

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ESTIMATIVA AUTOMATIZADA DA CAPACIDADE EM 2.500 PEQUENOS RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO CEARENSE COM BASE NO MDE

Dário Macedo Lima^{1, 2}; Adriano Rolim da Paz²; Eduardo Savio Passos Rodrigues Martins^{1,3};

Marielle Gosset⁴; Rafael Reis Alencar Oliveira^{1,3,4}

Abstract: Small reservoirs are essential for water security in semiarid regions such as northeastern Brazil, yet they are generally unmonitored and have unknown storage capacities. This study presents a large-scale application of the UNWRAP (UNderWater Reservoir Inference Approach) method, which automatically estimates reservoir storage capacity using Digital Elevation Models (DEMs), even when water is present at the time of data acquisition. The method was applied to 2,521 reservoirs in the Riacho do Sangue Basin (Ceará, Brazil), a region with a high density of small dams. Results showed that most reservoirs have low storage capacity ($<0.035 \text{ hm}^3$) and total dam heights between 1 and 6 meters. Approximately 15% contained water during DEM acquisition. The combined storage of the unmonitored reservoirs (52.6 hm^3) was lower than that of the three monitored ones, despite their larger total surface area—suggesting greater susceptibility to evaporation. The automated implementation of UNWRAP proved efficient and promising for supporting water resource management in regions with thousands of unmonitored reservoirs.

Resumo: Pequenos reservatórios são essenciais para a segurança hídrica em regiões semiáridas, como o nordeste brasileiro, mas em geral não são monitorados e têm capacidade de armazenamento desconhecida. Este estudo aplica em larga escala o método UNWRAP (UNderWater Reservoir Inference Approach), que estima automaticamente a capacidade de reservatórios com base em Modelos Digitais de Elevação (MDE), mesmo na presença de lâmina d'água. A abordagem foi implementada para 2.521 reservatórios na Bacia do Riacho do Sangue (CE), região de alta densidade de açudes. Os resultados indicaram que a maioria possui baixa capacidade ($<0,035 \text{ hm}^3$) e altura total entre 1 e 6 metros. Cerca de 15% apresentavam água no momento da aquisição do MDE. A soma das capacidades dos reservatórios não monitorados ($52,6 \text{ hm}^3$) foi inferior à dos três monitorados, apesar da maior área superficial, indicando maior suscetibilidade à evaporação. A aplicação automatizada do UNWRAP mostrou-se eficiente e promissora para apoiar a gestão hídrica em regiões com milhares de reservatórios não monitorados.

Palavras-Chave – Pequenos reservatórios; Capacidade de armazenamento; Modelo Digital de Elevação

INTRODUÇÃO

Estima-se que existam cerca de 3 milhões de pequenos reservatórios ($<0,1 \text{ km}^2$) em regiões semiáridas no mundo (Mady et al., 2020), com densidades de até dez por km^2 (Nathan et al., 2005). No semiárido brasileiro, marcado por alta evaporação e chuvas sazonais, esses reservatórios são

1) Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Av. Rui Barbosa, 1246 - Aldeota, Fortaleza - CE, 60115-221, (85) 3101-1088, dariomacedolima@gmail.com, eduardo.martins@ufc.br e reis.rafaeu@gmail.com

2) Universidade Federal da Paraíba, Campus I Lot. Cidade Universitaria - João Pessoa - PB, 58051-900, (83) 3216-7200, adrianorpaz@yahoo.com.br

3) Universidade Federal do Ceará, Av. da Universidade, 2853 - Benfica, Fortaleza - CE, 60020-181, (85) 3366-7300

4) Géosciences Environnement Toulouse, 14, avenue Édouard Belin, Toulouse, France, +33(0)561332647, marielle.gosset@ird.fr

fundamentais para mitigar os efeitos da seca em nível local (Ribeiro Neto et al., 2024). O estado do Ceará, por exemplo, abriga mais de 100 mil pequenas barragens (Funceme, 2021). Apesar de sua relevância, a maioria dos pequenos reservatórios do mundo permanece sem monitoramento ou registro formal (Colombo et al., 2024; Ribeiro Neto et al., 2022), muitas vezes por serem construídos de forma não controlada (Habets et al., 2018), o que dificulta o conhecimento de suas capacidades e batimetrias (Pereira et al., 2019) — um entrave à gestão sustentável da água.

Uma solução alternativa para obter capacidade e batimetria dos pequenos reservatórios é o processamento do MDE (Modelo Digital de Elevação). Atualmente, vários MDEs obtidos via sensoriamento remoto, em escala global e com resolução espacial relativamente refinada estão disponíveis gratuitamente (Farr et al., 2007; Tachikawa et al., 2011; Tadono et al., 2015). Devido a essa crescente disponibilidade, alguns estudos têm aplicado o MDE para estimar a capacidade e batimetria dos reservatórios (Li et al., 2019; Massuel et al., 2022; Zhang et al., 2016). No entanto, a acurácia dessa estimativa é comprometida pela limitação intrínseca das técnicas de sensoriamento remoto em capturar a elevação do terreno abaixo do nível da água. Dessa forma, os MDEs globais disponíveis geralmente assinalam um valor fixo para as áreas cobertas por água. Esse valor corresponde à elevação da água durante a aquisição do MDE.

Para lidar com essas limitações, foi desenvolvido o método *UNderWater Reservoir Inference Approach* (UNWRAP) (Lima et al., 2025), capaz de estimar a capacidade de armazenamento de reservatórios a partir de MDE, inferindo o volume submerso no momento da aquisição dos dados. O UNWRAP baseia-se em dados amplamente disponíveis, como o MDE, a área máxima inundada e a localização da barragem. O método combina duas etapas principais: (i) o processamento do MDE para determinar o volume do reservatório acima da lâmina d'água no momento da aquisição dos dados; e (ii) o ajuste de um sólido geométrico regular ao volume total do reservatório, com base na topografia derivada do MDE acima da lâmina d'água, permitindo a estimativa da parcela submersa.

Além da necessidade de métodos que forneçam estimativas confiáveis, a determinação da capacidade de armazenamento em áreas com milhares de reservatórios, como o semiárido brasileiro, exige o desenvolvimento de ferramentas capazes de realizar essa estimativa de forma automatizada, sem a necessidade de intervenções manuais, o que constitui um desafio adicional. Este trabalho tem como objetivo apresentar o processo de implementação do método UNWRAP para a estimativa automática da capacidade de pequenos reservatórios em grande escala, para milhares de reservatórios. Foi utilizada como área de estudo a Bacia Hidrográfica do Riacho do Sangue, com área de 1.370 km². Localizada no estado do Ceará, essa bacia é caracterizada por uma alta densidade de pequenos reservatórios, aproximadamente 2521, além da ocorrência recorrente de eventos de seca.

MÉTODO UNWRAP

Visão Geral

O método UNWRAP estima a capacidade de armazenamento de reservatórios utilizando MDEs disponíveis, mesmo quando adquiridos após a construção da barragem, desde que apresentem resolução espacial adequada. Três conjuntos de dados de entrada são necessários: (i) o MDE, (ii) a localização da barragem e (iii) a área máxima inundada do reservatório.

A área máxima inundada pode ser obtida em bases de dados globais como o Global Surface Water (GSW) (Pekel et al., 2016), que fornece localizações georreferenciadas e formatos das superfícies de água. Também podem estar disponíveis estudos regionais com base em séries temporais de imagens de satélite, como o realizado para o estado do Ceará pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme 2023).

O método UNWRAP parte do princípio de que, na presença de água, o MDE não representa a topografia submersa, capturando apenas o relevo exposto. Assim, a lâmina d'água aparece como uma superfície plana com bordas irregulares definidas pela topografia. Para contornar essa limitação, o UNWRAP considera uma profundidade submersa desconhecida (h_u) e um volume correspondente (V_u). A capacidade total do reservatório (V_c) é estimada como a soma do volume acima da lâmina d'água (V_a), derivado diretamente do MDE, e do volume submerso (V_u), obtido por ajuste de um sólido geométrico à topografia exposta (Equação 1)

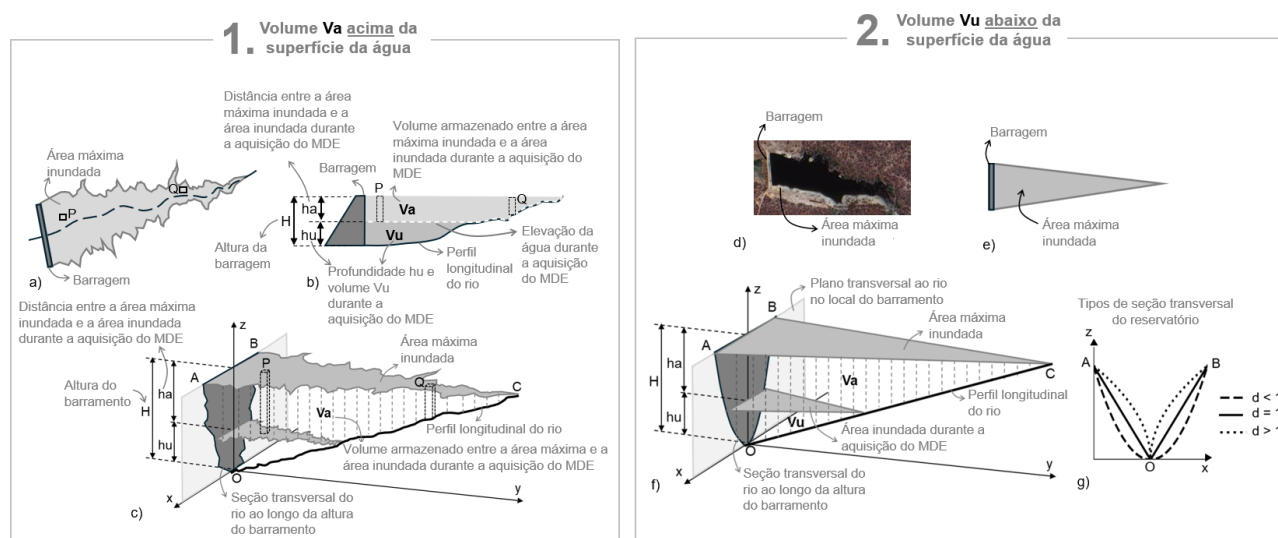
$$V_c = V_a + V_u \quad (1)$$

Estimativa do volume V_a armazenado acima do nível da água durante a aquisição do MDE

Para estimar o volume V_a , o UNWRAP calcula a profundidade h_a entre o nível d'água na aquisição do MDE e a área máxima inundada do reservatório (Figura 1.1), utilizando o algoritmo Depth–Area–Volume (DAV), aplicado sobre o MDE e a grade de direção de fluxo. O algoritmo simula a elevação progressiva do nível da água em passos Δh_i , identificando a área inundada a cada etapa. A profundidade h_a é definida quando a área simulada se aproxima da área máxima inundada.

Com h_a , estima-se a elevação máxima da lâmina d'água. A profundidade da água em cada pixel é obtida subtraindo sua elevação (MDE) da elevação máxima. Para pixels submersos (tipo P), essa profundidade é constante (h_a); para pixels emersos (tipo Q), varia conforme o relevo (Figura 1.1). Multiplicando-se a profundidade pela área do pixel, obtém-se o volume individual. A soma desses volumes resulta em V_a , o volume acima do nível d'água na data da aquisição.

Figura 1 – 1) Representação esquemática do reservatório, destacando a área máxima inundada, a altura do barramento (H), a profundidade da água (h_a) e o volume armazenado (V_a) acima do nível da água no momento da aquisição dos dados do MDE; também são mostradas a localização e o volume de água para dois pixels, P e Q. (a) Vista superior, (b) vista lateral e (c) perspectiva tridimensional da barragem; 2) (d) Área máxima inundada de um reservatório real observada em imagem de satélite; (e) representação geométrica triangular dessa área inundada; (f) geometria do reservatório representada por um sólido geométrico regular; (g) influência do parâmetro d na representação geométrica do tipo de seção transversal do reservatório.



Fonte: Adaptado de Lima et al. (2025).

Estimativa do volume V_u armazenado abaixo do nível da água durante a aquisição do MDE

Para estimar o volume V_u , assume-se que a geometria submersa do reservatório pode ser representada por um sólido geométrico regular ajustado à topografia visível no MDE (região acima do nível da água) — Figura 1.2. A ideia é que a forma desconhecida da parte submersa segue o padrão da porção exposta. Molle (1991) propôs esse tipo de sólido para representar pequenos reservatórios no semiárido. Na Figura 1.2c, o leito do rio é uma linha reta entre os pontos O e C, com declive constante, enquanto a curva A–O–B define a seção transversal do vale, variando conforme a Equação 2 (Figura 1.2d).

$$z = \begin{cases} \lambda \cdot x^{\frac{1}{d}}, & x \geq 0 \\ \gamma \cdot |x|^{\frac{1}{d}}, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Os coeficientes λ , γ e d definem o formato da seção transversal. Quando $d < 1$, a curva é convexa; $d > 1$ gera uma forma côncava; e $d = 1$ resulta em linhas retas, formando um tetraedro. Já λ e γ controlam a abertura e inclinação da curva, permitindo assimetrias no eixo z . A área inundada para cada nível d'água é representada por um triângulo (Figura 1.2b), cujas dimensões variam com o nível d'água, a inclinação do leito e o formato da seção transversal. Essa forma triangular baseia-se nas geometrias superficiais típicas de pequenos reservatórios no Nordeste brasileiro (Figura 2a). O volume do sólido geométrico regular $V(z)$, para um determinado nível d'água z , é representado pela Equação 3:

$$V(z) = \frac{A(z)}{d+2} \cdot z \quad (3)$$

Dessa forma, V_u pode ser expresso pela Equação 4, considerando $z = hu$.

$$V_u = \frac{A(hu)}{d+2} \cdot hu \quad (4)$$

O volume total do sólido $V(z)$ pode ser dividido em dois componentes: o volume abaixo de hu (V_u) e o volume armazenado entre hu e z ($V'(z)$) (Equação 5):

$$V(z) = V_u + V'(z) \quad (5)$$

Combinando as Equações 3, 4 e 5, e reorganizando para isolar $V'(z)$, obtém-se a Equação 6:

$$V'(z) = \frac{1}{d+2} \cdot [A(z) \cdot z - A(hu) \cdot hu] \quad (6)$$

Como z' representa a diferença entre z e hu (Equação 7), a Equação 6 pode ser reescrita para derivar a Equação 8:

$$z' = z - hu \quad (7)$$

$$\frac{V'(z)}{A(z)} = \frac{hu}{d+2} \cdot \left[1 - \frac{A(hu)}{A(z)} \right] + \frac{1}{d+2} z' \quad (8)$$

Na Equação 8, as variáveis desconhecidas são hu e d . As demais variáveis podem ser obtidas com base nos dados do MDE para qualquer valor de z maior que hu . Uma vez que a Equação 8 assume a forma da Equação 9, os valores de hu e d podem ser estimados por meio de regressão linear múltipla:

$$Y = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 \quad (9)$$

Onde Y é a variável dependente, dada pela Equação 10, e X_1 e X_2 são as variáveis independentes expressas pelas Equações 11 e 12, respectivamente:

$$Y = \frac{V'(z)}{A(z)} \quad (10)$$

$$X_1 = 1 - \frac{A(hu)}{A(z)} \quad (11)$$

$$X_2 = z' \quad (12)$$

Na Equação 9, a_1 e a_2 são os coeficientes lineares correspondentes, dados pelas Equações 13 e 14:

$$a_1 = \frac{hu}{d+2} \quad (13)$$

$$a_2 = \frac{1}{d+2} \quad (14)$$

Um conjunto de valores para as variáveis independentes X_1 e X_2 , bem como para a variável dependente Y , pode ser obtido processando o MDE para derivar $V'(z)$, $A(z)$ e z' para diferentes valores de z . $A(hu)$ representa a área inundada para $z = hu$ e pode ser determinada a partir do MDE, já que a superfície da água no momento da aquisição dos dados forma uma superfície plana na representação do terreno. $V'(z)$ e $A(z)$ são determinados pelo algoritmo DAV.

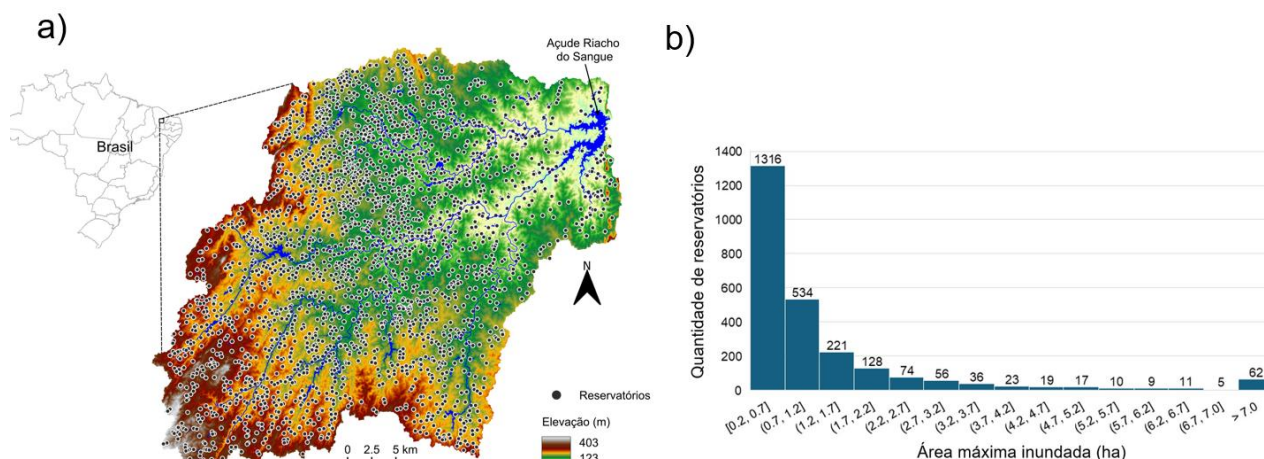
Com base nos conjuntos de valores de X_1 , X_2 e Y extraídos do MDE, os coeficientes a_1 e a_2 são estimados por meio de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores previstos da variável dependente. Após a determinação de a_1 e a_2 , as Equações 13 e 14 são utilizadas para calcular d e hu . Em seguida, V_u é determinado utilizando a Equação 4.

APLICAÇÃO DO MÉTODO UNWRAP

Área de estudo e dados disponíveis

A área escolhida para aplicação do UNWRAP é a bacia hidrográfica do Açude Riacho do Sangue (Figura 2a), com 1370 km² de extensão, localizada no estado do Ceará, no semiárido brasileiro. Essa bacia, cujo exutório é o próprio açude Riacho do Sangue, é caracterizada por solos rasos, embasamento cristalino e recorrentes eventos de seca. Existem 3 reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (Cogerh) na bacia: Riacho do Sangue (58.4 hm³); Jenipapeiro (14.6 hm³); e Tigre (3.5 hm³) (FUNCEME, 2021).

Figura 2 – a) Bacia Hidrográfica do Açude Riacho do Sangue com destaque para a localização dos reservatórios na bacia; b) Histograma da área máxima inundada dos reservatórios na bacia.



A principal razão para a escolha da bacia foi sua elevada densidade de pequenos reservatórios, que pode alcançar até 2 barramentos por km² em determinadas áreas (Funceme, 2021). Essa concentração é visível na Figura 2a, que mostra a localização dos reservatórios identificados na bacia. A delimitação dessas estruturas foi realizada com base no banco de dados da Funceme (2023), que fornece informações sobre área máxima inundada, coordenadas geográficas e contornos das superfícies de água, a partir de séries temporais de imagens de satélite. Com base nesses dados, foram identificados 2521 reservatórios na bacia, a maioria dos quais apresenta área superficial máxima muito pequenas, entre 0,2 e 0,7 hectares, conforme indicado pelo histograma da Figura 2b.

Também está disponível para a bacia um MDE com resolução de 10 metros, apresentado na Figura 2a. Este MDE foi desenvolvido por Zhang (2018) a partir de dados brutos coletados pela missão TanDEM-X, fornecidos pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR), utilizando os métodos descritos em Zhang (2018) e Zhang et al. (2016). A bacia apresenta topografia ondulada, com altitudes variando entre 123 e 403 metros.

Processamento do MDE

O MDE é inicialmente processado para derivar os seguintes produtos primários: o MDE sem depressões, as grades de direção e de acumulação de fluxo, a rede de drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica. A grade de direção de fluxo atribui a cada pixel uma direção voltada para um dos seus oito vizinhos, normalmente determinada com base na direção de maior declividade. Essa abordagem, conhecida como método D8 (Deterministic Eight Neighbours), requer o pré-processamento do MDE para eliminar depressões, resultando em um MDE sem depressões e garantindo caminhos de fluxo contínuos de cada pixel até a borda da grade do MDE. Neste estudo, o MDE sem depressões foi obtido utilizando o algoritmo *Priority-First Search* (PFS), conforme a metodologia descrita por Sedgewick (1992) e implementada por Jones (2002). A rede de drenagem foi derivada a partir da grade de área acumulada de drenagem, gerada com base na grade de direção de fluxo por meio da soma do número de pixels que drenam para cada pixel do MDE. A rede de drenagem é composta pelos pixels que apresentam uma área mínima de drenagem acumulada a montante. A delimitação da bacia contribuinte para o reservatório é determinada com base nas direções de fluxo e na localização da barragem. É importante destacar que o MDE sem depressões é utilizado apenas para a geração dos produtos mencionados. Todos os procedimentos subsequentes utilizam o MDE original.

Determinação automática do exutório

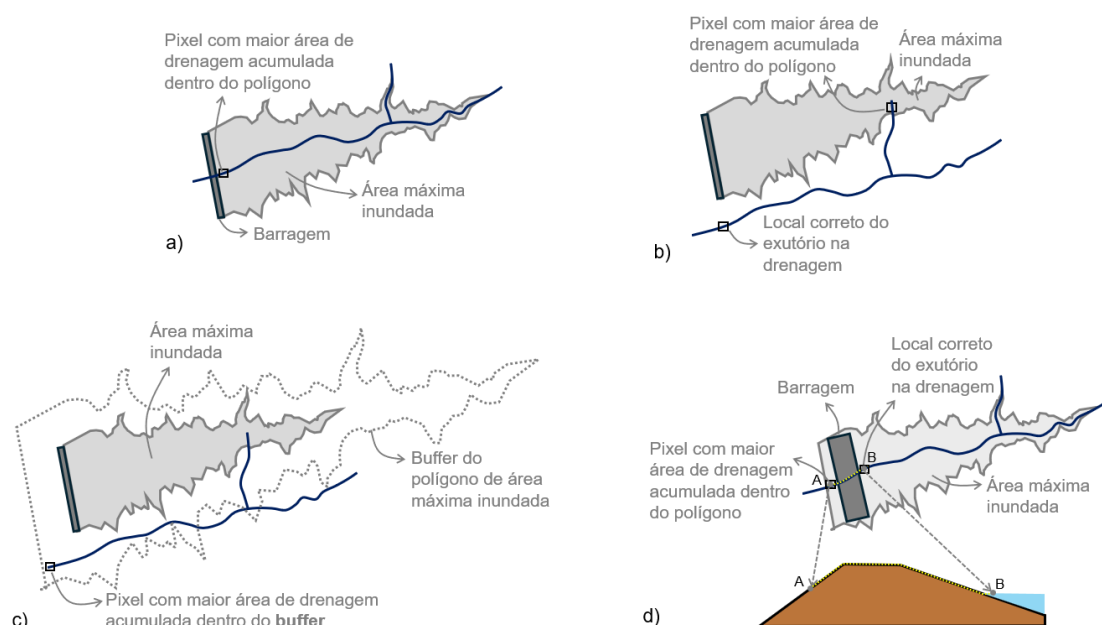
O pixel definido como exutório de cada reservatório deve, idealmente, corresponder ao ponto imediatamente a montante da barragem, localizado acima da área inundada no momento da aquisição do MDE — nos casos em que o reservatório estava com água nessa data. Para automatizar essa identificação, foi desenvolvida uma rotina computacional em Python capaz de determinar o exutório de todos os reservatórios da bacia.

A rotina requer como entrada três rasters: (i) o raster da área máxima inundada dos reservatórios, (ii) o raster da área de drenagem acumulada e (iii) o MDE original, com depressões não preenchidas. Para cada reservatório, todos os pixels contidos dentro da área máxima inundada são avaliados, sendo selecionado como exutório aquele com a maior área de drenagem acumulada (Figura 3a).

Para alguns reservatórios, existe uma inconformidade entre a área máxima inundada e a rede de drenagem, como mostra a Figura 3b. Essa inconformidade se deve ao fato de que a rede de drenagem é derivada do processamento do MDE e seu traçado possui um determinado nível de incerteza. O polígono da área máxima, por sua vez, é oriundo de uma delimitação do espelho baseada nas imagens de sensoriamento remoto.

Para solucionar esse problema, foi adotado um buffer no polígono da área máxima (Figura 3c). Se ao avaliar os pixels dentro desse buffer houver um crescimento significativo no valor do pixel com maior área de drenagem acumulada, há um forte indício de que há uma inconformidade para este reservatório, e o pixel exutório passa a ser aquele com maior área acumulada de drenagem dentro do buffer (Figura 3c).

Figura 3 – a) Princípio básico para definir o pixel exutório do reservatório; b) Casos onde há inconformidade entre a drenagem e a área máxima inundada; c) Utilização do buffer para lidar com as inconformidades; d) Casos em que o pixel exutório está erroneamente localizado a jusante do barramento, como mostra o perfil longitudinal.



Também podem ocorrer desvios espaciais entre o polígono da área máxima inundada e a representação do barramento no modelo digital de elevação (MDE). Esse descasamento é mais evidente em reservatórios de maiores dimensões, cujos barramentos são suficientemente grandes para serem representados com nitidez no MDE. Nesses casos, pode haver uma identificação incorreta do pixel exutório, como ilustrado na Figura 3d.

Observa-se que, em algumas situações, o pixel com maior área acumulada de drenagem não corresponde ao ponto mais adequado para representar o exutório. Isso ocorre porque o método UNWRAP exige que o pixel exutório esteja localizado imediatamente a montante do barramento, na posição correspondente ao nível da água no momento da aquisição do MDE. A solução implementada no algoritmo para esses casos é a seguinte: (1) Percorrimento da rede de drenagem a montante até que o percurso atinja uma distância predefinida (por exemplo, 100 m) e buscando sempre o pixel a montante com maior área acumulada de drenagem; (2) Identificação do pixel de maior elevação ao longo do percurso. (2) Avaliação de todo o percurso a montante a partir do pixel de maior elevação e seleção do pixel de menor elevação. Caso múltiplos pixels possuam a mesma menor elevação, escolhe-se aquele localizado mais a jusante.

Cálculo da capacidade

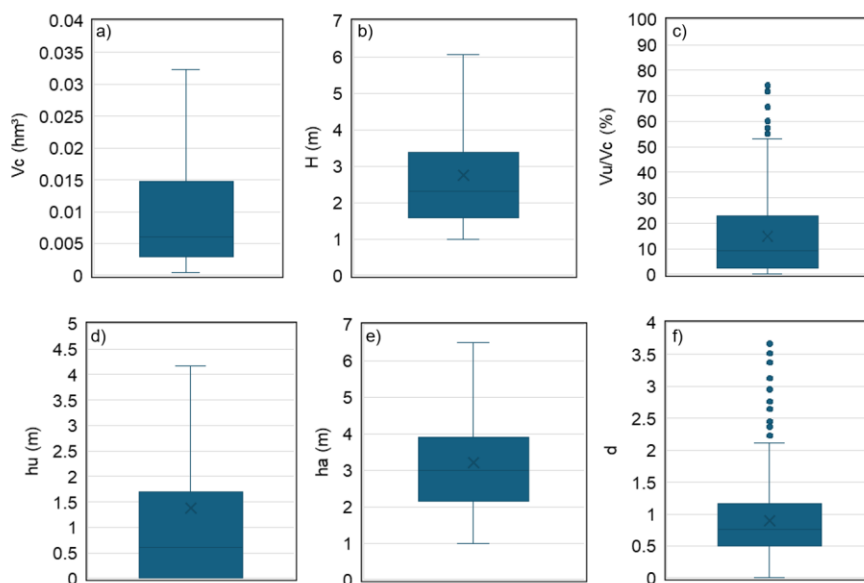
Para realizar esse cálculo, foi desenvolvido um algoritmo em Python cujos dados de entrada são: direções de fluxo, área máxima inundada, exutórios, MDE e a declividade do terreno. A partir da declividade do terreno, o algoritmo identifica o tamanho da área dentro do reservatório que possui declividade zero. Essa declividade zero indica a presença de água no reservatório durante a obtenção do MDE. Se a área com declividade zero for significativa, o algoritmo assume que há um volume V_u abaixo da superfície da água que é desconhecido e aplica o método UNWRAP para determiná-lo. Caso essa área com declividade zero não seja significativa, o algoritmo assume que o reservatório estava vazio durante a obtenção do MDE e determina sua capacidade considerando $V_u = 0$.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4a apresenta os valores estimados de capacidade total de armazenamento (V_c) para os 2521 reservatórios analisados. Observa-se que a maior parte deles possui capacidade muito reduzida, inferior a $0,035 \text{ hm}^3$. A altura total dos barramentos ($h_a + h_u$) variou, na maioria dos casos, entre 1 e 6 metros (Figura 4b).

Cerca de 15% dos reservatórios apresentavam presença de água no momento da aquisição do MDE. Para esses casos, o volume armazenado correspondia, em geral, a até 50% da capacidade total (Figura 4c). A profundidade submersa (h_u) variou predominantemente entre valores próximos de zero e pouco acima de 4 metros (Figura 4d), enquanto a profundidade estimada acima da lâmina d'água (h_a) oscilou entre 1 e pouco mais de 6 metros (Figura 4e). A maioria dos reservatórios apresentou valores do parâmetro d inferiores a 1 (Figura 4f), o que indica um comportamento predominantemente convexo, associado a uma seção transversal do tipo “U”.

Figura 4 – Resultados da aplicação do método UNWRAP para estimativa da capacidade de armazenamento dos reservatórios na bacia hidrográfica do Açude Riacho do Sangue: a) Capacidade total estimada (V_c); b) Altura do barramento (H); c) Percentual da capacidade ocupado por água no momento da aquisição do MDE; d) Profundidade submersa (h_u) durante a aquisição do MDE; e) Distância vertical (h_a) entre o nível da água no momento da aquisição do MDE e o nível correspondente à área máxima inundada; f) Parâmetro d do sólido geométrico.



A soma das capacidades estimadas dos 2518 reservatórios não monitorados na bacia resultou em um volume total de armazenamento de 52,6 hm³ (Tabela 1). Apesar da grande quantidade, essa capacidade conjunta ainda é inferior à soma das capacidades dos três reservatórios monitorados pela Cogerh na mesma bacia. Em contrapartida, a área máxima inundada total dos 2518 reservatórios não monitorados é mais que o dobro da área combinada dos três monitorados. Isso indica que os reservatórios monitorados, por serem mais profundos, conseguem armazenar mais água em menor área superficial e, consequentemente, apresentam menores perdas por evaporação. Já os pequenos reservatórios, em sua maioria mais rasos — com profundidade máxima média inferior a 3 metros, conforme mostrado na Figura 4b — possuem menor capacidade de armazenamento e maior susceptibilidade à evaporação.

Tabela 1 – Somatório das capacidades e áreas máximas inundadas de todos os reservatórios monitorados e não monitorados na Bacia do Açude Riacho do Sangue.

	Volume (hm ³)	Área (km ²)
Total	138.2	47.8
Reservatórios monitorados	85.6	14.1
Reservatórios não monitorados	52.6	33.7

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a viabilidade e eficiência da aplicação do método UNWRAP para a estimativa automatizada da capacidade de pequenos reservatórios no semiárido brasileiro, mesmo na ausência de informações batimétricas, utilizando dados amplamente disponíveis como MDEs e áreas máximas inundadas. A implementação do método em uma rotina computacional permitiu processar mais de 2.500 reservatórios na bacia do Riacho do Sangue sem a necessidade de intervenções manuais.

Os resultados evidenciaram a predominância de estruturas com baixa capacidade de armazenamento (inferior a 0,035 hm³) e pequenas alturas de barramento (entre 1 e 6 metros). Embora os pequenos reservatórios possuam capacidade individual reduzida, sua quantidade expressiva representa um volume total de armazenamento significativo. Ainda assim, essa capacidade combinada é inferior à dos poucos reservatórios monitorados, que, por serem mais profundos, otimizam o armazenamento hídrico com menor área superficial, reduzindo perdas por evaporação.

A presença de água em aproximadamente 15% dos reservatórios no momento da aquisição do MDE evidenciou a importância de métodos capazes de lidar com a limitação dos dados altimétricos em áreas inundadas. A análise morfológica indicou a predominância de seções transversais convexas do tipo “U”.

A abordagem proposta se destaca por permitir o processamento em larga escala, com mínima intervenção manual, representando uma contribuição relevante para o mapeamento e a gestão de recursos hídricos em regiões de alta densidade de pequenos reservatórios. O UNWRAP se mostra, portanto, uma ferramenta promissora para apoiar políticas públicas de monitoramento, planejamento e adaptação à variabilidade climática no semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS

- Colombo, P., Ribeiro Neto, G. G., Costa, A. C., Mamede, G. L., & Van Oel, P. R. (2024). Modeling the influence of small reservoirs on hydrological drought propagation in space and time. *Journal of Hydrology*, 629, 130640. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130640>

- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. E. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Funceme. (2021). *Mapeamento das barragens dos pequenos reservatórios d'água situados no Estado do Ceará*. FUNCEME. (2021). *Portal Hidrológico do Ceará*. <http://funceme.br/hidro-ce-app>
- Funceme. (2023). *Espelhos D'Água - CE: Nota Metodológica v.1/2023*.
- Habets, F., Molénat, J., Carluier, N., Douez, O., & Leenhardt, D. (2018). The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review. *Science of the Total Environment*, 643, 850–867. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.188>
- Jones, R. (2002). Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences*, 28(9), 1051–1060. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00022-5)
- Li, Y., Gao, H., Jasinski, M. F., Zhang, S., & Stoll, J. D. (2019). Deriving High-Resolution Reservoir Bathymetry From ICESat-2 Prototype Photon-Counting Lidar and Landsat Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10), 7883–7893. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2917012>
- Lima, D. M., Paz, A. R., Savio Passos Rodrigues Martins, E., & Olivera, F. (2025). Improving small reservoir storage capacity estimation using DEM: inferring underwater volume at DEM data acquisition time. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2498659>
- Mady, B., Lehmann, P., Gorelick, S. M., & Or, D. (2020). Distribution of small seasonal reservoirs in semi-arid regions and associated evaporative losses. *Environmental Research Communications*, 2(6), 061002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab92af>
- Massuel, S., Feurer, D., El Maaoui, M. A., & Calvez, R. (2022). Deriving bathymetries from unmanned aerial vehicles: a case study of a small intermittent reservoir. *Hydrological Sciences Journal*, 67(1), 82–93. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1988614>
- Molle, F. (1991). *Caractéristiques et potentialités des “açudes” du nordeste brésilien*. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010033412>
- Nathan, R., Jordan, P., & Morden, R. (2005). Assessing the impact of farm dams on streamflows, Part I: Development of simulation tools. *Australasian Journal of Water Resources*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/13241583.2005.11465259>
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Pereira, B., Medeiros, P., Francke, T., Ramalho, G., Foerster, S., & De Araújo, J. C. (2019). 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. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1566727>
- Ribeiro Neto, G. G., Melsen, L. A., Costa, A. C., Walker, D. W., Cavalcante, L., Kchouk, S., Brêda, J. P., Martins, E. S. P. R., & van Oel, P. R. (2024). Clash of Drought Narratives: A Study on the Role of Small Reservoirs in the Emergence of Drought Impacts. *Earth's Future*, 12(7). <https://doi.org/10.1029/2023EF004311>
- Ribeiro Neto, G. G., Melsen, L. A., Martins, E. S. P. R., Walker, D. W., & van Oel, P. R. (2022). Drought Cycle Analysis to Evaluate the Influence of a Dense Network of Small Reservoirs on Drought Evolution. *Water Resources Research*, 58(1). <https://doi.org/10.1029/2021WR030799>
- Sedgewick, R. (1992). *Algorithms in C++* (1^o ed). Addison Wesley.
- Tachikawa, T., Hat, M., Kaku, M., & Iwasaki, A. (2011). CHARACTERISTICS OF ASTER GDEM VERSION 2 1 Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC), 2 Mitsubishi Material Techno Corp. 3 University of Tokyo. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International*, 90 m, 3657–3660.
- Tadono, T., Takaku, J., Tsutsui, K., Oda, F., & Nagai, H. (2015). Status of “ALOS World 3D (AW3D)” global DSM generation. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015-Novem*, 3822–3825. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326657>
- Zhang, S. (2018). *Mapping the surface water storage variation in densely impounded semi-arid NE Brazil with satellite remote sensing approach* [Freie Universität Berlin]. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17169/refubium-1208>
- Zhang, S., Foerster, S., Medeiros, P., de Araújo, J. C., Motagh, M., & Waske, B. (2016). Bathymetric survey of water reservoirs in north-eastern Brazil based on TanDEM-X satellite data. *Science of The Total Environment*, 571, 575–593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.024>