



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGreste
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO FARIAS DA COSTA JÚNIOR

**USO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO E MODELO DIGITAL DE
TERRENO PARA ATUALIZAÇÃO DOS DADOS DE BARRAGENS E
CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE RESERVATÓRIOS EM
PERNAMBUCO**

Caruaru

2022

JOÃO FARIAS DA COSTA JÚNIOR

USO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO E MODELO DIGITAL DE TERRENO PARA ATUALIZAÇÃO DOS DADOS DE BARRAGENS E CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE RESERVATÓRIOS EM PERNAMBUCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Defesa realizada por videoconferência.

Áreas de concentração: Geotecnia e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Caruaru

2022

AGRADECIMENTOS

A jornada para conclusão do curso de engenharia e para realização deste trabalho foi bastante árdua, no entanto, contei com o apoio de diversas pessoas que me auxiliaram nessa trajetória.

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar sabedoria, força e paciência para enfrentar os desafios que surgiam ao longo do caminho.

Em seguida, agradeço a minha família, em especial a meus pais, que sempre estiveram do meu lado, me incentivando, me motivando e me dando condições de seguir em frente.

Agradeço também aos amigos que ganhei durante esse percurso e que estiveram comigo nos momentos alegres e tristes.

Por fim gostaria de agradecer a todos os professores que partilharam parte de seu conhecimento comigo, em especial ao Prof. Dr. José Almir Cirilo, meu orientador.

Uso do Modelo Digital de Elevação e do Modelo Digital de Terreno para atualização dos dados de barragens e capacidade de armazenamento de reservatórios em Pernambuco.

Use of the Digital Elevation Model and the Digital Terrain Model to update dam data and reservoir storage capacity in Pernambuco.

RESUMO

A baixa disponibilidade hídrica de Pernambuco causa problemas ao estado e o faz recorrer as soluções de infraestrutura desenvolvidas pela engenharia de recursos hídricos. Ao longo de seu território é possível identificar diversas barragens já construídas além daquelas que se encontram na fase de estudos e implantação. Cada um desses reservatórios dispõe de informações referentes às relações Cota x Área x Volume e sua consistência é bastante importante para a elaboração de diferentes planos de ação. No decorrer do tempo, é natural que esses reservatórios estejam sujeitos a mudanças, visto que inúmeros fatores podem ocasionar esse processo. Nesse sentido, este trabalho objetiva comparar as curvas Cota x Área x Volume existentes dos reservatórios de Carpina, Goitá e Tapacurá, situados na bacia do Capibaribe e do reservatório de Pirapama, situado na bacia GL2, com novas curvas traçadas através de um modelo digital de terreno obtido por sensoriamento remoto, fornecido pelo programa Pernambuco Tridimensional, e com a nova relação Cota x Área x Volume determinar a vazão regularizável dos reservatórios. Nesse estudo, os resultados obtidos assemelham-se com aqueles existentes nas fichas técnicas das barragens, apresentando pequenas variações na capacidade total dos reservatórios.

Palavras-chave: Pernambuco Tridimensional. Bacia do Capibaribe. Bacia GL2. Sensoriamento Remoto. LiDAR.

ABSTRACT

The low availability of water in Pernambuco causes problems to the state and makes it resort infrastructure solutions developed by water resources engineering. Throughout its territory it is possible to identify several dams already built beyond those that are in the study and implementation phase. Each of these reservoirs has information regarding the relations Elevation x Area x Volume and its consistency is very important for the elaboration of different

action plans. Over time, it is natural that these reservoirs are subject to change since numerous factors can cause this process. In this sense, this work aims to compare the existing Elevation x Area x Volume curves of the Carpina, Goitá and Tapacurá reservoirs, located in the Capibaribe basin and the Pirapama reservoir, located in the GL2 basin, with new curves drawn through a digital model of land obtained by remote sensing, provided by the Pernambuco Three-Dimensional program, and with the new curve Elevation x Area x Volume determine the regularizable flow of the reservoirs. In this study, the results obtained are similar to those in the data sheets of the dams, with small variations in the total capacity of the reservoirs.

Keywords: Pernambuco Three-dimensional. Capibaribe Basin. GL2 Basin. Remote Sensing. LiDAR.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, bem como seu desenvolvimento estão intimamente ligados com a disponibilidade hídrica de determinada região. Ao longo dos anos, devido as atividades, agrícolas, culturais e industriais, a demanda por água tem evoluído e causado impactos negativos ao meio ambiente. Segundo Santos *et al.* (2014), a disponibilidade de água em boas condições para o abastecimento humano, é uma preocupação para a humanidade.

No Brasil, o Nordeste abriga a maior parte do semiárido que é caracterizado pela irregularidade das chuvas. Mais especificamente no estado de Pernambuco, a escassez hídrica assola boa parte de seu território. Apesar de possuir diversos rios, o estado enfrenta dificuldades na gestão de seus recursos hídricos. De acordo com Cirilo (2008), a problemática dos recursos hídricos nas regiões semiáridas é uma questão crucial para a superação dos obstáculos ao desenvolvimento.

O estado de Pernambuco, devido à irregularidade das precipitações, apresenta um balanço hídrico negativo, sendo este um dos piores do Brasil. Segundo o Projeto de Sustentabilidade Hídrica (PSHPE) a disponibilidade hídrica de Pernambuco é da ordem de 1320 m³/hab/ano. A fim amenizar esse cenário, diversas obras para transposição de água foram e continuam sendo realizadas em todo território pernambucano.

Levando em consideração que o atual panorama tem a possibilidade de contínua expansão, é importante que as informações de infraestrutura da rede e de seus reservatórios estejam atualizadas. Nesse contexto, os dados existentes das relações cota-área-volume dos reservatórios são questionados quanto a sua validade, uma vez que estes estão sujeitos a sofrer mudanças com o tempo.

O alto custo associado à atualização das curvas cota-área-volume por meio de batimetria, sugere a sua estimativa através de sensoriamento remoto como alternativa rápida e barata de informação (ABILEAH *et al.* 2011). Partindo desse pressuposto, o presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo traçar novas curvas cota-área-volume para os reservatórios de Carpina, Goitá, Pirapama e Tapacurá utilizando técnicas de geoprocessamento através de modelos digitais de terreno e modelos digitais de elevação levantados por tecnologia LiDAR e avaliar a sua vazão regularizável.

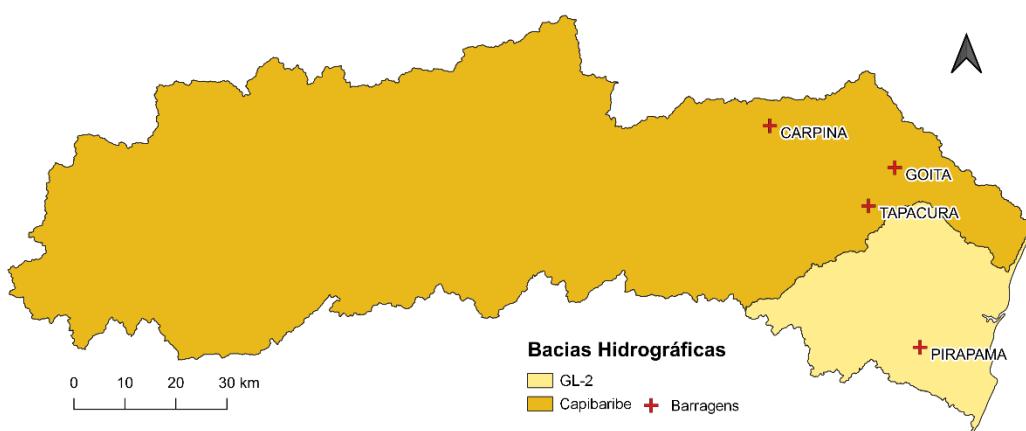
2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em realizar a caracterização volumétrica de reservatórios através de produtos de tecnologia LiDAR – Light Detection and Ranging. Em seguida, determinar a vazão regularizável de cada reservatório. Por fim comparar os resultados obtidos nesse estudo com os dados existentes.

2.1 Área de estudo

Os reservatórios analisados neste trabalho (Carpina, Goitá, Pirapama e Tapacurá) estão localizados nas bacias do rio Capibaribe e na bacia de rios litorâneos GL2. A bacia do rio Capibaribe possui área de 7.454,88 km² e abrange 42 municípios do estado de Pernambuco. A bacia GL2 com área de 1.264,94 km² encontra-se totalmente inserida no território pernambucano, onde incorpora 9 municípios. A Figura 1 apresenta a área de estudo, bem como, a posição dos reservatórios dentro de suas respectivas bacias.

Figura 1 - Reservatórios e suas bacias hidrográficas

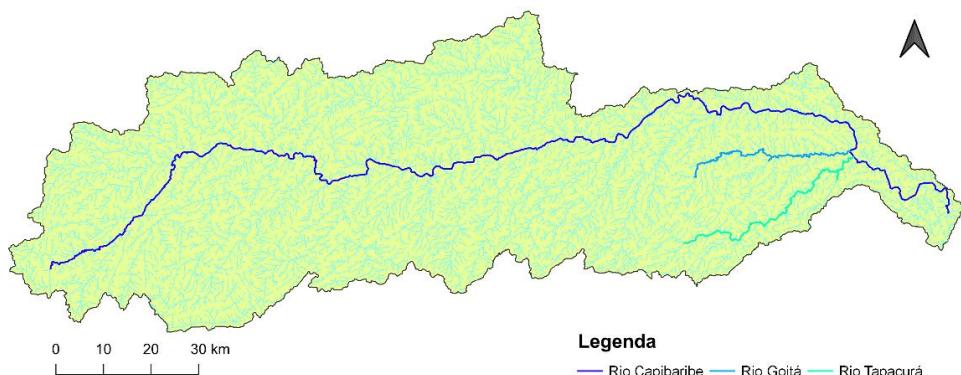


Fonte: Autor (2022)

2.1.1 Bacia do Capibaribe

A nascente do rio Capibaribe encontra-se na divisa dos municípios de Jataúba e Poção e o rio principal percorre cerca de 280 km, passando diversos centros urbanos ao longo de seu curso, até desaguar em sua foz na cidade do Recife. Em seus alto e médio curso o rio apresenta regime fluvial intermitente, mas torna-se perene a partir da cidade de Limoeiro. Dois de seus principais afluentes são o rio Goitá e o rio Tapacurá. A Figura 2 mostra a rede hidrográfica da bacia do Capibaribe e situa os rios Capibaribe, Goitá e Tapacurá.

Figura 2 - Rede hidrográfica da Bacia do Capibaribe

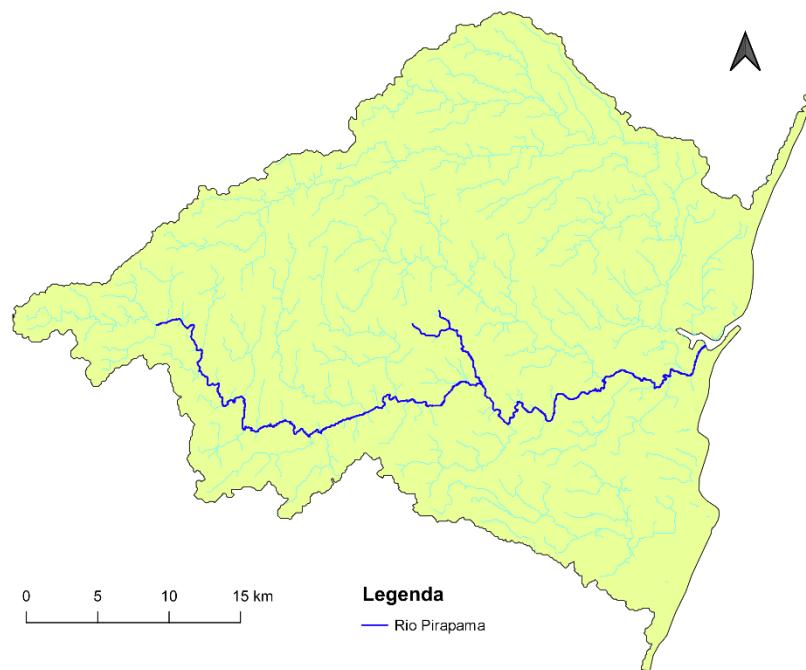


Fonte: Autor (2022)

2.1.2 Bacia de pequenos rios litorâneos GL2

A bacia de pequenos rios litorâneos GL2, localizada na Zona da Mata Sul do estado de Pernambuco, é composta por rios que desembocam no Oceano Atlântico. Os rios Jaboatão e Pirapama, além de seus afluentes, constituem boa parte da rede hidrográfica desta bacia. A extensão do rio Pirapama é de aproximadamente 71 km e a sua foz situa-se no estuário do rio Jaboatão. Na Figura 3 é possível identificar o rio Pirapama na rede hidrográfica da bacia GL2.

Figura 3 - Rede hidrográfica da Bacia GL2



Fonte: Autor (2022)

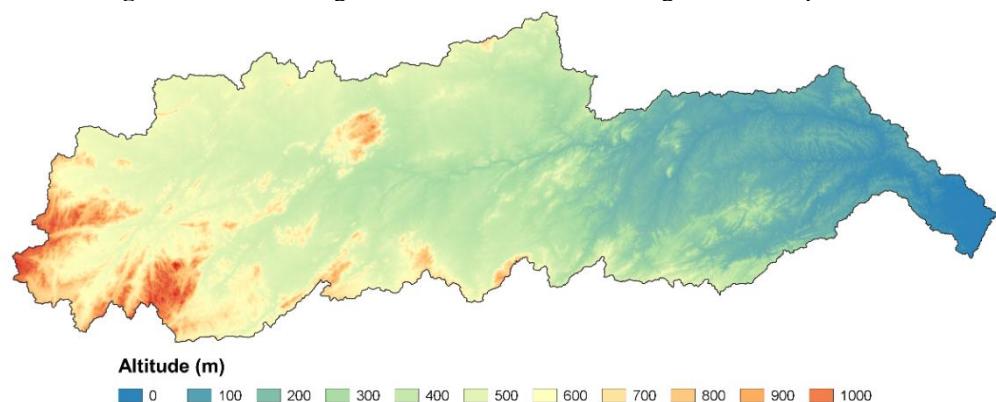
2.2 LiDAR

O Light Detection Ranging é uma tecnologia de sensoriamento remoto que emite pulsos laser de uma fonte e através do tempo de retorno dos pulsos determina a distância entre sensor e alvo. Ele é capaz de modelar a superfície de um terreno e gerar produtos como o Modelo Digital de Elevação e o Modelo Digital de Terreno. O LiDAR é usado em diversas áreas de estudo como o monitoramento costeiro, a modelagem hidráulica de inundações, a classificação da ocupação e o uso do solo (POLAT; UYSAL, 2015).

2.3 Projeto Pernambuco Tridimensional

O Pernambuco Tridimensional (PE3D) é um programa que realizou o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento laser do território do estado de Pernambuco. De acordo com Cirilo *et al.* (2014), objetivo do programa é fornecer uma base maior de apoio às ações de gestão territorial. Ao longo dos 98.149 km² do território pernambucano, foram gerados modelos digitais de elevação, modelos digitais de terreno e ortofotos na escala de 1:5000, além de ortofotos na escala de 1:1000 em 26 sedes municipais. A Figura 4 mostra o Modelo Digital do Terreno da bacia hidrográfica do Capibaribe, produto gerado pelo Pernambuco Tridimensional.

Figura 4 - Modelo Digital de Terreno da bacia hidrográfica do Capibaribe



Fonte: Pernambuco Tridimensional, adaptado pelo autor (2022)

2.4 Modelo Digital de Elevação e Modelo Digital de Terreno

Segundo Burrough (1986) o Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação digital da variação contínua do relevo. Ele considera a altimetria de tudo o que se encontra sobre o solo, ou seja, além da superfície ele inclui elementos como a vegetação, edificações ou qualquer outro objeto. O Modelo Digital do Terreno é definido por Liporaci *et al.* (2003) como uma representação matemática da realidade. Ele desconsidera as altitudes referentes a objetos acima do nível do solo e dessa forma suas coordenadas e cotas são mais fiéis a superfície do terreno.

2.5 Identificação dos reservatórios

De posse de uma ortofoto e um MDT das bacias hidrográficas, a identificação dos reservatórios foi realizada através do conhecimento das coordenadas e características geográficas que estes apresentavam. Com o auxílio do software livre de manipulação de informações e dados geográficos, QGIS 3.10.12, as coordenadas das barragens foram localizadas e sobrepostas ao MDT e a ortofoto da região, a fim de facilitar a visualização do barramento dos reservatórios. A Figura 5 mostra o MDT do eixo da barragem de Carpina.

Figura 5 - Barragem de Carpina

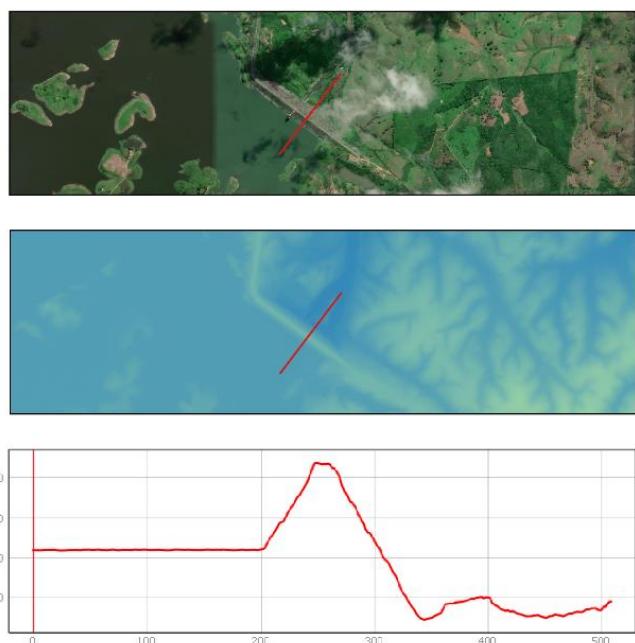


Fonte: Pernambuco Tridimensional, adaptado pelo autor (2022)

2.6 Definição da cota de coroamento e do vertedouro dos reservatórios

A ficha técnica da barragem contém as informações de cota de coroamento e cota do vertedouro. No entanto, como o objetivo do estudo é verificar a consistência dessas informações, os valores das cotas foram definidos através do MDE, produto do Pernambuco Tridimensional. Após localizar o eixo da barragem e identificar o vertedouro, por meio de uma ortofoto, com o auxílio do plugin profile tool, do software QGIS, é possível traçar o perfil da superfície de um traçado que corte o barramento e, dessa forma, extrair as cotas de coroamento e do vertedouro. Nesse processo, o erro de precisão vertical é da ordem de 25 cm e de precisão espacial da ordem de 1 m, portanto, adotou-se a tolerância de 1 m entre as cotas geradas e as disponibilizadas nas fichas técnicas da APAC. A Figura 6 ilustra o perfil de elevação de um corte realizado no eixo da barragem de Carpina.

Figura 6 - Ortofoto e MDE da barragem de Carpina com detalhe na locação do corte e seu perfil de elevação



Fonte: Pernambuco Tridimensional, adaptado pelo autor (2022)

2.6.1 Cota de coroamento e do vertedouro da barragem de Carpina

A ficha técnica do reservatório de Carpina informa que a cota de coroamento e a cota do vertedouro do reservatório são, respectivamente, 124 m e 118 m. Em análise realizada através do MDE da bacia hidrográfica da barragem, o valor encontrado para a cota de coroamento do reservatório foi de 123,6 m. Considerando que a diferença entre o valor levantado e o valor presente na ficha técnica é inferior a 1 m, optou-se por considerar os valores indicados pela ficha.

2.6.2 Cota de coroamento e do vertedouro da barragem do Goitá

A ficha técnica do reservatório de Goitá informa que a cota de coroamento e a cota do vertedouro do reservatório são, respectivamente, 78 m e 70 m. Em análise realizada através do MDE da bacia hidrográfica da barragem, o valor encontrado para a cota de coroamento do

reservatório foi de 78 m. A concordância entre os valores extraídos do MDE e os valores presentes na ficha técnica, demonstram a coerência dos dados presentes nesta.

2.6.3 Cota de coroamento e do vertedouro da barragem do Pirapama

A ficha técnica do reservatório de Pirapama informa que a cota de coroamento e a cota do vertedouro do reservatório são, respectivamente, 53 m e 45,7 m. Em análise realizada através do MDE da bacia hidrográfica da barragem, o valor encontrado para a cota de coroamento do reservatório foi de 52,8 m. A pequena variação entre os valores extraídos do MDE e os valores presentes na ficha técnica, demonstram a coerência dos dados presentes nesta.

2.6.4 Cota de coroamento e do vertedouro da barragem do Tapacurá

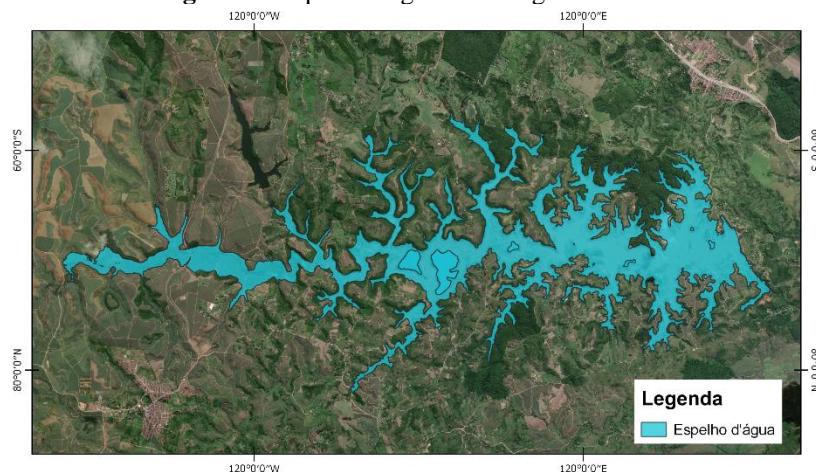
A ficha técnica do reservatório de Tapacurá informa que a cota de coroamento e a cota do vertedouro do reservatório são, respectivamente, 110 m e 103 m. Em análise realizada através do MDE da bacia hidrográfica da barragem, o valor encontrado para a cota de coroamento do reservatório foi de 110,7 m. Considerando que a diferença entre o valor levantado e o valor presente na ficha técnica é inferior a 1 m, optou-se por considerar os valores indicados pela ficha.

2.7 Definição da Cota x Área x Volume dos reservatórios

O objetivo das curvas Cota x Área x Volume é informar o volume disponível de acordo com a cota da superfície de água no reservatório. Em seu traçado é necessário ter o conhecimento das cotas do reservatório, das respectivas áreas de superfície e do volume acumulado a cada nível. Para obtenção desses dados, foram utilizados o MDT da região, o software QGIS e o software MS Excel.

Em primeira mão, para definição da bacia hidráulica e do espelho d'água do reservatório, realizou-se o tratamento do MDT, com a ferramenta de processamento r.fill.dir, do QGIS, que preenche regiões sem dados planimétricos. Em seguida, utilizou-se a ferramenta r.watershed, que gera, entre outros, as direções de drenagem. A posteriori, com as direções de drenagem e a posição do eixo da barragem, recorreu-se a ferramenta r.water.outlet para gerar bacia a montante do reservatório. Por fim, a bacia foi vetorizada em forma de polígono e utilizada para realizar um recorte no MDT. Com o MDT recortado, aplicou-se a ferramenta de extração de contorno do QGIS para gerar a curva de nível na cota do coroamento e, a partir dela, criou-se um polígono no formato do espelho d'água da barragem. A Figura 7 mostra o espelho d'água da barragem do Goitá.

Figura 7 - Espelho d'água da barragem do Goitá



Fonte: Autor (2022)

Após obter o espelho d'água da barragem, as cotas e suas respectivas áreas são definidas a partir da ferramenta de curvas hipsométricas do QGIS, que tem como entrada um MDT e uma camada limite. Nesse procedimento, configurou-se a ferramenta para gerar curvas a cada 1 metro, tendo como entrada o MDT da bacia e como camada limite o espelho d'água do reservatório. As cotas e áreas geradas foram dispostas em Tabelas que podem ser abertas e tratadas no software MS Excel.

No momento em que os pontos cotados e georreferenciados eram obtidos por meio do sensor LiDAR, no programa Pernambuco Tridimensional, os reservatórios analisados nesse estudo estavam parcialmente cheios e os sensores, registre-se aqui, não possuem precisão em medições subaquáticas. Portanto, para estimar o volume em cada cota do reservatório é necessário definir uma constante que corresponda ao volume coberto por água na barragem durante o sensoriamento. Quando as cotas de coroamento e do vertedouro existentes na ficha técnica da APAC são compatíveis com as cotas obtidas pelo MDT, o valor da constante é registrado como o da ficha técnica. Entenda-se, portanto, que a avaliação será feita tão somente a partir dessa cota.

Uma vez que a constante de volume subaquático é determinada, os demais volumes são obtidos, considerando que o reservatório cresce de forma trapezoidal, ou seja, o volume da cota anterior é somado ao volume do sólido formado entre a superfície da cota atual com a superfície da cota imediatamente inferior. A equação 1 apresenta esse procedimento.

$$Volume_{Cota_n} = Volume_{Cota_{n-1}} + \frac{\text{Área}_{Cota_{n-1}} + \text{Área}_{Cota_n}}{2} * \Delta H \quad (1)$$

onde,

$Volume_{Cota_n}$ = Volume acumulado na cota “n”;

$Volume_{Cota_{n-1}}$ = Volume acumulado na cota “n-1”;

Área_{Cota_n} = Área da superfície da cota “n”;

$\text{Área}_{Cota_{n-1}}$ = Área da superfície da cota “n-1”;

ΔH = Diferença de cotas.

Com os valores de cota, área e volume, curvas cota x área e cota x volume foram geradas através do software MS Excel.

2.8 Determinação da vazão regularizável

Para determinação da vazão regularizável é necessário realizar a simulação de operação do reservatório para um período de dados hidrológicos avaliados na região a montante da barragem. Nesse procedimento, calcula-se o volume de água no reservatório, o volume de água afluente, o volume de água precipitado, o volume de água evaporado e o volume de água retirado do reservatório. O objetivo do balanço é definir a quantidade de água que pode ser retirada sem que haja prejuízos a operação do reservatório. A equação 2 ilustra esse cálculo.

$$V_i = V_{i-1} + VA_i + VP_i - VE_i - VQ_i \quad (2)$$

onde,

V_i = Volume de água armazenado no reservatório no período "i";

V_{i-1} = Volume de água armazenado no reservatório no período "i - 1";

VA_i = Volume de água afluente ao reservatório no período "i";

VP_i = Volume de água precipitado no reservatório no período "i";

VE_i = Volume de água evaporado do reservatório no período "i";

V_i = Volume de água retirado do reservatório no período "i";

Através do modelo CAROS (Campus Agreste Reservoir Operation Model), uma planilha eletrônica, desenvolvida na Universidade Federal de Pernambuco, no Campus Acadêmico do Agreste, que utiliza o princípio descrito acima para realizar a simulação de operação do reservatório e recebe como entrada as cotas de coroamento e do vertedouro do reservatório, os dados de chuva, os dados vazão e os dados de evaporação, determinou-se a vazão regularizável. Os dados de chuva foram coletados de postos próximos aos reservatórios e os dados de vazão foram coletados em postos fluviométricos situados no mesmo rio barrado pela barragem, no entanto, alguns dos postos não coincidiam com a posição do reservatório, nesses casos considerou-se as vazões proporcionais às respectivas áreas, admitindo-se, portanto, a hipótese de vazão específica constante. No caso dos dados de evaporação, foi escolhido a estação situada no Recife devido à proximidade com os reservatórios e a similaridade de clima das regiões em estudo. As novas relações Cota x Área x Volume foram utilizadas para definir os volumes a cada momento ao longo do período de dados. Considerou-se um modelo no qual a vazão regularizável varia de acordo com a quantidade de água presente no reservatório.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Novas curvas Cota x Área x Volume foram traçadas para as barragens de Carpina, Goitá, Pirapama e Tapacurá. Suas capacidades de acumulação de água foram reavaliadas e a vazão regularizável de cada reservatório foi determinada.

3.1 Barragem de Carpina

O reservatório de Carpina, concluído no ano de 1978, localiza-se no município de Lagoa do Carro, na bacia hidrográfica do Capibaribe e tem como finalidade principal o controle de cheias na bacia. A Tabela 1 contém os dados coletados do MDE e os dados da ficha técnica da APAC.

Tabela 1 - Dados da ficha técnica e do MDE da barragem de Carpina

	Ficha técnica	MDE
Cota de coroamento (m)	124	123,6
Cota de vertedouro (m)	118	118

Fonte: Autor (2022)

O valor determinado para a constante de volume de água foi retirado da ficha técnica da APAC, uma vez que os dados referentes às cotas se encontravam coerentes com os dados extraídos do MDT. A curva de nível do espelho d'água, determinada pelo MDT, foi de 102 m. Na ficha técnica da APAC, o volume associado a essa cota é de 41.429.000 m³. A Tabela 2 apresenta os valores de cota, área e volume presentes na ficha técnica e os valores obtidos através do MDT até à cota de coroamento.

Tabela 2 - Curva Cota x Área x Volume da ficha técnica e do MDT da barragem de Carpina

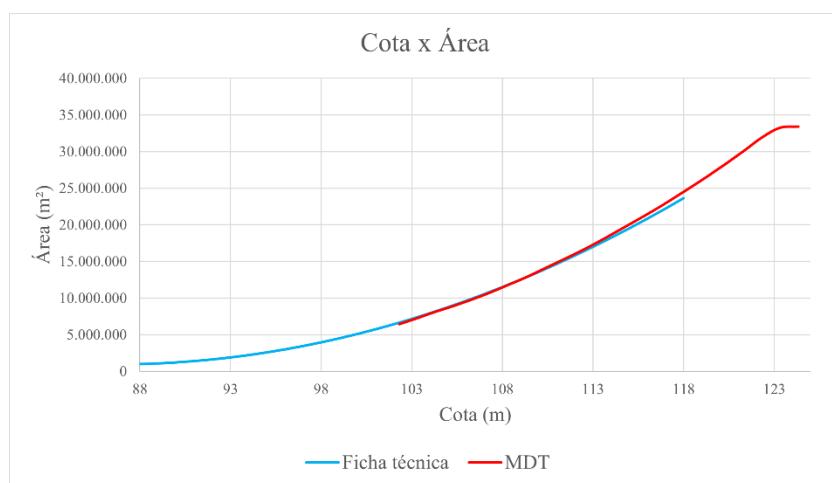
	Ficha técnica	MDT			
Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)	Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
88	994.639	714.000			
89	1.084.440	1.429.000			
90	1.220.060	1.786.000			
91	1.411.520	3.214.000			
92	1.628.800	4.285.000			
93	1.901.920	5.857.000			
94	2.220.860	8.571.000			
95	2.585.630	10.714.000			
96	2.996.230	13.571.000			
97	3.452.660	17.143.000			
98	3.954.910	20.714.000			
99	4.503.000	24.999.000			
100	5.096.910	28.929.000			
101	5.736.650	34.990.000			
102	6.422.220	41.429.000	102	6.461.278	41.429.000
103	7.153.620	50.000.000	103	7.281.523	48.300.401
104	7.930.850	56.429.000	104	8.155.224	56.018.774
105	8.753.900	64.999.000	105	8.943.873	64.568.323

106	9.622.790	73.571.000	106	9.816.880	73.948.699
107	10.537.500	82.500.000	107	10.763.325	84.238.802
108	11.498.000	94.286.000	108	11.808.712	95.524.820
109	12.504.400	106.429.000	109	12.865.486	107.861.919
110	13.556.600	119.286.000	110	14.050.918	121.320.121
111	14.654.600	134.286.000	111	15.233.082	135.962.121
112	15.798.500	148.571.000	112	16.431.245	151.794.285
113	16.988.200	164.429.000	113	17.728.692	168.874.253
114	18.226.700	181.429.000	114	19.118.549	187.297.874
115	19.505.000	200.000.000	115	20.516.077	207.115.187
116	20.832.200	220.000.000	116	21.937.193	228.341.822
117	22.205.200	241.571.000	117	23.455.343	251.038.090
118	23.624.000	270.000.000	118	25.032.492	275.282.007
			119	26.651.121	301.123.814
			120	28.345.319	328.622.034
			121	30.111.133	357.850.260
			122	31.952.270	388.881.961
			123	33.273.850	421.495.021
			124	33.426.753	454.845.323

Fonte: Autor (2022)

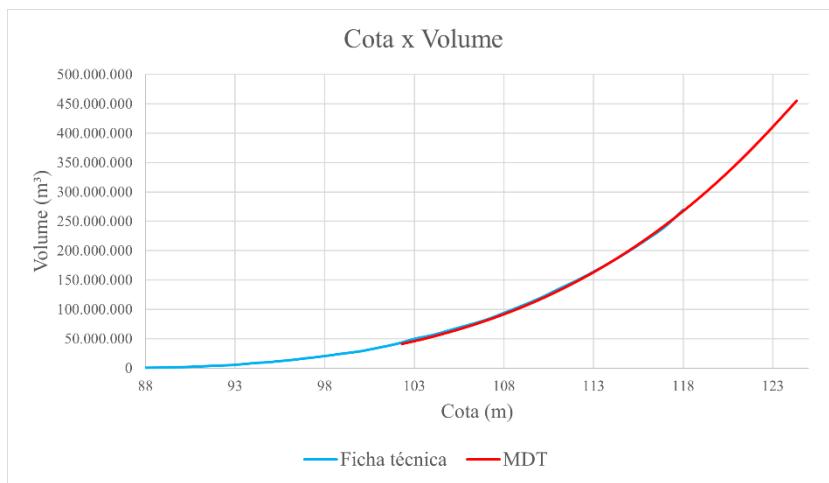
As Figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, as curvas Cota x Área e Cota x Volume da barragem de Carpina.

Figura 8 - Curva Cota x Área da barragem de Carpina



Fonte: Autor (2022)

Figura 9 - Curva Cota x Volume da barragem de Carpina



Fonte: Autor (2022)

Após realizar a junção dos dados extraídos do MDT, com os dados existentes na ficha técnica da APAC, os dados atualizados de cota, área e volume do reservatório de Carpina são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Curva Cota x Área x Volume atualizada da barragem de Carpina

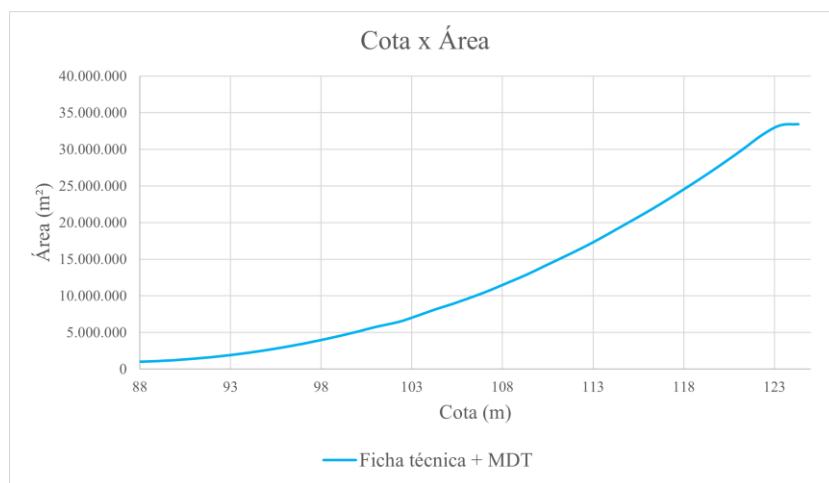
Cota de coroamento (m)	124	
Cota de vertedouro (m)	118	
Capacidade máxima (m³)	275.282.007	
<hr/>		
Cota (m)	Área (m)	Volume (m)
88	994.639	714.000
89	1.084.440	1.429.000
90	1.220.060	1.786.000
91	1.411.520	3.214.000
92	1.628.800	4.285.000
93	1.901.920	5.857.000
94	2.220.860	8.571.000
95	2.585.630	10.714.000
96	2.996.230	13.571.000
97	3.452.660	17.143.000
98	3.954.910	20.714.000
99	4.503.000	24.999.000
100	5.096.910	28.929.000
101	5.736.650	34.990.000
102	6.461.278	41.429.000
103	7.281.523	48.300.401
104	8.155.224	56.018.774

105	8.943.873	64.568.323
106	9.816.880	73.948.699
107	10.763.325	84.238.802
108	11.808.712	95.524.820
109	12.865.486	107.861.919
110	14.050.918	121.320.121
111	15.233.082	135.962.121
112	16.431.245	151.794.285
113	17.728.692	168.874.253
114	19.118.549	187.297.874
115	20.516.077	207.115.187
116	21.937.193	228.341.822
117	23.455.343	251.038.090
118	25.032.492	275.282.007
119	26.651.121	301.123.814
120	28.345.319	328.622.034
121	30.111.133	357.850.260
122	31.952.270	388.881.961
123	33.273.850	421.495.021
124	33.426.753	454.845.323

Fonte: Autor (2022)

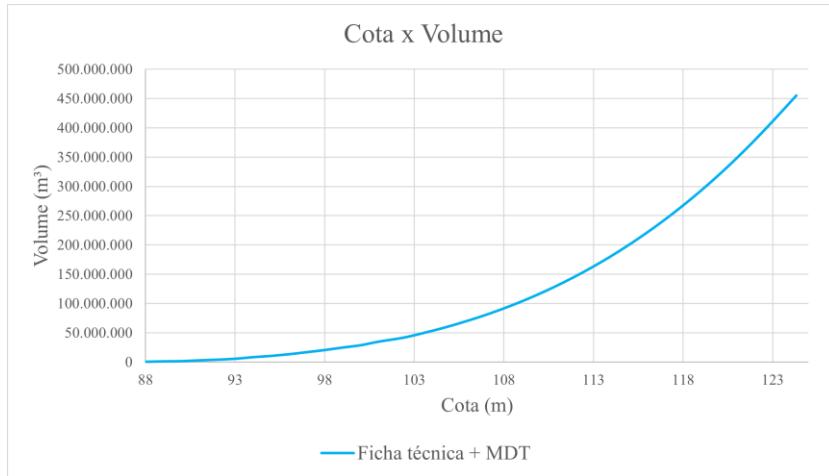
As novas curvas Cota x Área e Cota x Volume são apresentadas nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 10 - Curva Cota x Área atualizada da barragem de Carpina



Fonte: Autor (2022)

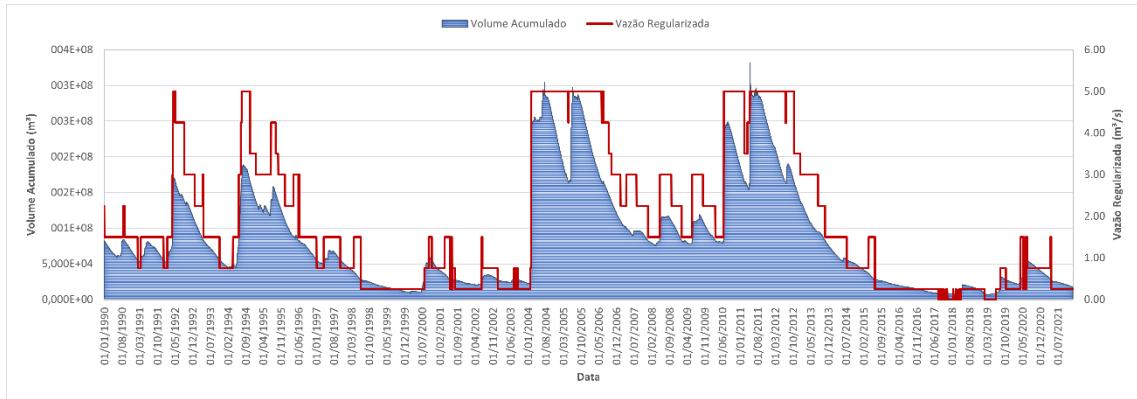
Figura 11 - Curva Cota x Volume atualizada da barragem de Carpina



Fonte: Autor (2022)

Levando em consideração os dados de chuva do posto pluviométrico 735100, os dados de vazão do posto fluviométrico 39145000 e os dos de evaporação da estação situada no Recife, em um período compreendido entre 01/01/1990 e 31/12/2021, a vazão regularizável média foi de $1,87 \text{ m}^3/\text{s}$. A figura 12 mostra o gráfico de operação do reservatório.

Figura 12 - Operação do reservatório de Carpina



Fonte: Autor (2022)

3.2 Barragem do Goitá

O reservatório de Goitá, construído no ano de 1978 no rio Goitá, localiza-se nos municípios de Glória de Goitá e Paudalho. Seu objetivo principal hoje é o de regularização da vazão, embora tenha sido concebido, assim como o de Tapacurá e Carpina, para o controle de cheias na bacia. A Tabela 4 contém os dados coletados do MDE e os dados da ficha técnica da APAC.

Tabela 4 - Dados da ficha técnica e do MDE da barragem do Goitá

Ficha técnica	MDE
Cota de coroamento (m)	78
Cota de vertedouro (m)	70

Fonte: Autor (2022)

O valor determinado para a constante de volume de água foi retirado da ficha técnica da APAC, uma vez que os dados referentes às cotas se encontravam coerentes com os dados extraídos do MDT. A curva de nível do espelho d'água, determinada pelo MDT, foi de 62 m. Na ficha técnica da APAC, o volume associado a essa cota é de 16.153.092 m³. A Tabela 5 apresenta os valores de cota, área e volume presentes na ficha técnica e os valores obtidos através do MDT, até à cota de coroamento.

Tabela 5 - Curva Cota x Área x Volume da ficha técnica e do MDT da barragem do Goitá

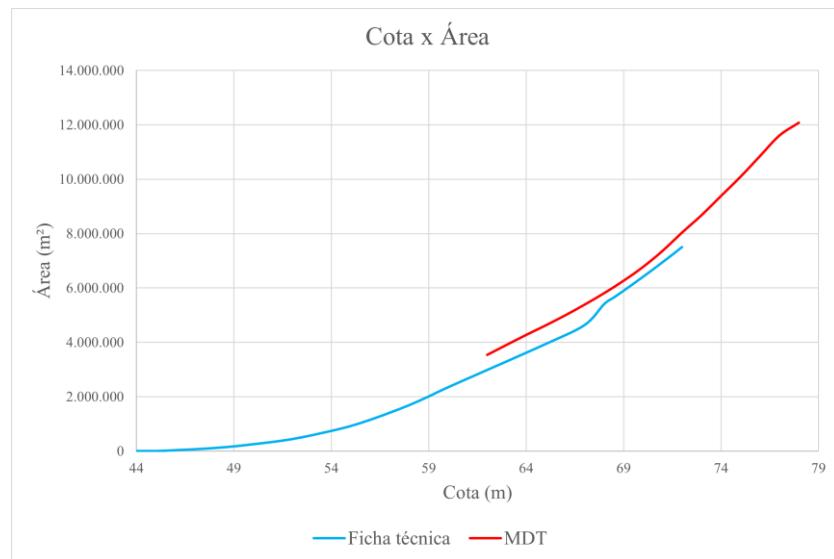
Ficha técnica			MDT		
Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
44	0	0			
45	1	1			
46	30.000	15.000			
47	65.000	62.500			
48	110.000	150.000			
49	170.000	290.000			
50	250.000	500.000			
51	335.000	792.500			
52	440.000	1.180.000			
53	580.000	1.690.000			
54	740.000	2.350.000			
55	920.000	3.180.000			
56	1.150.000	4.215.000			
57	1.410.000	5.495.000			
58	1.690.000	7.045.000			
59	2.010.000	8.895.000			
60	2.350.000	11.075.000	62	3.535.196	16.153.092
65	3.940.000	26.800.000	63	3.904.932	19.873.156

67	4.640.000	35.380.000	64	4.268.638	23.959.941
68	5.410.050	40.711.900	65	4.619.037	28.403.779
68,5	5.653.810	43.477.600	66	4.987.521	33.207.058
69	5.902.960	46.366.600	67	5.383.032	38.392.334
69,92	6.375.520	52.013.300	68	5.802.364	43.985.032
70,5	6.682.820	55.799.800	69	6.260.214	50.016.321
71	6.953.570	59.208.700	70	6.769.063	56.530.960
71,5	7.229.710	62.754.300	71	7.358.357	63.594.670
72	7.511.250	66.439.300	72	8.031.088	71.289.392
			73	8.670.692	79.640.282
			74	9.376.764	88.664.010
			75	10.082.610	98.393.697
			76	10.842.500	108.856.252
			77	11.601.321	120.078.163
			78	12.073.729	131.915.688

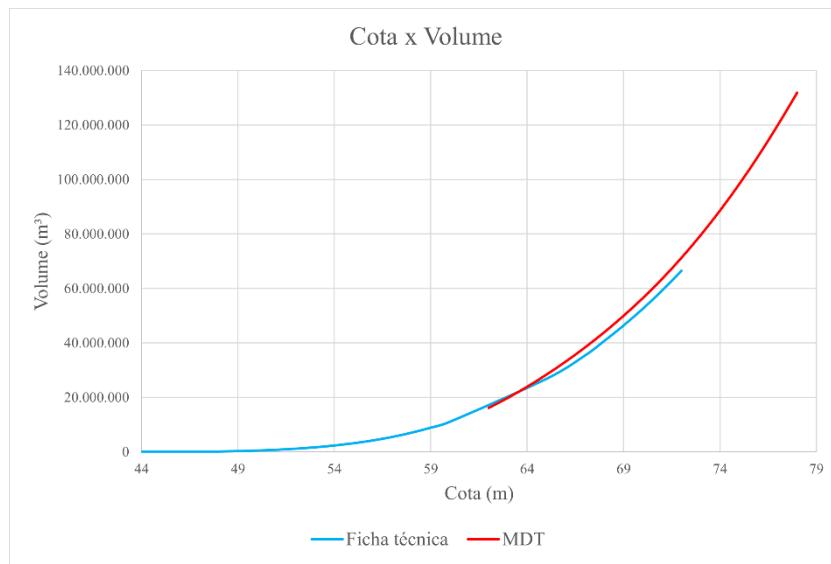
Fonte: Autor (2022)

As Figuras 13 e 14, mostram, respectivamente, as curvas Cota x Área e Cota x Volume da barragem do Goitá.

Figura 13 - Curva Cota x Área da barragem do Goitá



Fonte: Autor (2022)

Figura 14 - Curva Cota x Volume da barragem do Goitá

Fonte: Autor (2022)

Após realizar a junção dos dados extraídos do MDT, com os dados existentes na ficha técnica da APAC, os dados atualizados de cota, área e volume do reservatório do Goitá são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Curva Cota x Área x Volume atualizada da barragem do Goitá

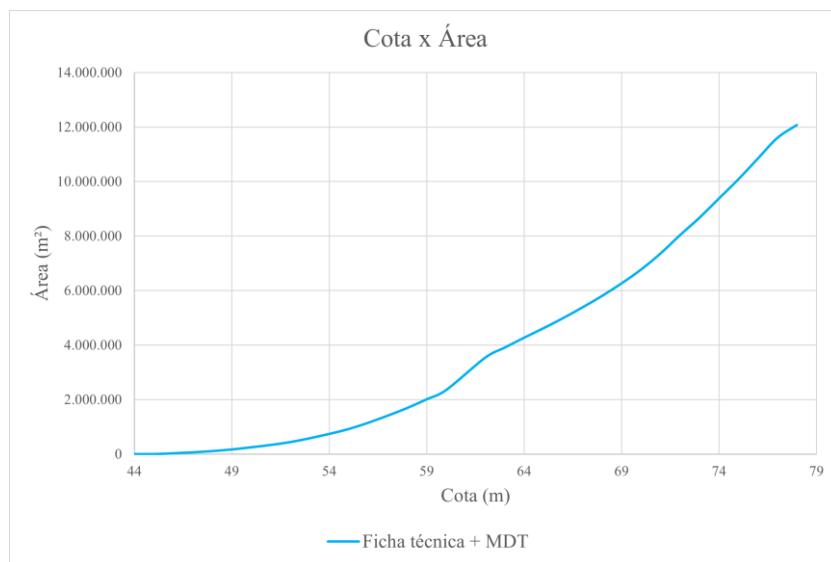
Cota de coroamento (m)	78	
Cota de vertedouro (m)	70	
Capacidade máxima (m³)	56.530.960	
Cota (m)	Área (m)	Volume (m)
44	0	0
45	1	1
46	30.000	15.000
47	65.000	62.500
48	110.000	150.000
49	170.000	290.000
50	250.000	500.000
51	335.000	792.500
52	440.000	1.180.000
53	580.000	1.690.000
54	740.000	2.350.000
55	920.000	3.180.000
56	1.150.000	4.215.000
57	1.410.000	5.495.000
58	1.690.000	7.045.000
59	2.010.000	8.895.000

60	2.350.000	11.075.000
62	3.535.196	16.153.092
63	3.904.932	19.873.156
64	4.268.638	23.959.941
65	4.619.037	28.403.779
66	4.987.521	33.207.058
67	5.383.032	38.392.334
68	5.802.364	43.985.032
69	6.260.214	50.016.321
70	6.769.063	56.530.960
71	7.358.357	63.594.670
72	8.031.088	71.289.392
73	8.670.692	79.640.282
74	9.376.764	88.664.010
75	10.082.610	98.393.697
76	10.842.500	108.856.252
77	11.601.321	120.078.163
78	12.073.729	131.915.688

Fonte: Autor (2022)

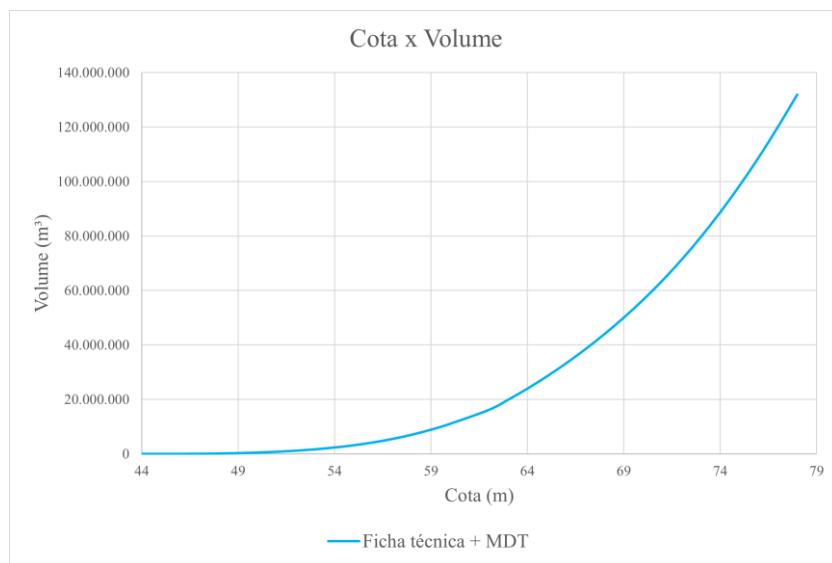
As novas curvas, Cota x Área e Cota x Volume são apresentadas nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

Figura 15 - Curva Cota x Área atualizada da barragem do Goitá



Fonte: Autor (2022)

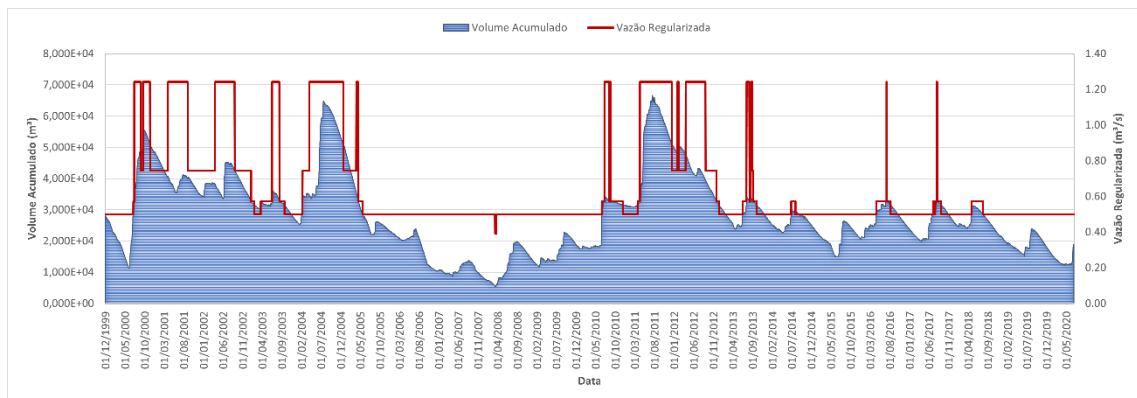
Figura 16 - Curva Cota x Volume atualizada da barragem do Goitá



Fonte: Autor (2022)

Levando em consideração os dados de chuva do posto pluviométrico 835136, os dados de vazão do posto fluviométrico 39154000 e os dos de evaporação da estação situada no Recife, em um período compreendido entre 01/12/1999 e 30/06/2020, a vazão regularizável média foi de $0,66 \text{ m}^3/\text{s}$. A figura 17 mostra o gráfico de operação do reservatório.

Figura 7 - Operação do reservatório do Goitá



Fonte: Autor (2022)

3.3 Barragem do Pirapama

O reservatório de Pirapama, construído no ano de 2001 no rio de mesmo nome, localiza-se no município de Cabo de Santo Agostinho. Seu objetivo principal é o abastecimento humano. A Tabela 7 contém os dados coletados do MDE e os dados da ficha técnica da APAC.

Tabela 7 - Dados da ficha técnica e do MDE da barragem do Pirapama

	Ficha técnica	MDE
Cota de coroamento (m)	53	52,8
Cota de vertedouro (m)	45,7	46

Fonte: Autor (2022)

O valor determinado para a constante de volume de água foi retirado da ficha técnica da APAC, uma vez que os dados referentes as cotas, encontravam-se coerentes com os dados extraídos do MDT. A curva de nível do espelho d'água, determinada pelo MDT, foi de 46 m. Na ficha técnica da APAC, o volume associado a essa cota é de 62.980.000 m³. A Tabela 8, apresenta os valores de cota, área e volume presentes na ficha técnica e os valores obtidos através do MDT, até a cota de coroamento.

Tabela 8 - Curva Cota x Área x Volume do MDT e da ficha técnica da barragem do Pirapama

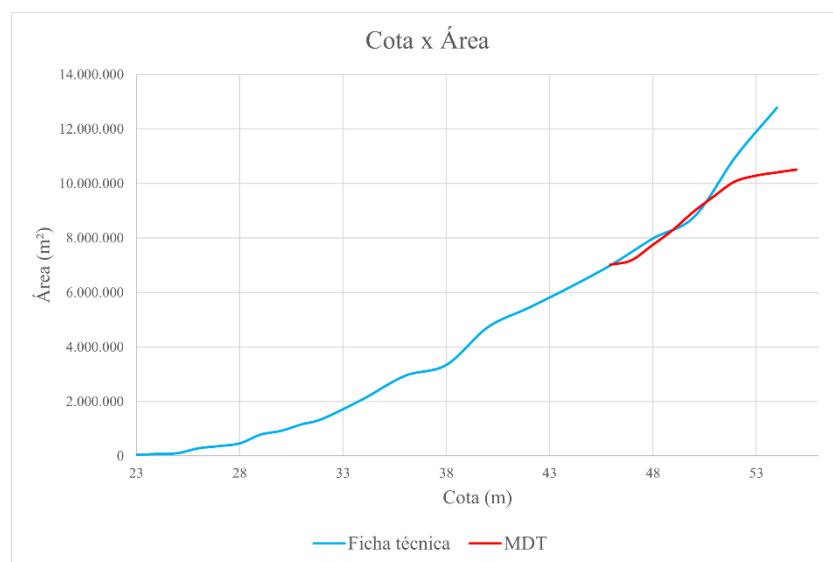
Ficha técnica			MDT		
Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)	Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
23	40.000	40.000			
24	70.000	90.000			
25	100.000	180.000			
26	280.000	370.000			
27	360.000	690.000			
28	460.000	1.100.000			
29	780.000	1.720.000			
30	920.000	2.570.000			
31	1.160.000	3.610.000			
32	1.360.000	4.870.000			
34	2.100.000	8.400.000			
36	2.940.000	13.620.000			
38	3.340.000	19.900.000			
40	4.720.000	27.850.000			
42	5.440.000	38.130.000			
44	6.200.000	49.770.000			
46	7.020.000	62.980.000	46	7.020.000	62.980.000
48	7.980.000	77.900.000	47	7.172.925	70.076.463

50	8.780.000	94.700.000	48	7.715.750	77.520.800
52	10.980.000	114.400.000	49	8.274.950	85.516.150
52	10.980.000	114.400.000	50	8.945.225	94.126.238
			51	9.517.275	103.357.488
			52	10.055.650	113.143.950
			53	10.273.675	123.308.613
			54	10.393.775	133.642.338
			55	10.501.600	144.090.025

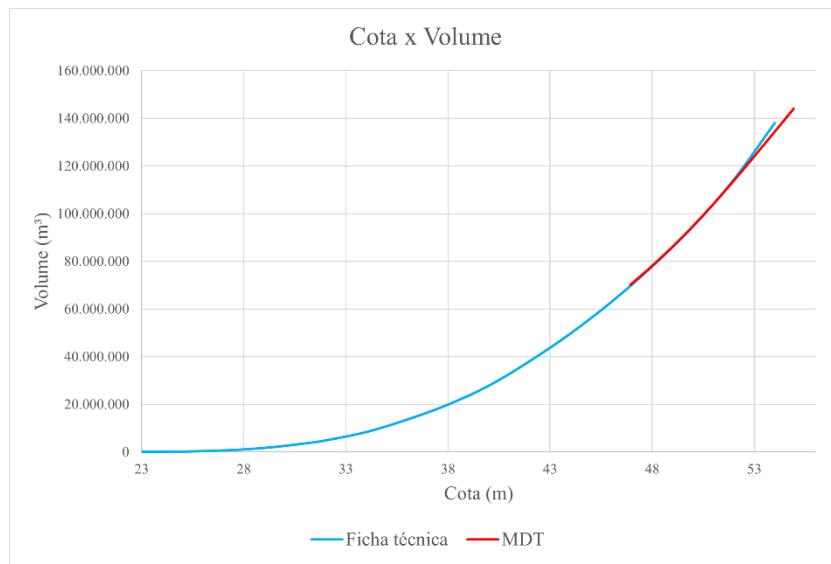
Fonte: Autor (2022)

As Figuras 18 e 19, mostram, respectivamente, as curvas Cota x Área e Cota x Volume da barragem do Pirapama.

Figura 18 - Curva Cota x Área do reservatório de Pirapama



Fonte: Autor (2022)

Figura 19 - Curva Cota x Volume do reservatório de Pirapama

Fonte: Autor (2022)

Após realizar a junção dos dados extraídos do MDT, com os dados existentes na ficha técnica da APAC, os dados atualizados de cota, área e volume do reservatório de Pirapama são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Curva Cota x Área x Volume atualizada da barragem de Pirapama

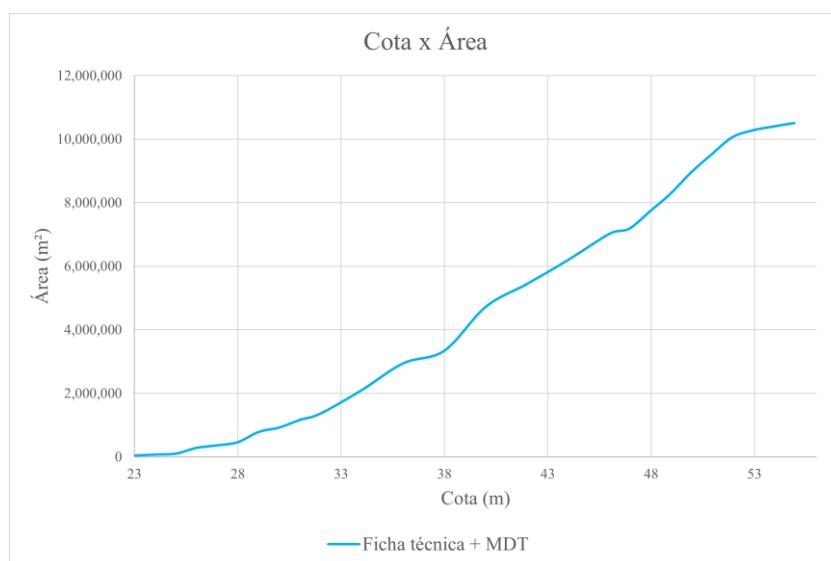
Cota de coroamento (m)	53	
Cota de vertedouro (m)	46	
Capacidade máxima (m³)	62.980.000	
Cota (m)	Área (m)	Volume (m)
23	40.000	40.000
24	70.000	90.000
25	100.000	180.000
26	280.000	370.000
27	360.000	690.000
28	460.000	1.100.000
29	780.000	1.720.000
30	920.000	2.570.000
31	1.160.000	3.610.000
32	1.360.000	4.870.000
34	2.100.000	8.400.000
36	2.940.000	13.620.000
38	3.340.000	19.900.000
40	4.720.000	27.850.000
42	5.440.000	38.130.000
44	6.200.000	49.770.000

46	7.020.000	62.980.000
47	7.172.925	70.076.463
48	7.715.750	77.520.800
49	8.274.950	85.516.150
50	8.945.225	94.126.238
51	9.517.275	103.357.488
52	10.055.650	113.143.950
53	10.273.675	123.308.613
54	10.393.775	133.642.338
55	10.501.600	144.090.025

Fonte: Autor (2022)

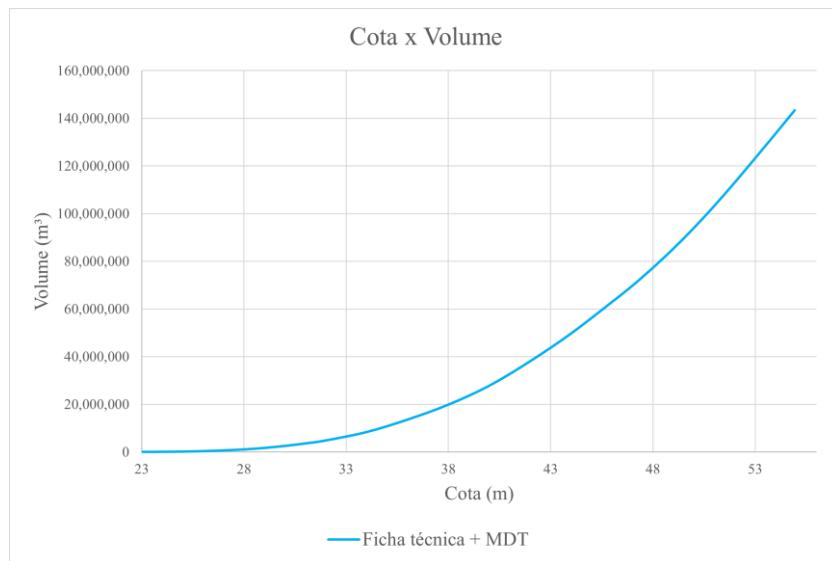
As novas curvas, Cota x Área e Cota x Volume, são apresentadas nas Figuras 20 e 21, respectivamente.

Figura 21 - Curva Cota x Área atualizada da barragem de Pirapama



Fonte: Autor (2022)

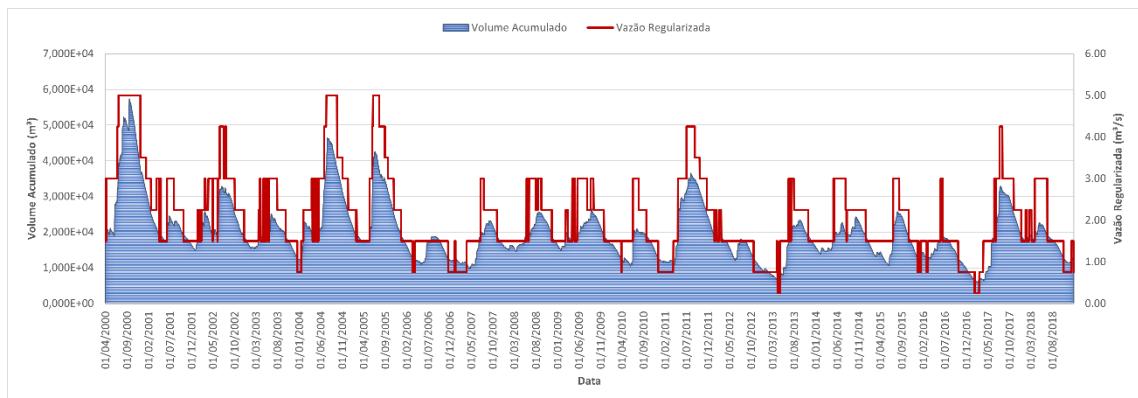
Figura 22 - Curva Cota x Volume atualizada da barragem de Pirapama



Fonte: Autor (2022)

Levando em consideração os dados de chuva do posto pluviométrico 835138, os dados de vazão do posto fluviométrico 39192000 e os dos de evaporação da estação situada no Recife, em um período compreendido entre 01/04/2000 e 31/12/2018, a vazão regularizável média foi de $2,10 \text{ m}^3/\text{s}$. A figura 23 mostra o gráfico de operação do reservatório.

Figura 23 - Operação do reservatório do Pirapama



Fonte: Autor (2022)

3.4 Barragem do Tapacurá

O reservatório de Tapacurá, construído no ano de 1978 no rio Tapacurá, localiza-se no município de São Lourenço da Mata. Seu objetivo principal, como já afirmado, é hoje o abastecimento humano, embora contribua para o controle de cheias. A Tabela 10 contém os dados coletados do MDE e os dados da ficha técnica da APAC.

Tabela 10 - Dados da ficha técnica e do MDE da barragem do Tapacurá

	Ficha técnica	MDE
Cota de coroamento (m)	110	110,7
Cota de vertedouro (m)	103	103

Fonte: Autor (2022)

O valor determinado para a constante, foi retirado da ficha técnica da APAC, uma vez que os dados referentes as cotas, encontravam-se coerentes com os dados extraídos do MDT. A curva de nível do espelho d'água, determinada pelo MDT, foi de 99 m. Na ficha técnica da APAC, o volume associado a essa cota é de 58.400.000 m³. A Tabela 11, apresenta os valores de cota, área e volume presentes na ficha técnica e os valores obtidos através do MDT, até a cota de coroamento.

Tabela 11 - Curva Cota x Área x Volume do MDT e da ficha técnica da barragem do Tapacurá

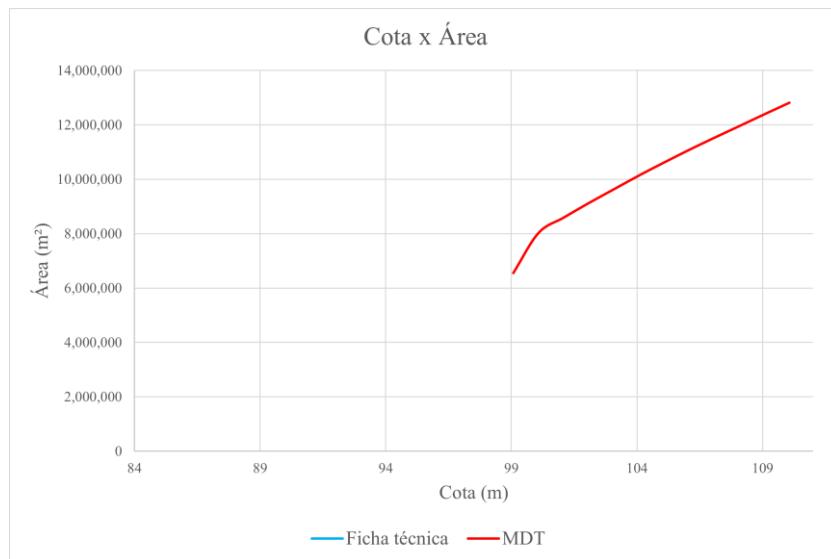
Ficha técnica			MDT		
Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)	Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
84	-	2.200.000			
85	-	3.400.000			
86	-	4.600.000			
87	-	6.200.000			
88	-	8.000.000			
89	-	10.200.000			
90	-	13.000.000			
91	-	16.000.000			
92	-	19.600.000			
93	-	23.600.000			
94	-	28.000.000			
95	-	33.400.000			
96	-	38.600.000			
97	-	45.000.000			
98	-	51.400.000			
99	-	58.400.000	99	6.556.844	58.400.000
100	-	66.400.000	100	8.026.355	65.691.600
101	-	76.000.000	101	8.591.820	74.000.687

102	-	85.200.000	102	9.127.121	82.860.158
103	-	93.600.000	103	9.633.353	92.240.395
104	-	102.600.000	104	10.140.504	102.127.323
105	-	112.600.000	105	10.618.500	112.506.825
106	-	124.133.000	106	11.083.646	123.357.898
107	-	137.905.000	107	11.527.089	134.663.266
			108	11.958.339	146.405.980
			109	12.393.977	158.582.138
			110	12.819.439	171.188.846

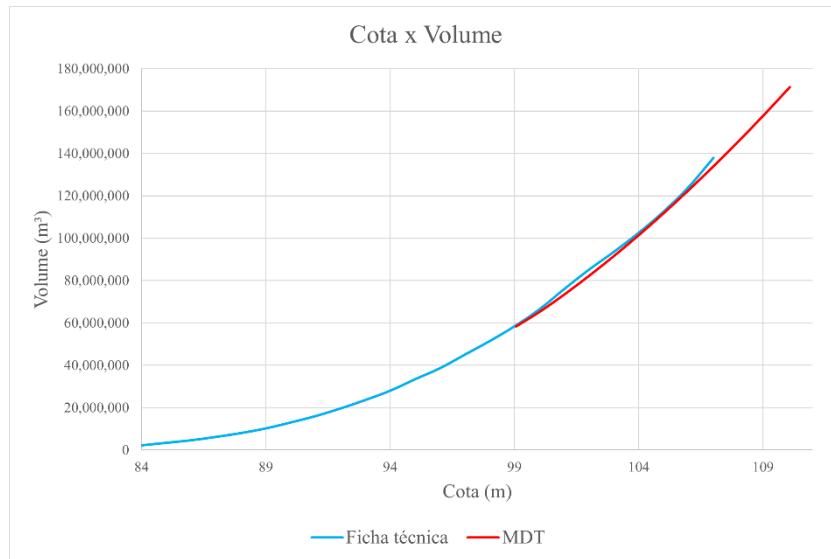
Fonte: Autor (2022)

As Figuras 24 e 25 mostram, respectivamente, as curvas Cota x Área e Cota x Volume da barragem do Tapacurá.

Figura 24 - Curva Cota x Área da barragem do Tapacurá



Fonte: Autor (2022)

Figura 25 - Curva Cota x Volume da barragem do Tapacurá

Fonte: Autor (2022)

Após realizar a junção dos dados extraídos do MDT, com os dados existentes na ficha técnica da APAC, os dados atualizados de cota, área e volume do reservatório de Tapacurá são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Curva Cota x Área x Volume atualizada da barragem do Tapacurá

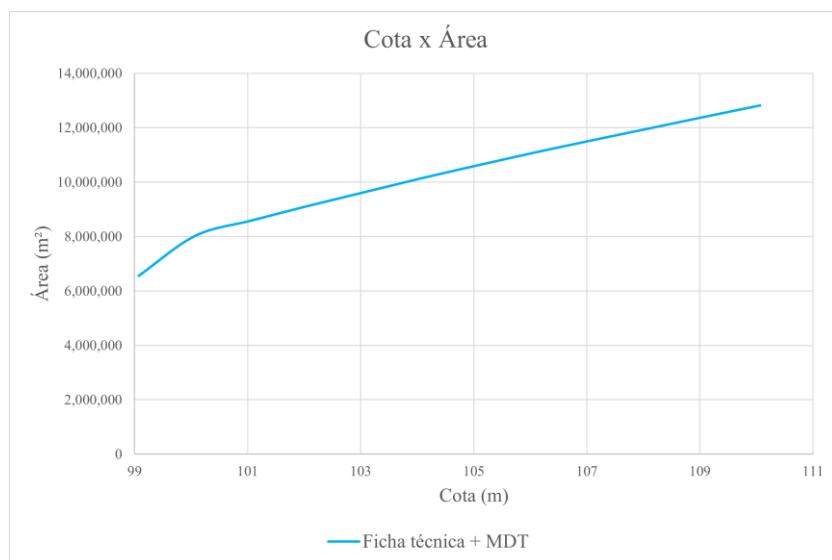
Cota de coroamento (m)	110
Cota de vertedouro (m)	103
Capacidade máxima (m³)	92.240.395
Cota (m)	Área (m)
84	2.200.000
85	3.400.000
86	4.600.000
87	6.200.000
88	8.000.000
89	10.200.000
90	13.000.000
91	16.000.000
92	19.600.000
93	23.600.000
94	28.000.000
95	33.400.000
96	38.600.000
97	45.000.000
98	51.400.000
99	6.556.844
	Volume (m)
	58.400.000

100	8.026.355	65.691.600
101	8.591.820	74.000.687
102	9.127.121	82.860.158
103	9.633.353	92.240.395
104	10.140.504	102.127.323
105	10.618.500	112.506.825
106	11.083.646	123.357.898
107	11.527.089	134.663.266
108	11.958.339	146.405.980
109	12.393.977	158.582.138
110	12.819.439	171.188.846

Fonte: Autor (2022)

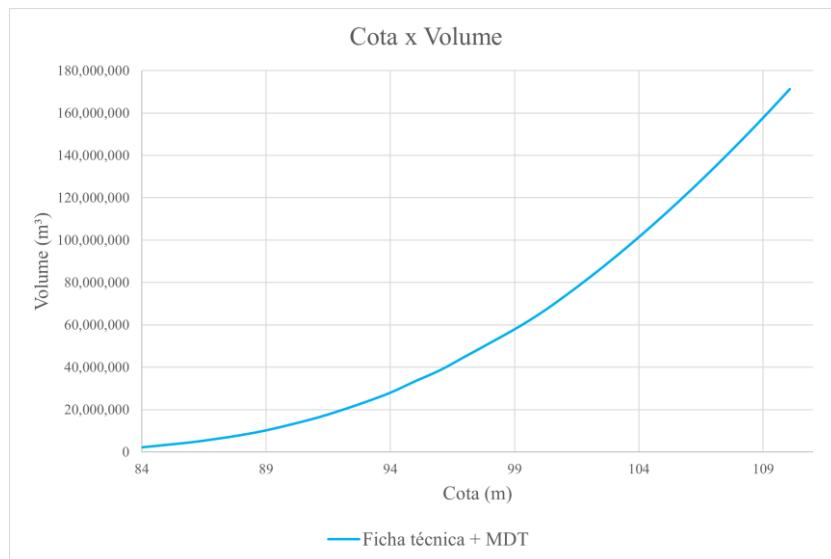
As novas curvas Cota x Área e Cota x Volume são apresentadas nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

Figura 26 - Curva Cota x Área atualizada da barragem do Tapacurá



Fonte: Autor (2022)

Figura 27 - Curva Cota x Volume atualizada da barragem do Tapacurá



Fonte: Autor (2022)

Levando em consideração os dados de chuva do posto pluviométrico 835068, os dados de vazão do posto fluviométrico 39170000 e os dos de evaporação da estação situada no Recife, em um período compreendido entre 01/01/1990 e 31/12/2021, a vazão regularizável média foi de $1,36 \text{ m}^3/\text{s}$. A figura 23 mostra o gráfico de operação do reservatório.

4 CONCLUSÕES

As ferramentas de geoprocessamento representam um avanço significativo, na obtenção de informações para tomada de decisões, uma vez que fornecem resultados satisfatórios, de forma mais rápida e simples em relação aos métodos convencionais. Através dos modelos digitais de terreno e elevação, foi possível realizar o estudo em quatro reservatórios e obter resultados coerentes com a realidade.

De acordo com as novas relações cota-área-volume, a barragem de Carpina possui capacidade máxima 1,96% maior que o valor existente em sua ficha técnica. Na barragem de Goitá, a capacidade máxima definida foi 7,6% maior que a capacidade determinada por sua ficha. No reservatório do rio Pirapama, a capacidade máxima calculada foi 3,35% maior que a capacidade máxima atual. O reservatório do rio Tapacurá foi o único reservatório calculado nesse estudo que apresentou capacidade máxima menor que a registrada, sendo 2,08% inferior a esta.

Levando em consideração que as relações calculadas no estudo, apresentaram pouca

variação e estavam em concordância com os valores conhecidos, pode-se verificar a consistência nos dados obtidos. Essa situação, porém, não se observa em muitas barragens do estado, cujas cotas não estão georreferenciadas adequadamente. Isso pode ser observado nas suas fichas técnicas. Nesses casos em especial o trabalho aqui desenvolvido permite corrigir essas distorções.

REFERÊNCIAS

- ABILEAH, H. R.; VIGNUDELLI, S.; SCOZZARI, A. A. A completely remote sensing approach to monitoring reservoirs water volume. **International Water Technology Journal**, v. 1, n.1 p. 59-72, 2011.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Oxford University Press, 1986.
- CIRILO, José Almir. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.
- CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A.; RODRIGUES, N. M.; FORTUNATO, C. F.; SOUZA, J. D. S.; Bezerra, S.T.M. Management of water supply systems from interbasin transfers: case study in the Brazilian semiaridregion. **Urban Water Journal**, p.1 - 12, 2021.
- 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. **Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**, p. 1- 10, 2015.
- GOMES, M. M. A.; Verçosa, L. F. M.; Cirilo, J. A. Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. **NATURAL HAZARDS**, 2021.
- LIPORACI, S. R.; ROHM, S. A; PEDRO, F. G.; CEREDA JUNIOR, A. Comparação entre diferentes técnicas digitais para elaboração do modelo digital do terreno e da carta de declividades, com aplicação em mapeamento geológico-geotécnico e análise ambiental. **Revista Holos Environment**, v.3, n.2, p.85-102, 2003.
- POLAT, N.; UYSAL, M. Investigation performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 63, p. 61-68, 2015.
- SANTOS, L. L.; CABRAL, J. J. S. P.; CIRILO, J. A.; FREITAS, A. D.; SENS, M. L.; ARAGÃO, R.; BARROS, T. H. S. Aplicação da tecnologia de filtração em margem para população difusa no Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 49–58, 2014.

JOÃO FARIAS DA COSTA JÚNIOR

USO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO E MODELO DIGITAL DE TERRENO PARA ATUALIZAÇÃO DOS DADOS DE BARRAGENS E CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE RESERVATÓRIOS EM PERNAMBUCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Defesa realizada por videoconferência.

Áreas de concentração: Geotecnia e Recursos Hídricos

Aprovado em 25 de Maio de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)
Núcleo de Tecnologia, Campus Agreste, Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Avaliador)
Núcleo de Tecnologia, Campus Agreste, Universidade Federal de Pernambuco

Rochele Sheila Vasconcelos (Avaliadora)
Pós-Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental -
Universidade Federal de Pernambuco