

Artigo:

DEFINIÇÃO DO NÍVEL DO AÇUDE EDSON QUEIROZ (SERROTE) A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE

Estimation of the edson queiroz (serrote) reservoir water level using satellite imagery

Determinación del nivel del embalse edson queiroz (serrote) a partir de imágenes satelitales

Data de recebimento: 05/05/2026

Data de publicação: 30/07/2026

Luís Henrique Magalhães Costa¹

Lívia Figueira de Albuquerque²

José Wesley do Nascimento Herculano³

RESUMO

O monitoramento de reservatórios hídricos no semiárido nordestino é fundamental para a gestão dos recursos hídricos em uma das regiões mais vulneráveis à escassez hídrica do Brasil. O presente trabalho tem como objetivo definir o nível do Açude Edson Queiroz, popularmente denominado Açude Serrote, localizado no município de Santa Quitéria, estado do Ceará, por meio de imagens de satélite processadas na plataforma Google Earth Engine (GEE). A metodologia baseou-se na extração da área de inundação do reservatório a partir de imagens do satélite Landsat (5, 7 e 8), utilizando algoritmo desenvolvido em linguagem JavaScript no GEE. A área hídrica foi identificada pela transformação do espaço de cor HSV (Hue, Saturation, Value). Os dados de nível da água foram coletados no Portal Hidrológico da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). Pela aplicação do método dos mínimos quadrados no software Scilab 6.0, obteve-se a equação $Y = 0,0077981X + 182,64673$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9742$, evidenciando correlação muito forte entre a área de inundação e o nível altimétrico do reservatório. Os resultados validam a eficácia do sensoriamento remoto via GEE como ferramenta complementar à gestão hídrica no semiárido, com perspectivas de aplicação a outros corpos d'água da bacia do Acaraú e do Nordeste brasileiro.

Palavras-chave: Google Earth Engine. Nível de Reservatório. Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The monitoring of water reservoirs in the semi-arid region of northeastern Brazil is fundamental for water resources management in one of the country's most vulnerable areas to water scarcity. This study aims to define the water level of the Edson Queiroz Reservoir — popularly known as Açude Serrote — located in the municipality of Santa Quitéria, state of Ceará, Brazil, using satellite images processed on the Google Earth Engine (GEE) platform. The methodology was based on extracting the reservoir flooding area from Landsat satellite images (5, 7 and 8) using a JavaScript algorithm developed in the GEE Code Editor. The water body was identified through HSV (Hue, Saturation, Value) color space transformation. Water level data were collected from the hydrological portal of the Ceará Water Resources Management Company (COGERH). By applying the least squares method in Scilab 6.0, the regression equation $Y = 0.0077981X + 182.64673$ was obtained, with a determination coefficient $R^2 = 0.9742$, indicating a very strong correlation between the flooding area and the altimetric level. The results validate the effectiveness of remote sensing via GEE as a complementary tool for water management in the semi-arid region.

Keywords: Google Earth Engine. Reservoir Level. Remote Sensing.

1 Docente da Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1781-4188>

2 Docente da Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5190-6545>

3 Docente da Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA. Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-1673-7917>

RESUMEN

El monitoreo de embalses hídricos en el semiárido del noreste es fundamental para la gestión de los recursos hídricos en una de las regiones más vulnerables a la escasez hídrica de Brasil. El presente trabajo tiene como objetivo determinar el nivel del embalse Edson Queiroz, popularmente denominado embalse Serrote, ubicado en el municipio de Santa Quitéria, estado de Ceará, mediante imágenes de satélite procesadas en la plataforma Google Earth Engine (GEE). La metodología se basó en la extracción del área de inundación del embalse a partir de imágenes del satélite Landsat (5, 7 y 8), utilizando un algoritmo desarrollado en lenguaje JavaScript en GEE. El área hídrica fue identificada mediante la transformación del espacio de color HSV (Hue, Saturation, Value). Los datos del nivel del agua se recopilieron en el Portal Hidrológico de la Compañía de Gestión de Recursos Hídricos de Ceará (COGERH). Mediante la aplicación del método de los mínimos cuadrados en el software Scilab 6.0, se obtuvo la ecuación $Y = 0,0077981X + 182,64673$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,9742$, evidenciando una correlación muy fuerte entre el área de inundación y el nivel altimétrico del embalse. Los resultados validan la eficacia de la teledetección vía GEE como herramienta complementaria para la gestión hídrica en el semiárido, con perspectivas de aplicación en otros cuerpos de agua de la cuenca del Acaraú y del noreste brasileño.

Palabras clave: Google Earth Engine. Nivel de Embalse. Teledetección.

INTRODUÇÃO

A região semiárida brasileira é historicamente marcada pela escassez hídrica, condicionada por fatores físicos e climáticos que tornam o acesso à água um desafio permanente para suas populações. Essa condição resulta da baixa capacidade de retenção dos solos rasos de substratos cristalinos, aliada a um clima com alta evapotranspiração, baixa precipitação média anual, elevada variabilidade interanual das chuvas e concentração das precipitações em curtos períodos de tempo (TOLEDO; ARAÚJO; ALMEIDA, 2014). Diante dessas características, a construção de açudes superficiais tornou-se, ao longo dos séculos, a principal estratégia de convivência das populações com o semiárido nordestino, consolidando uma cultura de armazenamento hídrico indispensável para a sobrevivência e o desenvolvimento regional.

Nesse contexto, o monitoramento hidrológico dos reservatórios desempenha papel central na gestão dos recursos hídricos, subsidiando decisões de alocação da água entre múltiplos usos — abastecimento humano e animal, irrigação, piscicultura, geração de energia e lazer —, além de orientar ações preventivas de defesa civil em períodos de cheia extrema ou de escassez crítica. No estado do Ceará, a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) é o órgão responsável pela administração das águas acumuladas, gerenciando diretamente mais de 155 açudes públicos estaduais e federais. A COGERH tem como finalidade implantar um sistema de gerenciamento da oferta de água superficial e subterrânea, compreendendo aspectos de monitoramento dos reservatórios e poços, manutenção e operação de obras hídricas e organização de usuários, com papel de cogestora para que a comunidade possa tomar decisões coletivas sobre a política hídrica das bacias (COGERH, 2020).

A bacia hidrográfica do Rio Acaraú, na qual o Açude Edson Queiroz está inserido, é uma das principais bacias do estado do Ceará, drenando aproximadamente 14.500 km², com nascentes na

Serra de Santa Inês e foz no litoral oeste cearense, entre os municípios de Marco e Acaraú. A bacia abriga um conjunto expressivo de reservatórios públicos gerenciados pela COGERH, responsáveis pelo abastecimento de dezenas de municípios da região noroeste do estado. O monitoramento eficiente do nível desses reservatórios é, portanto, estratégico para a segurança hídrica regional, em especial do Açude Edson Queiroz, cujo papel regulador é fundamental para a perenização do Rio Groaíras em 65 km a jusante da barragem e para o planejamento das outorgas de uso da água concedidas pelos órgãos competentes.

Contudo, a realização de medições regulares de nível d'água enfrenta obstáculos operacionais e econômicos significativos. A batimetria convencional demanda mobilização de equipes e equipamentos especializados, representando custo elevado por área levantada, especialmente em reservatórios de difícil acesso ou em municípios com infraestrutura logística precária. Condições climáticas adversas, baixa profundidade de alguns corpos d'água e grande extensão territorial a ser coberta ampliam ainda mais essas dificuldades (SÁ, 2018), resultando em séries históricas com lacunas frequentes que comprometem a qualidade da gestão hídrica.

Diante desse cenário, o sensoriamento remoto por satélite tem emergido como alternativa promissora e de baixo custo para o monitoramento contínuo de reservatórios. Alsdorf, Rodriguez e Lettenmaier (2007) e Duan e Bastiaanssen (2013) destacam que o monitoramento de recursos hídricos por satélite tornou-se objetivo estratégico para a hidrologia das próximas décadas, especialmente ante o declínio do número de estações de medição in situ e a dificuldade em modelar o ciclo hidrológico em escala global. No Nordeste brasileiro, Toledo, Araújo e Almeida (2014) demonstraram a viabilidade do sensoriamento remoto para o monitoramento de redes densas de reservatórios no semiárido, confirmando o potencial da tecnologia para a região.

Em dezembro de 2010, a Google lançou a plataforma Google Earth Engine (GEE), voltada ao processamento de dados de satélite e espaciais em escala planetária (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2010). O GEE disponibiliza um catálogo com petabytes de dados orbitais acumulados em mais de 40 anos e oferece capacidade de processamento e visualização de dados muito superior à dos métodos convencionais em desktop GIS (Geographic Information System), tornando viáveis análises que seriam impraticáveis localmente (GORELICK et al., 2017). A plataforma é acessada por uma API (Application Programming Interface) em linguagem JavaScript ou por um IDE (Integrated Development Environment), ambos via navegador (SILVA, 2018). O poder computacional do GEE permite que um milhão de horas de CPU seja executado em poucos dias, ao dividir os dados em grades independentes processadas por centenas de CPUs em paralelo.

O programa Landsat é o principal acervo de imagens de satélite utilizado neste estudo. Desenvolvido pela NASA e pelo USGS desde a segunda metade da década de 1960 — inicialmente denominado ERTS (Earth Resources Technology Satellite) e renomeado Landsat em 1975 —, o programa envolveu o lançamento de nove satélites. Os Landsat 1, 2 e 3 foram experimentais; o Landsat 4 (1982) inaugurou o sensor TM (Thematic Mapper); o Landsat 5 (1984) manteve os mesmos instrumentos; o Landsat 6 não alcançou a órbita; o Landsat 7 (1999) introduziu o sensor ETM+ com melhorias de acurácia; o Landsat 8 (2013) passou a operar com os instrumentos OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor), com importante aprimoramento radiométrico (USGS, 2013); e o Landsat 9 foi lançado com sucesso em setembro de 2021 e está em operação plena, enviando imagens de alta qualidade que trabalham em conjunto com o Landsat 8. Essas imagens possuem resolução espacial de 30 metros e periodicidade de revisita de 16 dias.

O Açude Edson Queiroz, popularmente conhecido como Açude Serrote, é um dos mais importantes reservatórios públicos do estado do Ceará. Construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) entre 1984 e 1987 no município de Santa Quitéria, a aproximadamente 85 km de Sobral, o reservatório integra a bacia hidrográfica do Rio Acaraú e possui capacidade de armazenar até 254 milhões de metros cúbicos de água. Além de abastecer Santa Quitéria e o distrito de Taperoaba, no município de Sobral, o açude sustenta irrigação, piscicultura e consumo animal em ampla região, sendo responsável pela criação dos povoados de São Cosme e São Damião em seu entorno (DNOCS, 2024). Sua relevância estratégica para o abastecimento regional e o desenvolvimento socioeconômico local justifica o investimento em ferramentas modernas de monitoramento hidrológico.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia de definição do nível de reservatórios a partir de imagens de satélite Landsat, processadas no Google Earth Engine, ao Açude Edson Queiroz (Serrote), gerando uma equação de regressão linear que relacione a área de inundação ao nível altimétrico do reservatório e validando uma ferramenta de apoio à gestão hídrica da bacia do Acaraú.

METODOLOGIA

Área de Estudo

O Açude Edson Queiroz — denominado Açude Serrote — está localizado no município de Santa Quitéria, estado do Ceará, a aproximadamente 85 km de Sobral, nas coordenadas aproximadas de latitude 4,19° S e longitude 40,48° W (Figura 1). O reservatório pertence à bacia

273

hidrográfica do Rio Acaraú, barrando o Rio Groaíras, e está inserido em área de clima semiárido, com precipitações irregulares concentradas principalmente entre janeiro e junho e longo período de estiagem nos demais meses do ano.

A barragem é do tipo terra com enrocamento (blocos de rocha compactados) e foi construída pelo DNOCS por meio da empresa Andrade Gutierrez S/A. As obras foram iniciadas em 1984 — incluindo a instalação do canteiro de obras e a abertura de uma estrada de 16 km de acesso — e concluídas em 1987. A solenidade de inauguração contou com a presença do presidente interino da República, Paes de Andrade, e do governador Tasso Jereissati. O nome do reservatório é uma homenagem ao empresário Edson Queiroz, falecido em acidente aéreo em 1982, em cuja propriedade — Fazenda Juá — a obra foi erguida (DNOCS, 2024).

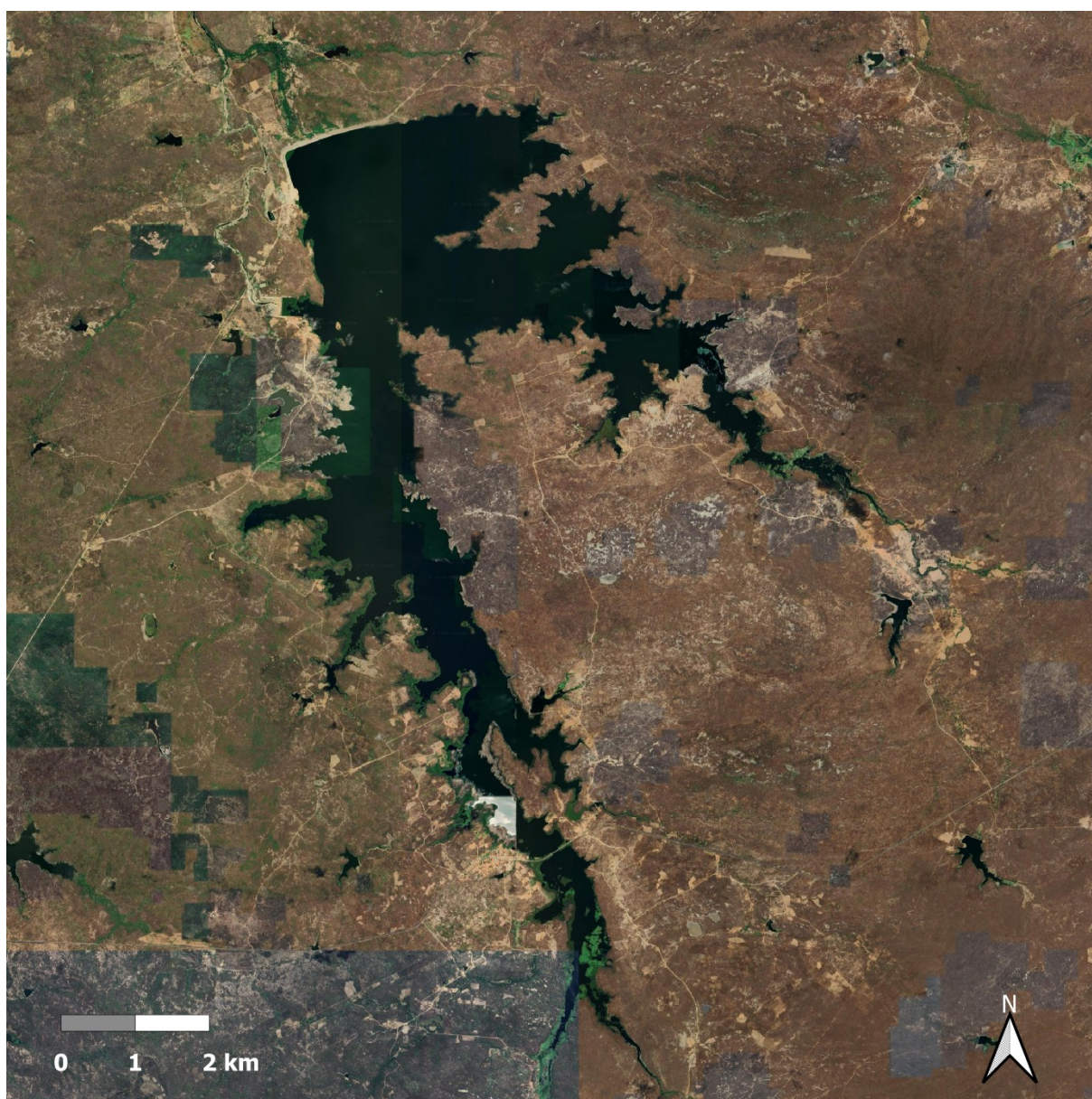
O açude possui bacia hidrográfica com área de aproximadamente 1.777 km² e espelho d'água de cerca de 26,60 km² na capacidade máxima. Com uma adutora associada, o reservatório garantiu a perenização do Rio Groaíras em 65 km, assegurando irrigação de aproximadamente 5 km² e abastecimento humano e animal em toda a sua área de influência. Dois povoados — São Cosme e São Damião — foram criados no entorno do açude, que hoje sustenta centenas de famílias locais. As principais características técnicas do reservatório estão reunidas na Tabela 1.

Quadro 1 – Características técnicas do Açude Edson Queiroz (Serrote).

Característica	Dado
Município	Santa Quitéria – CE
Rio Barrado	Rio Groaíras
Bacia Hidrográfica	Acaraú
Capacidade Volumétrica	254.000.000 m ³
Espelho d'água (cap. máxima)	2.660 ha
Bacia de Drenagem	1.777 km ²
Cota de Coroamento	205,00 m
Cota da Soleira (Sangria)	201,00 m
Tipo de Barragem	Terra com enrocamento
Início / Conclusão	1984 / 1987
Órgão Construtor	DNOCS / Andrade Gutierrez S/A
Órgão Gestor	COGERH / DNOCS
Coordenadas Aproximadas	Lat.: 4,19° S; Long.: 40,48° W

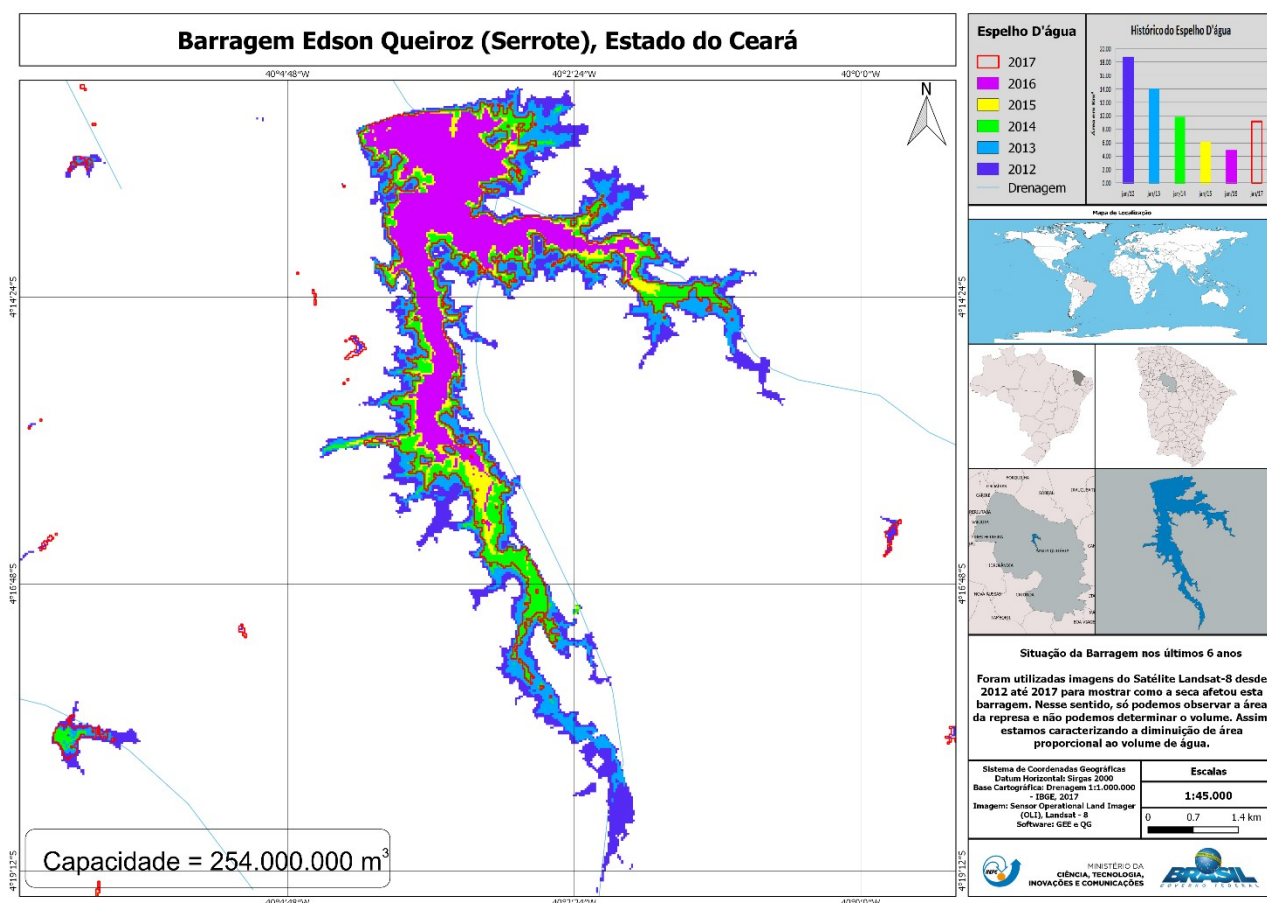
Fonte: DNOCS (2024); COGERH (2020).

Figura 1 – Imagem de satélite do Açude Edson Queiroz (Serrote), Santa Quitéria – CE.



Fonte: Google / QGIS (2026).

Figura 2 – Mapa de variação do espelho d'água e localização do reservatório Edson Queiroz (2012–2017).



Fonte: MCTIC / INPE (2017).

Plataforma Google Earth Engine e Programa Landsat

O Google Earth Engine é uma plataforma de computação em nuvem desenvolvida pela Google com o objetivo principal de realizar análises de dados ambientais em escala global. A ferramenta integra mais de 40 anos de imagens globais de satélites em um único ambiente de armazenamento e processamento, permitindo que os dados sejam computados nos próprios servidores da plataforma, sem que o usuário precise adquirir grandes volumes de dados nem dispor de infraestrutura local (GORELICK, 2017). Dados provenientes de diversas missões de satélites — incluindo Landsat, Sentinel, MODIS e outros — estão fundidos numa única localização, dispensando o utilizador de recorrer a diferentes fontes para os diferentes tipos de dados que o seu trabalho possa requerer. O poder computacional do GEE permite que um milhão de horas de CPU seja executado em poucos dias, ao dividir os dados em grades independentes processadas por centenas de CPUs em paralelo (GORELICK, 2017).

A plataforma suporta a implementação de algoritmos de análise e processamento de dados geoespaciais nas linguagens JavaScript e Python, por meio de uma API (Application Programming Interface) ou de um IDE (Integrated Development Environment), acessíveis diretamente pelo navegador (SILVA, 2018). As principais aplicações do GEE descritas na literatura incluem a detecção de desmatamento, a classificação de cobertura e uso da terra, as estimativas de biomassa florestal e carbono e o mapeamento de áreas remotas (GORELICK et al., 2017). No contexto do monitoramento hídrico, a plataforma tem sido amplamente utilizada para mapear e acompanhar temporalmente corpos d'água em escala regional e global, aproveitando as longas séries históricas de imagens Landsat para reconstruir variações de nível e volume de reservatórios ao longo de décadas.

Para este trabalho, foram utilizadas imagens das coleções USGS Landsat 5 TM Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance (período 1984–2012), USGS Landsat 7 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance (1999–2019) e USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 OLI Raw Scenes (2013–2019), todas disponíveis no GEE com resolução espacial de 30 metros e período de revisita de 16 dias. A sobreposição temporal entre as coleções do Landsat 7 e do Landsat 8 permitiu verificar a consistência dos resultados em períodos de transição entre satélites, aumentando a confiabilidade da série histórica construída.

Etapas Metodológicas

A metodologia adotada foi organizada em quatro etapas sequenciais: (1) escolha da área de estudo e análise da disponibilidade de imagens no GEE; (2) aquisição e processamento das imagens para extração da área hídrica; (3) coleta dos dados do nível da água no portal da COGERH; e (4) criação da equação de correlação Nível $\times$ Área por meio do software Scilab 6.0.

Na primeira etapa, foi analisada a disponibilidade, a quantidade e a qualidade das imagens de satélite existentes na plataforma GEE para o Açude Edson Queiroz, abrangendo todo o período histórico de operação do reservatório. Para a seleção das imagens, utilizou-se um filtro de cobertura de nuvens entre 0% e 70% (CLOUD_COVER entre 0 e 70), visando garantir a identificação confiável da área de inundação. Além do critério de nebulosidade, as imagens foram avaliadas visualmente para descartar aquelas com nuvens diretamente sobre o espelho d'água, eutrofização intensa ou artefatos de sensor que pudessem comprometer a extração da área hídrica.

Na segunda etapa, as imagens selecionadas foram processadas pelo algoritmo desenvolvido em linguagem JavaScript no Code Editor do GEE, seguindo cinco subetapas: (1) importação da

imagem de uma data específica a partir da coleção Landsat selecionada; (2) visualização pela composição de bandas B3, B4 e B5, que fornecem melhor contraste entre água e demais feições terrestres; (3) remoção de borda com buffer de -500 metros, para eliminar artefatos de borda que poderiam ser interpretados incorretamente como área hídrica; (4) identificação do corpo hídrico pela transformação para o espaço de cor HSV (Hue, Saturation, Value), em que a água apresenta valores de Hue entre 0,35 e 0,92; e (5) exportação da área hídrica em formato binário .tif com resolução de 30 metros para o Google Drive do usuário. O polígono delimitador do reservatório foi definido manualmente no GEE com base nas coordenadas do espelho d'água em capacidade máxima, assegurando que toda a extensão possível estivesse contida na região de análise.

A escolha da composição de bandas B3 (vermelho), B4 (infravermelho próximo) e B5 (infravermelho de ondas curtas) é fundamentada nas propriedades físicas da interação da radiação com a água. Corpos d'água tendem a absorver fortemente a radiação nas faixas do infravermelho próximo e de ondas curtas, resultando em valores de reflectância muito baixos nessas bandas em comparação com a vegetação e o solo exposto. Essa diferença espectral é amplificada na representação em espaço HSV, onde o Hue discrimina eficientemente a água das demais coberturas terrestres, justificando os limiares de Hue adotados neste estudo.

Na terceira etapa, os dados do nível da água foram coletados no Portal Hidrológico da COGERH (hidro.ce.gov.br) para as mesmas datas das imagens processadas. Os níveis são medidos in situ por réguas limnimétricas instaladas no reservatório. Quando não havia registro exatamente na data da imagem, utilizou-se o valor do dia mais próximo, desde que a diferença não excedesse 24 horas — procedimento justificado pela estabilidade diária do nível em reservatórios de grande porte durante períodos sem evento pluviométrico expressivo. Cada par (Área, Nível) assim obtido compõe o conjunto de observações utilizado na regressão.

Na quarta etapa, foi desenvolvido um algoritmo no software Scilab 6.0 para a criação da equação de correlação pelo método dos mínimos quadrados. As imagens binárias exportadas pelo GEE foram processadas pela biblioteca IPCV (LUH, 2019), que interpreta cada imagem como uma matriz binária: cor preta (valor 0) representa ausência de água; cor branca (valor 1) representa presença de água. A área de inundação de cada imagem foi calculada multiplicando-se o número de pixels brancos pela área real de cada pixel ($30\text{m} \times 30\text{m} = 900\text{ m}^2$).

Método dos Mínimos Quadrados e Regressão Linear

A obtenção da equação de correlação foi realizada pelo método dos mínimos quadrados, que minimiza a soma dos quadrados das distâncias verticais entre os pontos observados e a reta ajustada. A regressão linear é um processo estatístico que determina a equação matemática mais adequada para definir a relação entre duas variáveis (KILHIAN, 2019). Sendo X a área de inundação (m²) e Y o nível da água (m), a equação geral é:

$$Y = aX + b \quad (1)$$

onde a é o coeficiente angular e b o coeficiente linear. O método estima a e b minimizando $\sum_i d_i^2 = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$, em que d_i é a distância vertical entre o valor observado y_i e o estimado $\hat{y}_i$. A resolução do sistema linear de duas equações e duas incógnitas resultante fornece os coeficientes empregados na equação de correlação.

O coeficiente de determinação R^2 mede o quanto da variabilidade dos dados é explicado pelo modelo linear ajustado, sendo também chamado de coeficiente de Pearson ao quadrado. Segundo Moriasi et al. (2007), R^2 maior que 0,6 indica relação forte; entre 0,3 e 0,6, relação moderada; e menor que 0,3, relação fraca. A qualidade das imagens de satélite é fator determinante para o R^2 final: imagens com alta cobertura de nuvens sobre o espelho d'água, macrófitas aquáticas (eutrofização) ou falhas de sensor reduzem a precisão da área estimada, introduzindo dispersão nos pontos em torno da reta ajustada. Por isso, a seleção criteriosa das imagens constitui etapa central da metodologia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

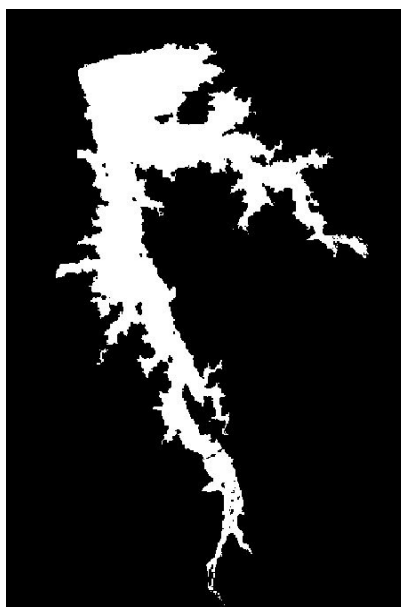
Disponibilidade e Processamento das Imagens

A análise da disponibilidade de imagens na plataforma GEE para o Açude Edson Queiroz revelou um banco de dados expressivo, abrangendo o período histórico de operação do reservatório desde meados da década de 1980. O período disponível para análise estende-se por mais de três décadas, contemplando ciclos hidrológicos distintos: anos de alta pluviosidade, com volumes próximos à capacidade máxima, e anos de estiagem severa, como o registrado entre 2012 e 2017, considerado o período de seca mais intenso das últimas décadas no Nordeste brasileiro (COGERH, 2020).

A seleção criteriosa das imagens com base na qualidade resultou em um conjunto representativo distribuído ao longo de todo o período analisado. A qualidade das imagens disponíveis para o Açude Edson Queiroz foi classificada como boa, visto que a localização do reservatório no interior do Ceará favorece imagens com boa visibilidade especialmente no período de estiagem, que coincide com os meses de maior insolação e menor cobertura de nuvens. A qualidade imagética é determinante para o desempenho do modelo: imagens com muita cobertura de nuvens ou eutrofização elevada tendem a subestimar a área do espelho d'água, introduzindo dispersão nos pares observados e reduzindo o R^2 obtido.

A Figura 3 apresenta um exemplo de imagem binária extraída do GEE para o Açude Edson Queiroz. A área branca corresponde ao espelho d'água detectado pelo algoritmo HSV, enquanto a área preta representa as demais feições terrestres dentro do polígono de estudo. A morfologia alongada do corpo hídrico, com ramificações nas margens, é característica dos reservatórios construídos em vales encaixados do embasamento cristalino nordestino, onde a geometria do substrato rochoso condiciona a forma do espelho d'água.

Figura 3 – Imagem binária extraída do Google Earth Engine para o Açude Edson Queiroz.



Fonte: Elaborada pelos autores.

O cálculo da área de inundação foi realizado contabilizando os pixels brancos de cada imagem binária e multiplicando-os por 900 m^2 ($30\text{m} \times 30\text{m}$), área real de cada pixel Landsat. Esse procedimento é executado automaticamente pelo algoritmo Scilab, que lê os arquivos .tif exportados pelo GEE, gera a matriz binária correspondente e calcula a área total. A Figura 4

apresenta a tela de saída do algoritmo com os resultados obtidos para o Açude Edson Queiroz. O tempo médio de processamento por imagem foi de aproximadamente 20 segundos.

Série Histórica de Nível e Equação de Correlação

Os dados de nível da água coletados no Portal Hidrológico da COGERH para o Açude Edson Queiroz abrangem desde o início das operações regulares do reservatório até o ano de 2019, período final das imagens utilizadas. Ao longo dessa série histórica, o reservatório apresentou variações de nível que refletem os ciclos climáticos característicos do semiárido cearense, alternando períodos de recarga intensa — associados há anos com precipitações acima da média na bacia do Rio Groaíras — e períodos prolongados de esvaziamento progressivo. O nível mínimo registrado corresponde a cotas próximas a 185 m e os máximos aproximam-se de 201 m, cota da soleira da sangria do reservatório, resultando em uma amplitude operacional de aproximadamente 16 metros.

Essa amplitude é expressiva e assegura que o modelo linear calibrado cubra toda a faixa de operação esperada para o reservatório, conferindo robustez à equação de correlação para uso em qualquer condição hidrológica. A presença da grande seca de 2012–2017 na série histórica contribuiu positivamente para a calibração do modelo, pois permitiu incluir pares (Área, Nível) para as cotas mais baixas, onde a sensibilidade da relação área-nível é maior. A correspondência temporal entre imagem e nível foi verificada rigorosamente, admitindo-se diferença máxima de 24 horas entre a data da imagem e o registro de nível no portal da COGERH.

Após a obtenção de todos os pares ordenados (Área $\times$ Nível), o algoritmo Scilab 6.0 foi executado para gerar a equação de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados. Os resultados obtidos foram: coeficiente angular $a = 0,0077981$; intercepto $b = 182,64673$; e R^2 (Pearson²) = 0,9742. A equação de correlação obtida para o Açude Edson Queiroz é, portanto:

$$Y = 0,0077981 X + 182,64673 \quad (2)$$

onde X representa a área de inundação em metros quadrados (m²) e Y representa o nível altimétrico da água em metros (m). O coeficiente de determinação $R^2 = 0,9742$ indica que aproximadamente 97,42% da variabilidade do nível d'água é explicada pela variação da área de inundação medida pelas imagens de satélite. Esse valor é muito superior ao limiar de 0,6 estabelecido por Moriasi et al. (2007) como indicativo de correlação forte, confirmando que a área de inundação extraída das imagens Landsat pelo algoritmo HSV no GEE é um estimador altamente confiável do nível

altimétrico ao longo de todo o histórico de operação do reservatório. A Tabela 2 apresenta a classificação do R^2 obtido segundo os critérios de Moriasi et al. (2007).

Tabela 2 – Resultado e classificação do coeficiente de determinação para o Açude Edson Queiroz.

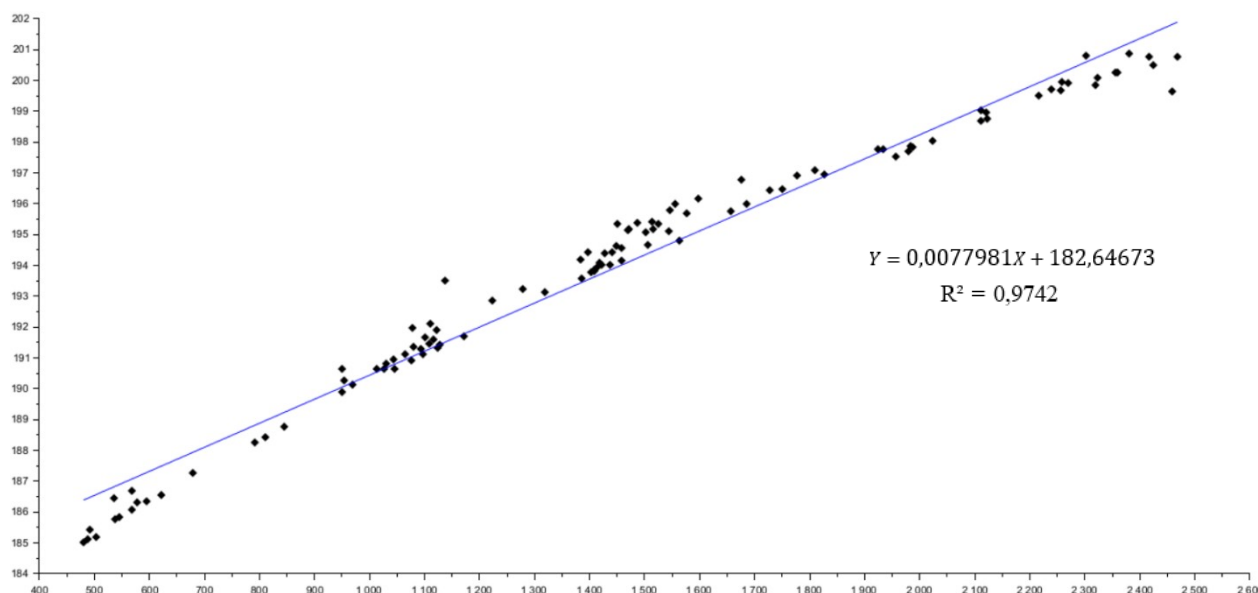
Reservatório	R^2 obtido	Classificação (Moriasi et al., 2007)
Açude Edson Queiroz (Serrote)	0,9742	Forte ($R^2 > 0,6$)

Fonte: Elaborada pelos autores (2024); Moriasi et al. (2007).

Análise Gráfica da Regressão Linear

A Figura 3 apresenta o gráfico de dispersão com a reta de regressão linear obtida para o Açude Edson Queiroz. O eixo das abscissas representa a área de inundação (X) e o eixo das ordenadas representa o nível altimétrico (Y) em metros. Os pontos correspondem aos pares observados nas imagens selecionadas e os respectivos valores de nível registrados no Portal Hidrológico da COGERH.

Figura 3 – Reta de regressão linear Cota $\times$ Área do Açude Edson Queiroz (Serrote).



Fonte: Elaborada pelos autores

A análise do gráfico evidencia notória aproximação dos pontos à reta de regressão ao longo de toda a faixa de variação do nível, confirmando o elevado coeficiente de determinação obtido. Os pontos distribuem-se de forma relativamente homogênea desde as cotas mais baixas — em torno de

185 m, correspondentes aos períodos de maior esvaziamento — até as cotas próximas de 201 m, equivalentes à soleira da sangria. Essa amplitude histórica de variação é fundamental para a robustez do modelo, assegurando que a reta ajustada seja representativa de toda a faixa operacional do reservatório e não apenas de um subintervalo específico.

A maior concentração de pontos nas cotas intermediárias é esperada para um reservatório do semiárido que opera habitualmente abaixo da capacidade máxima, sem atingir a sangria na maior parte dos anos. A dispersão residual observada nos níveis mais baixos pode ser atribuída a fatores intrínsecos ao método: em reservatórios muito esvaziados, o espelho d'água assume forma mais alongada e estreita, com maior proporção de margens expostas, tornando a detecção espectral pelo algoritmo HSV ligeiramente menos precisa. Vegetação emergente nas margens e material em suspensão na água podem influenciar a resposta espectral detectada pelo sensor Landsat, introduzindo pequenas variações na área estimada. Apesar disso, o conjunto total de pares evidencia clara tendência linear, confirmando a adequação do modelo para o Açude Edson Queiroz em toda sua faixa operacional.

A sazonalidade das imagens disponíveis também influencia a distribuição dos pares no gráfico. Durante os meses chuvosos (janeiro a junho), a cobertura de nuvens é mais frequente na região de Santa Quitéria, reduzindo o número de imagens de boa qualidade disponíveis para o intervalo de cotas mais elevadas, quando o reservatório se encontra mais cheio. Isso explica a menor densidade de pontos nas cotas próximas à sangria em comparação às cotas intermediárias e baixas. Apesar dessa assimetria natural na distribuição temporal dos pares, a representatividade do conjunto de dados foi considerada satisfatória para a calibração do modelo em toda a faixa operacional.

Aplicabilidade como ferramenta de gestão hídrica e limitações do método

A equação $Y = 0,0077981X + 182,64673$ pode ser empregada diretamente como instrumento de apoio à gestão hídrica do Açude Edson Queiroz. Em qualquer data para a qual exista uma imagem Landsat de boa qualidade no acervo do GEE — e na ausência de medição convencional naquela data —, a equação permite estimar a cota altimétrica do reservatório apenas a partir da área do espelho d'água extraída automaticamente pelo algoritmo. Essa funcionalidade é especialmente valiosa para preencher lacunas nas séries históricas de monitoramento, situação recorrente no semiárido cearense em razão de falhas de equipamentos, dificuldades de acesso e limitações de pessoal nos órgãos gestores.

Do ponto de vista da gestão do abastecimento urbano — principal uso do Açude Edson Queiroz, responsável pelo abastecimento de Santa Quitéria e do distrito de Taperuaba —, a possibilidade de monitorar o nível por dados de satélite contribui para a segurança hídrica da região, permitindo o planejamento antecipado de racionamento ou a busca de fontes alternativas. A dimensão socioeconômica é significativa: o açude sustenta não apenas o abastecimento humano, mas também atividades agrícolas, de piscicultura e de subsistência de centenas de famílias nos povoados de São Cosme e São Damião (DNOCS, 2024). O papel do reservatório como regulador de vazão do Rio Groaíras reforça ainda a necessidade de seu monitoramento contínuo, uma vez que a disponibilidade hídrica a jusante da barragem depende diretamente do nível armazenado.

A metodologia pode ser atualizada continuamente com novas imagens à medida que o satélite Landsat realiza novas passagens sobre o reservatório a cada 16 dias. Com o Landsat 9, lançado em setembro de 2021, que mantém as mesmas características espectrais e espaciais do Landsat 8, a continuidade do monitoramento está assegurada por décadas. A combinação com imagens do Sentinel-2, de resolução de 10 metros e revisita de 5 dias, também disponível no GEE, abre perspectiva de monitoramento ainda mais frequente e preciso. No âmbito das políticas públicas, essa ferramenta fortalece a governança hídrica na bacia do Acaraú, fornecendo aos gestores informações complementares sobre a disponibilidade hídrica em tempo quase real — aspecto crítico em um contexto de mudanças climáticas que tendem a intensificar a variabilidade pluviométrica no semiárido.

Entre as principais limitações do método, destacam-se: (i) a dependência da qualidade das imagens, pois em regiões com alta frequência de nuvens a disponibilidade de imagens úteis pode ser significativamente reduzida; (ii) a resolução espacial de 30 metros do Landsat, que pode introduzir erros sistemáticos em reservatórios de pequeno porte (espelho d'água inferior a 1 km²) — nesses casos, imagens Sentinel-2 (10 metros) seriam mais adequadas; (iii) a presença de macrófitas aquáticas (eutrofização), que altera a resposta espectral e pode levar à subestimação da área hídrica; e (iv) o assoreamento progressivo, que modifica a relação cota-área ao longo do tempo, exigindo recalibração periódica da equação. Para o Açude Edson Queiroz, com espelho d'água de até 26,6 km², as limitações (i) e (ii) não se mostraram relevantes, o que contribuiu para o excelente R² obtido. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a construção da curva cota-área-volume (CAV) completa do reservatório, integrando a equação aqui obtida com dados de batimetria para estimar simultaneamente o nível, a área e o volume armazenado a partir de uma única imagem de satélite.

CONCLUSÕES

O presente trabalho aplicou com sucesso a metodologia de definição do nível de reservatórios a partir de imagens de satélite ao Açude Edson Queiroz (Serrote), localizado no município de Santa Quitéria, estado do Ceará. A metodologia integrou o processamento de imagens Landsat na plataforma Google Earth Engine com a análise de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados implementado no software Scilab 6.0, gerando a equação de correlação $Y = 0,0077981X + 182,64673$ com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9742$.

O coeficiente de determinação obtido — classificado como indicativo de correlação muito forte segundo Moriasi et al. (2007) — valida a metodologia para o Açude Edson Queiroz, confirmando que a área de inundação extraída das imagens Landsat pelo algoritmo de transformação HSV no GEE é um estimador altamente confiável do nível altimétrico do reservatório ao longo de todo o seu histórico de operação. A boa qualidade das imagens de satélite disponíveis para a região de Santa Quitéria, decorrente da menor frequência de cobertura de nuvens durante o período de estiagem, foi fator determinante para o desempenho do modelo.

O sensoriamento remoto via plataforma GEE demonstrou ser ferramenta complementar valiosa para o monitoramento hidrológico de reservatórios no semiárido nordestino, capaz de preencher lacunas nas séries históricas de medição in situ de forma econômica, escalável e tecnicamente fundamentada. A equação obtida pode ser utilizada diretamente pelos órgãos gestores COGERH e DNOCS como instrumento de apoio à tomada de decisão na gestão das águas do Açude Edson Queiroz, com aplicação imediata ao planejamento do abastecimento humano de Santa Quitéria e do distrito de Taperuaba.

Para trabalhos futuros, recomenda-se: (i) a extensão da metodologia a outros reservatórios da bacia do Acaraú monitorados pela COGERH; (ii) o desenvolvimento de equações para análise de outros parâmetros hidráulicos, como o volume armazenado, pela integração das curvas cota-área-volume; (iii) a automatização da seleção e processamento das imagens por técnicas de inteligência artificial, eliminando a revisão visual manual; e (iv) a integração da ferramenta com sistemas de alerta precoce de escassez hídrica no estado do Ceará. Em síntese, a tríade metodológica Landsat–GEE–Scilab constitui abordagem robusta, acessível e replicável para o monitoramento hidrológico de reservatórios no semiárido brasileiro, com potencial de aplicação direta na gestão dos recursos hídricos da bacia do Acaraú e de outras bacias do Nordeste.

Os arquivos com as imagens (tif) e o código fonte para o ambiente do SCILAB pode ser baixado em www.profluishenrique.com.br/viiforuminternacionalsemiarido

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) pela disponibilização dos dados históricos de nível do Açude Edson Queiroz por meio do Portal Hidrológico; ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) pelas informações técnicas do reservatório; à Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA) e à Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo suporte institucional; e à Google pela disponibilização gratuita da plataforma Google Earth Engine para fins de pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

ALSDORF, Douglas E.; RODRIGUEZ, Ernesto; LETTENMAIER, Dennis P. **Measuring surface water from space**. Reviews of Geophysics, v. 45, n. 2, p. 1-24, 2007. DOI: 10.1029/2006RG000197.

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Portal Hidrológico**. Fortaleza: COGERH, 2020. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br>. Acesso em: 10 jan. 2024.

COSTA, Fernando Antônio. **Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento de reservatório no semiárido do nordeste**: Poço da Cruz, Pernambuco. 2019. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Açude Edson Queiroz**: um importante aliado no semiárido nordestino. Fortaleza: DNOCS, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/nossas-historias/acude-edson-queiroz-um-importante-aliado-no-semiarido-nordestino>. Acesso em: 10 jan. 2024.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Monitoramento de reservatórios**. Fortaleza: DNOCS, 2016. Disponível em: http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/php/comunicacao/monitoramento_de_reservatorios.php. Acesso em: 10 jan. 2024.

DUAN, Zheng; BASTIAANSEN, Wim G. M. **Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data**. Remote Sensing of Environment, v. 134, p. 403-416, 2013. DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.010.

GORELICK, Noel et al. **Google Earth Engine**: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18-27, 2017.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Geoprocessamento**: Principais Reservatórios Cearenses. São José dos Campos: INPE, 2018. Disponível em: http://geopro.crn.inpe.br/RH_reser_Ceara.htm. Acesso em: 10 jan. 2024.

KILHIAN, Kléber. **Regressão linear**. 2019. Disponível em: <https://www.obaricentrodamente.com/2010/07/regressao-linear.html>. Acesso em: 10 jan. 2024.

LUH, T. C. **Image Processing and Computer Vision Toolbox**: version 6.0. Scilab, 2019. Disponível em: <https://atoms.scilab.org/toolboxes/IPCV>. Acesso em: 04 fev. 2020.

MORIASI, D. N. et al. **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations**. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

SÁ, Luiz Alexandre de. **Utilização de imagens de satélite para determinação das curvas cota x área x volume do açude Itans, localizado no município de Caicó, Rio Grande do Norte, Brasil**. 2018. 11 f. TCC (Especialização em Geoprocessamento Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SILVA, Ana Luísa Fernandes. **Estudo de seca na Península Ibérica usando o Google Earth Engine**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica) – Universidade do Porto, Porto, 2018.

TOLEDO, Cristiane Elias; ARAÚJO, José Carlos de; ALMEIDA, Carlos Lineu de. **The use of remote-sensing techniques to monitor dense reservoir networks in the Brazilian semiarid region**. *International Journal of Remote Sensing*, v. 35, n. 10, p. 3683-3699, 2014.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Thousands of Landsat Scenes in Google's Earth Engine**. 2010. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/google-earth-engine>. Acesso em: 02 dez. 2017.

USGS – United States Geological Survey. **Landsat Data Users Handbook**. Reston: USGS, 2013. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions>. Acesso em: 10 jan. 2024.