine Geodesy**, v. 38, p. 534-548, 2015. doi: 10.1080/01490419.2014.1002590.

AVISSE, N., TILMANT, A., MÜLLER, M. F., ZHANG, H.: Monitoring small reservoirs' storage with satellite remote sensing in inaccessible areas, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 21, 6445–6459, <https://doi.org/10.5194/hess-21-6445-2017>, 2017.

BACALHAU, J. R.; RIBEIRO NETO, A.; OLIVEIRA, L. M. M. Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: açude Algodões no sertão pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, p. 283-293, 2017.

BAUP, F., FRAPPART, F., MAUBANT, J. Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 2007–2020, 2014. doi:10.5194/hess-18-2007-2014.

BLAIR, J. B.; RABINE, D. L.; HOFTON, M. A. The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 115-122, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00002-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00002-7).

CAVALCANTE, P. V. O. Análise da Geometria de Pequenos e Médios Reservatórios com uso do PE3D. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 35 p., 2020.

- CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. M.; CAMPOS, P. H. A. L. **Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial**. In: PORTUGUESE SPEAKING COUNTRIES SYMPOSIUM OF HYDRAULICS AND WATER RESOURCES, 12., 2015, Brasília, DF, Anais... Porto Alegre: ABRH, 2015.
- CIRILO, J. A. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido**. In: Estudos avançados. v. 22, n.63, p. 61-82, São Paulo-SP, 2008.
- COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, p.719-727, 2016.
- COSTA, F.A. Sensoriamento Remoto Aplicado ao Monitoramento de Reservatório no Semiárido do Nordeste: Poço da Cruz (Pernambuco). Recife: UFPE, 2019. 109p. Dissertação de Mestrado em Gestão e regulamentação de recursos hídricos.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C.E.M. (2018). Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. Universidade Federal de Santa Maria RBRH — **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 13 n.1 Jan/Mar, p.111-124, 2008.
- DEUS, D.; GLOAGUEN, R. Remote Sensing Analysis of Lake Dynamics in Semi-Arid Regions: Implication for Water Resource Management. Lake Manyara, East African Rift, Northern Tanzania. *Water*, v. 5, p. 698-727, 2013. doi:10.3390/w5020698
- ELMI, O. Dynamic water masks from optical satellite imagery. Stuttgart: University of Stuttgart, 2019. 183 p. Tese de doutorado.
- FERREIRA, T. S. G.; FEITOZA, M. A. B.; ALMEIDA NETO, J. B; RODRIGUES, E. A. M.; CIRILO, J. A. Avaliação de reservatório em Pernambuco utilizando produtos de sensoriamento remoto de alta resolução. 30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária de Ambiental. Natal, 2019.
- FICK, S.E.; HIJMANS, R.J. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2020.
- FONTES, A. S.; ZUCCHI, M. DO R.; MEDEIROS, Y. D. P.; AZEVEDO, A. E. G. de. Avaliação dos fatores intervenientes no processo de salinização em reservatórios superficiais do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, p. 708–721, 2015.
- GAO, H.; BIRKETT, C.; LETTENMAIER, D. P. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. **Water Resources Research**, v. 48, n. W09504, 2012.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAUB, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18–27, 2017.
- KEARNS, T. A.; BREMAN, J. Bathymetry: the art and science of seafloor modeling for modern applications. Ocean Globe, ESRI Press, Redlands, 2010.
- LAMSAL, P., ATREYA, K., GHOSH, M.K., PANT, K.P. Effects of population, land cover change, and climatic variability on wetland resource degradation in a Ramsar listed

Ghodaghodi Lake Complex, Nepal. **Environmental Monitoring and Assessment**, 191, 415, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7514-0>

LIEBE, J., VAN DE GIESEN, N., ANDREINI, M. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment A case study in the Upper East Region of Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, 30, 448–454, 2005.

MARTINS et al. (2007). “Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d’água do Brasil” in **Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p.969-976. 21-26 abril, 2007.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.7, p.1425-1432, 1996.

MEMARSADEGHI, N., MOUNT, D. M., NETANYAHU, N. S., & LE MOIGNE, J. A fast implementation of the ISODATA clustering algorithm. *International Journal of Computational Geometry & Applications*. 17(01), p.71–103, 2007. doi: 10.1142/S0218195907002252

MOLLE, F. **Geometria dos Pequenos Açudes**. 3ª ed. Recife: SUDENE, 1994.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2007.

NASCIMENTO, F. N. *Produtos de Sensoriamento Remoto de Alta Resolução Aplicados à Caracterização Volumétrica de Reservatórios de Água*. Dissertação, (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 103 p., 2017.

NASCIMENTO, V.; RIBEIRO NETO, A. Characterization of reservoirs for water supply in Northeast Brazil using high resolution remote sensing. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 22, e50, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0217170060>

PEREIRA, B., MEDEIROS, P., FRANCKE, T., RAMALHO, G., FOERSTER, S., DE ARAÚJO, J.C. 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**, 64, 1, 66-79, 2019.

PEREIRA, G. H. A.; LOHMANN, M.; MAGANHOTTO, R. F. Proposta e avaliação de índices para delimitar e mapear corpos d’água utilizando imagens do satélite LANDSAT 8. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.09, n.06, p.1956-1968, 2016.

\_\_\_\_\_. **Pernambuco Tridimensional**. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/>. Acesso em: 13/12/2021.

PERNAMBUCO. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco**. Recife, 1998.

POLIDORIO, A. M.; et al. Segmentação de corpos d’água em imagens multiespectrais e temporais usando watershed com marcadores automaticamente definidos. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, **Anais...** INPE, p.

4249-4257. Disponível em: <  
<http://urlib.net/rep/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.19.14.49?ibiurl.backgroundlanguage=pt-BR>>.  
 Acesso: 13 fev. 2021.

ROKNI, K., AHMAD, A., SELAMAT, A., HAZINI, S. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. **Remote Sensing**. 6, p.4173-4189, 2014. doi:10.3390/rs6054173

RODRIGUES, L.N., LIEBE, J. Small reservoirs depth-area-volume relationships in Savannah Regions of Brazil and Ghana. **Water Resources and Irrigation Management**, v.2, n.1, 1-10, 2013.

SCHWATKE, C.; SCHERER, D.; DETTMERING, D. Automated Extraction of Consistent Time-Variable Water Surfaces of Lakes and Reservoirs Based on Landsat and Sentinel-2. **Remote Sensing**. 11(9), 1010, 2019. doi:10.3390/rs11091010

SCOTT, C.A.; LUTZ-LEY, A.N. (2016). Enhancing Water Governance for Climate Resilience: Arizona, USA—Sonora, Mexico Comparative Assessment of the Role of Reservoirs in Adaptive Management for Water Security. **Increasing Resilience to Climate Variability and Change, Water Resources Development and Management**. C. Tortajada (ed.), Springer Science+Business Media Singapore 2016.

SOBRAL, Maria do Carmo et al. Geotecnologias na gestão de reservatórios: uma revisão e uma proposta de integração. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 841-852, Oct. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017111054>.

STEFFEN, Carlos Alberto, et al. Introdução ao Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: INPE, S/D, 1981. Disponível em:  
<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>. Acesso em: 10 jan. 2021.

UN-Water. Water Security & the Global Water Agenda - A UN-Water Analytical Brief. United Nations University, Ontário-Canadá, 37 p., 2013

WANG, J.; SHENG, Y.; WADA, Y. Little impact of the Three Gorges Dam on recent decadal lake decline across China's Yangtze Plain. **Water Resources Research**. v. 53, p.3854-3877, 2017. <https://doi.org/10.1002/2016WR019817>

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.

ZHANG, H.; GORELICK, S.M.; ZIMBA, P.V.; ZHANG, X. A remote sensing method for estimating regional reservoir area and evaporative loss. **Journal of Hydrology**. v.555, p. 213–227, 2017.