

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AQUISIÇÃO E MOSAICAGEM DE DADOS LiDAR E BATIMÉTRICOS PARA PEQUENOS AÇUDES - CRATEÚS CE

Ricardo Duarte de Oliveira 1 & Dr. Júlio César da Silva 2

Abstract:

Integrating bathymetry and LiDAR data enables the creation of a Digital Terrain Model (DTM) that represents both the emerged and submerged topography of the reservoirs. For this, both datasets must be adjusted to the same coordinate system and altimetric references, ensuring compatibility and accuracy in surface representation.

This work is based on the methodology described by the author, from the treatment of data collected in three reservoirs near Crateús. The process included the determination of geodetic support points, bathymetry, LiDAR profiling, geometric leveling, and data organization.

Resumo:

A integração da batimetria e dos dados LiDAR possibilita a criação de um Modelo Digital de Terreno (MDT) que representa a topografia emersa e submersa dos reservatórios. Para isso, ambos os conjuntos de dados devem ser ajustados ao mesmo sistema de coordenadas e referenciais altimétricos, garantindo compatibilidade e precisão na representação da superfície.

Este trabalho é baseado na metodologia descrita pelo autor a partir do tratamento de dados coletados em três reservatórios próximos a Crateús. O processo incluiu a determinação de pontos de apoio geodésicos, batimetria, perfilamento LiDAR, nivelamento geométrico e organização dos dados.

Palavras-Chave – Pequena açudagem; MDT; Topografia com drones

1) Universidade do Estado Rio de Janeiro - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, Rio de Janeiro – RJ – CEP 20550-900, e-mail: ricardoddol@gmail.com

2) Universidade do Estado Rio de Janeiro - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, Rio de Janeiro – RJ – CEP 20550-900, e-mail: jcesarop@gmail.com

INTRODUÇÃO

A união da batimetria e da nuvem de pontos LiDAR envolve a integração de dois conjuntos de dados distintos para criar um Modelo Digital de Terreno (MDT) completo, representando tanto a topografia emersa quanto a submersa dos reservatórios.

Os dados utilizados neste estudo de caso foram obtidos no município de Crateús que está localizado no oeste do estado do Ceará, na região conhecida como sertão cearense e encontra-se no semiárido brasileiro. Com 2.981,459 km² de área e uma população de 76.390 pessoas segundo o censo IBGE de 2023 sendo o mais populoso de sua região geográfica imediata com 25,62 habitante por quilômetro quadrado (IBGE, 2022).

Foram escolhidos 3 reservatórios distribuídos num raio de até 50 km a partir de Crateús – CE. Em agosto/setembro de 2022 foram executados os perfilamentos a laser assim como a aquisição dos dados batimétricos. Esses dados foram processados gerando os Modelos Digitais de Terreno e Superfície e ortofotomosaicos. As determinações das referências de nível e demais pontos de controle foram determinados a partir de um ponto base para cada reservatório por rastreio GNSS corrigidos pelo serviço PPP-IBGE.

A obtenção de dados confiáveis e interrelacionáveis dependem de processos de aquisição e processamento realizados com acurácia necessária para uma boa representação da superfície contínua do sistema submerso e emerso.

EQUIPAMENTOS E SOFTWARES

GNSS (Global Navigation Satellite System)

É um sistema global de navegação por satélite que permite determinar a posição geográfica de um rastreador em qualquer lugar do planeta. São utilizadas para a determinação, constelações de satélites, como GPS (EUA), GLONASS (Rússia), Galileo (Europa) e BeiDou (China), fornecendo coordenadas precisas de latitude, longitude e altitude.

Perfilador LiDAR

O LiDAR (Light Detection and Ranging) é uma tecnologia de sensoriamento remoto que utiliza pulsos de laser para medir distâncias entre o sensor e a superfície terrestre. Ele gera uma nuvem de pontos tridimensional que representa a topografia e os objetos presentes no ambiente

Plataforma de transporte do lidar

Por se tratar da representação de pequenos reservatórios, normalmente serão utilizados RPAs (Aeronave Remotamente Pilotada - *Remotely Piloted Aircraft*), seja, de asa fixa ou rotativa, o que melhor convir à execução do perfilamento. A aeronave é utilizada como plataforma aérea para realizar levantamentos topográficos e monitoramento dos reservatórios sendo equipado com o sensor, que integra tecnologia LiDAR, câmera RGB e sistema de navegação inercial (IMU).

Batímetro

A batimetria é a técnica de medição da profundidade de corpos d'água e da topografia submersa. A batimetria será utilizada para mapear o fundo dos reservatórios dando-nos a possibilidade de modelar a superfície submersa.

Softwares de processamento

Para o processamento, análise, modelagem e publicação dos dados obtidos em campo, são necessários softwares de reconstrução de nuvem de pontos, topografia e SIG. Esses softwares possuem as seguintes funções no escopo deste tipo de trabalho:

COLETA DE DADOS DE CAMPO

A exequibilidade e qualidade do produto cartográfico é determinada pela coleta dos dados a serem utilizados no apoio, análises e complementação do estudo. Dados obtidos em campo ou em fontes prévias geradas por outros autores ou em acervo próprio, devem ser confiáveis e compatíveis em escala, projeção e tema com os demais dados e principalmente com o produto a ser gerado e publicado.

Determinação de pontos de apoio:

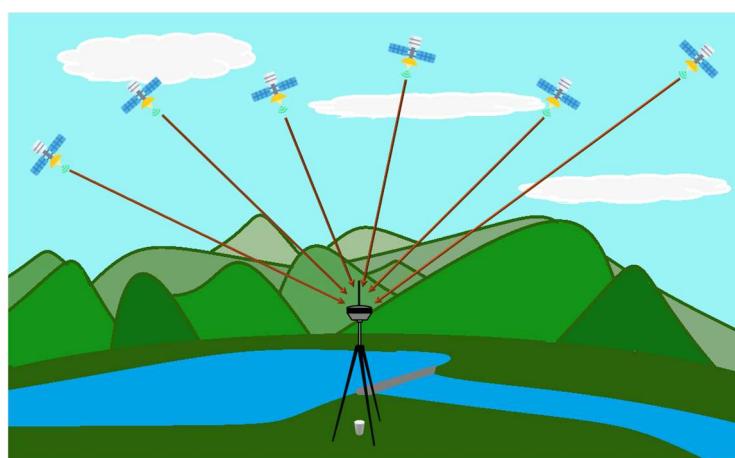
A determinação de pontos de apoio consiste no estabelecimento de coordenadas precisas (latitude, longitude e altitude) de pontos fixos na superfície terrestre, servindo como referência para levantamentos topográficos, mapeamentos e projetos de engenharia. Esses pontos, podem ser chamados de marcos geodésicos quando materializados fisicamente por estruturas como pilares, placas ou pinos metálicos, e possuem posições calculadas com alta precisão em relação a um sistema de referência global, nacional, regional ou local (1).

O processo envolve o uso de receptores GNSS (Global Navigation Satellite System), que captam sinais de satélites (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou) para obter coordenadas tridimensionais com margens de erro absoluto centimétricos. Em áreas onde haja a impossibilidade de utilizar o rastreamento de satélites, métodos clássicos como triangulação, trilateração ou nívelamento geométrico também podem ser aplicados. Além disso, os pontos de apoio são integrados a redes geodésicas hierárquicas, que incluem estações de referência de alta precisão (RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, por exemplo) e pontos secundários interligados.

A determinação de pontos de apoio serve como base para correção de dados e integração entre batimetria, perfilamento LiDAR e outros levantamentos periféricos ou épocas, conectando medições locais a sistemas de coordenadas globais e garantindo a integridade de dados em escalas locais ou regionais.

Normalmente são utilizados um ou mais rastreadores GNSS com correção por PPP ou por dupla diferença para determinação dos pontos base onde todos os demais pontos de referência serão referenciados, como RN e pontos de decolagem, este último se refere ao local onde se estaciona o receptor GNSS que será utilizado para corrigir a trajetória do drone por RTK ou PPK. Conforme a Figura 1.

Figura 1 - Receptor GNSS em determinação absoluta



As determinações das bases, a depender da incerteza máxima admissível, pode levar até 17 dias, que é o tempo máximo (normal) para a publicação das correções das órbitas precisas de satélites

GNSS, posições e velocidades das estações da rede global, soluções de relógio para estações e satélites, entre outros pelo IGS (International GNSS Service). Além disso, há diferentes níveis de produtos, como Final, Rápido e Ultrarrápido, com variações na precisão e tempo de latência. O serviço IBGE-PPP utiliza dados de órbitas e relógios de satélites fornecidos pelo IGS para rastreios fora do Brasil e pelo NRCan para rastreios dentro do país, com diferenças leves nas acuráncias e latências entre os dois provedores (2).

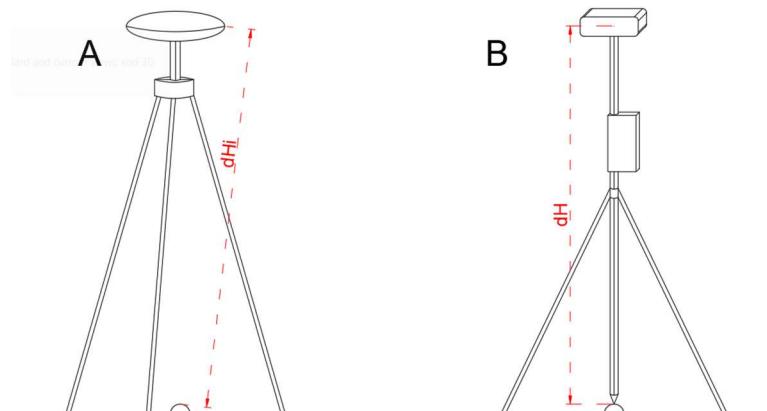
Tabela 1 - Efemérides dos produtos NRCan para a constelação GPS (2)

Tipo	Acurácia	Latência	Taxa de Amostragem
Ultrarrápida (EMU)	~15 cm	1,5 – 2,5 horas após o fim do rastreio até a disponibilidade das órbitas EMR	
Rápida (EMR)	~5 cm	12 – 36 horas após o fim do rastreio até a disponibilidade das órbitas EMF	15 min
Final (EMF)	~2 cm	11 – 17 dias após o fim do rastreio	

Alguns fabricantes possuem serviços próprios de PPP, como por exemplo a Trimble que pelo site Survey Tools (<https://gnss-processor.trimbleaccess.com/gnssprocessor>) pode processar arquivos proprietários e Rinex. Deve-se atentar para o sistema geodésico das coordenadas calculadas. O PPP-IBGE sempre vai gerar o resultado no sistema geodésico oficial do Brasil e atualmente não possui outra opção, assim, para trabalhos feitos para se correlacionar com outros dados nacionais, dificilmente haverá necessidade de utilizar outro serviço.

A medição da altura do receptor e determinação do ARP (Antenna Reference Point) é um dos momentos críticos das determinações GNSS. O ARP é o ponto físico de referência em uma antena GNSS, utilizado como base para medições precisas de posicionamento. Pode ser determinado pela medição inclinada ou diretamente em se conhecendo a altura do suporte da antena como na utilização de bastões de medida conhecida ou plataformas fixas. Na figura 2 A e 2 B é representada as formas de medida do ARP, por medida inclinada e direta respectivamente. Nas medidas inclinadas, normalmente existe uma borda de referência para que a medida seja feita entre o centro do marco já colimado e essa marcação.

Figura 2 - Base R8s (A) e Base D-RTK2 (B) instaladas



Normalmente os softwares proprietários já transformam essa medida inclinada em medida vertical até o ARP porém na impossibilidade de se obter automaticamente, é possível calcular o ARP por uma equação simples onde são usadas as medidas do diagrama da antena. Os diagramas de praticamente todas as antenas existentes no mercado estão disponíveis em <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/> (3).

Tendo as medidas dadas pelo diagrama por aplicação da equação 1

$$H = \sqrt{d^2 - H_i^2} - h \quad (1)$$

Onde:

Há a altura do ARP

d é a distância horizontal entre a borda e o eixo da antena.

H_i é a distância inclinada entre o centro do marco e a borda da antena (medida).

H_1 é a distância inclinada entre o centro do marco e a borda da antena (medida), h é a distância vertical entre a borda da antena onde se faz a medição e o ARP.

A altura do Δ RRP é a referência utilizada no cálculo das coordenadas no serviço PPP.

O tempo de ocupação e taxa de amostragem irão determinar a qualidade dos resultados. Quanto maior o tempo, maior será a quantidade de amostras, refinando assim o resultado, porém o ganho de qualidade tende a reduzir após as 3 horas de observações. Ainda há ganho, mas se torna menos relevante.

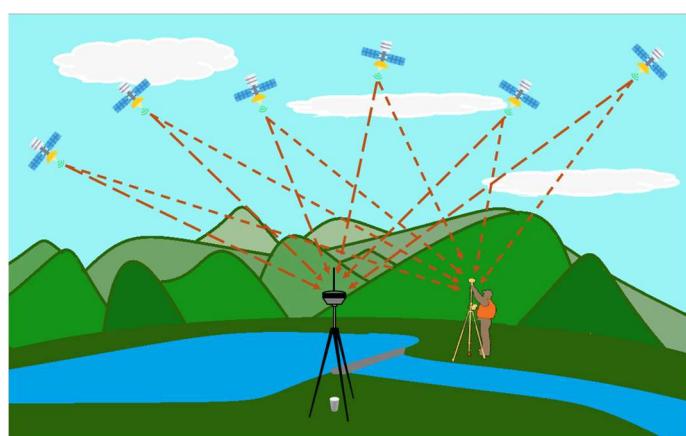
A taxa de amostragem utilizada para processamento no serviço PPP-IBGE é de 15 segundos (4), portanto é possível utilizar outras taxas de amostragem mesmo considerando-se que só serão aproveitadas épocas múltiplas de 15 segundos no horário GNSS, assim caso seja necessário é possível por exemplo rastrear com intervalo de 1 segundo, porém, para o cálculo do PPP serão aproveitados um registro a cada 15 segundos, como exemplificado na

Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Intervalos de amostragem

Durante o rastreio para a determinação das coordenadas do ponto BASE, pode-se simultaneamente determinar os demais pontos de apoio como ponto de decolagem, RN, NA (com ou sem correção por nívelamento geométrico) e demais pontos de interesse. A determinação desses pontos será resolvida por dupla diferença, assim o rastreio destes deve ocorrer no mesmo intervalo de tempo em que se esteja rastreando o ponto BASE (figura 4).

Figura 4 – Determinação de ponto de apoio referenciado à BASE



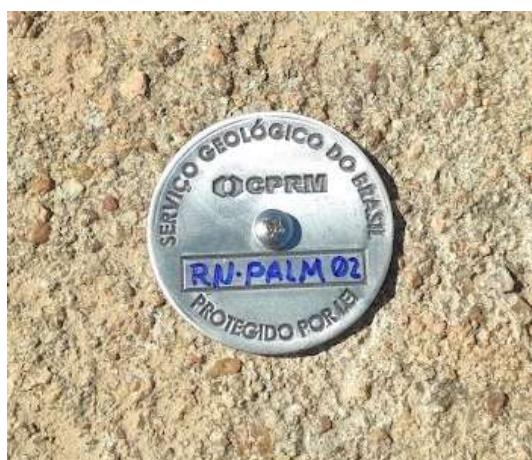
A correção por dupla diferença é calculada em escritório por software especializado normalmente fornecido juntamente com os receptores GNSS.

Materialização de Marcos Geodésicos:

Os pontos de referência podem ser materializados com placas de identificação, conforme a Figura 5 para facilitar revisitas e garantir a consistência dos dados observando que a qualidade e esforço da materialização deve ser proporcional à probabilidade de reocupação em um determinado tempo. Os pontos base são os que merecem maior atenção para que, em trabalhos futuros seja possível correlacionar os resultados assim como as RNs.

É importante que se tenha boa visibilidade do céu para evitar interferências nos sinais captados que podem aumentar a incerteza da determinação. Locais sob árvores, construções, rede elétrica (principalmente de alta voltagem) devem ser evitados. A escolha do local também deve considerar que a partir deste ponto será feita também o nivelamento para o NA.

Figura 5 - RN instalada à borda do reservatório Palmares



Batimetria

A batimetria de um pequeno corpo d'água, como um lago, açude ou represa, é um processo técnico que inclui etapas sequenciais para mapear a profundidade e a topografia do fundo. Na etapa de planejamento e preparação, são definidos os objetivos do estudo (como cálculo de volume ou monitoramento ambiental), revisando dados existentes (mapas, imagens de satélite) e selecionando os equipamentos adequados.

Deverão ser coletados os dados batimétricos por meio de navegação sistemática em linhas paralelas ou grades, com velocidade baixa e constante, utilizando barcos ou plataformas equipadas com ecobatímetros. Com o auxílio de receptores GNSS, coordenadas geográficas e profundidades são registradas associativamente em intervalos regulares, enquanto medições manuais podem complementar os dados em áreas de difícil acesso com pequena lâmina d'água. O NA deverá ser medido preferencialmente ao início e fim do levantamento batimétrico.

O ecobatímetro deve ser calibrado utilizando uma placa metálica descida verticalmente para ajustar a velocidade do som emitido, considerando fatores como temperatura, salinidade e turbidez da água (5).

Após a coleta, os dados passam por pós processamento, que inclui correções de nível d'água, filtragem de interferências (como detritos) e georreferenciamento preciso em softwares como RELIANCE v4.0, SONAR 2000. Complementarmente softwares de SIG são usados para interpolar as informações e gerar modelos digitais de elevação (MDE), possibilitando a posterior mosaicagem

com os dados topográficos da área seca permitindo calcular volume, área superficial e relações profundidade-área.

Perfilamento LiDAR:

Os dados provenientes de perfilamento LiDAR podem ser utilizados multidisciplinarmente, sendo possível a sua utilização, além do propósito original, em monitoramento, cadastro, e outras finalidades onde o qualitativo e quantitativo de reserva d'água, mata ciliar e morfologia sejam dados importantes.

Durante o pré-voo, é necessário que as áreas dos reservatórios sejam definidas por imagens de satélite ou mapas georreferenciados. É preferível gerar os polígonos que limitarão as áreas dos voos, no caso de voos semiautônomos, em softwares GIS verificando se há alguma feição que possa interferir no planejamento ou execução do voo. Os polígonos representam a área do reservatório acrescido de uma margem suficiente para representar as cotas máximas e o contexto do entorno. Esse polígono pode ser gerado a partir de um MDT de média resolução como o ANADEM onde o limite é a curva de nível logo acima da capacidade máxima do reservatório.

Para representar quaisquer elementos presentes como ilhas, mesmo que minúsculas, gerando assim um MDT mais completo, pode ser executado um plano de voo automático do tipo área, onde definindo-se um polígono, altura e sobreposição, o próprio aplicativo do controle remoto gera uma trajetória conforme presentada na Figura 6 A.

Figura 6 - Mapa da rota do levantamento do reservatório Governo (2022)



A

B

Perfilamentos mais expeditos, sendo executados de forma manual, contornando os reservatórios e promovendo uma sobreposição lateral com duas a três faixas pode ser feito quando não há necessidade de detalhamentos da região interna do reservatório servindo também para atualizar a área da lâmina d'água e a morfologia das áreas no entorno. Um exemplo desse tipo de trajetória pode ser visto na Figura 6 B.

Os voos são apoiados por bases de referência determinadas a partir de um ponto base ou de uma RN para a determinação das coordenadas do ponto da instalação do GNSS de correção da trajetória. É possível tomar como referência a determinação do centro de fase do próprio receptor, porém, para se manter um sistema de referências correlato, adota-se uma base de referência para todas as determinações geodésicas, inclusive o ponto de decolagem. Dessa forma, para o ponto de decolagem pode-se determinar dois pontos, um no centro de fase, ou seja, sem inserir nenhuma altura, e um outro logo abaixo na altura do solo, com altura do ARP.

Nivelamento Geométrico:

Para correlacionar com precisão o NA ao sistema de referências adotado no levantamento, é aconselhável promover o nivelamento geométrico entre o ponto base, a referência de nível (RN) e o nível d'água. O nivelamento geométrico é o mais preciso entre os demais métodos de nivelamento (6):

A norma ABNT NBR 13133 nos dá o passo a passo para realizar o nivelamento geométrico sendo aconselhável seu estudo.

Organização dos Dados:

A organização, teste e salvaguarda dos dados é tão importante quanto todas as outras etapas. Os dados obtidos devem estar completos e a verificação ainda durante a estada em campo garante que não haverá falhas no trabalho necessitando de revisitas que podem ser tão dispendiosas quanto a campanha original.

Os dados devem estar organizados de forma a facilitar o pós processamento e deve ser feito mais de uma cópia em dispositivos diferentes sob a guarda, preferencialmente de pessoas distintas para que caso haja a quebra ou extravio da mídia onde se encontra o arquivo, seja menos provável que o mesmo ocorra com a cópia.

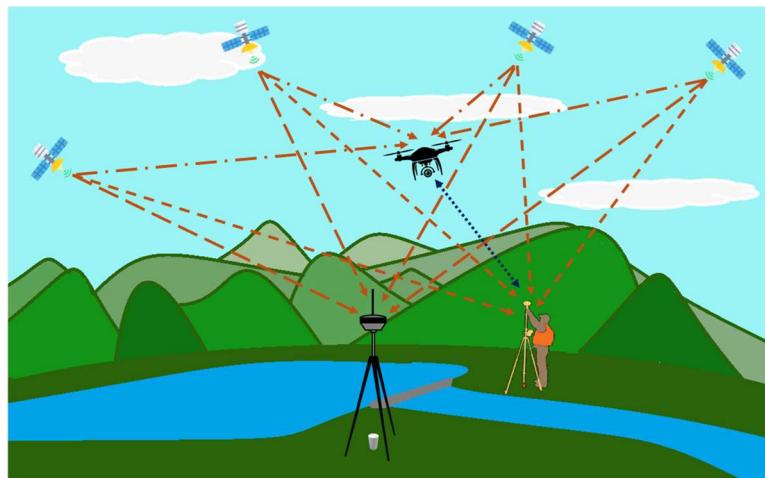
PROCESSAMENTO DOS DADOS

O método de processamento e análise de dados utilizando tecnologias avançadas de sensoriamento remoto, como o perfilamento a laser (LiDAR) e fotografias aéreas é executado em software GIS onde são aplicados filtros para eliminar ruídos e classificar os pontos, destacando superfícies como solo e lâmina d'água. Os dados brutos gerados são inicialmente processados num software de reconstrução da nuvem de pontos que gera modelos 3D detalhados e informações georreferenciadas.

Processamento dos dados obtidos por perfilamento a laser

O conjunto de dados brutos coletados são primeiramente processados em software de reconstrução onde para cada voo é possível ajustar as coordenadas da base RTK/PPK, responsável por corrigir as posições da trajetória durante a aquisição de dados. Essas coordenadas corrigidas são obtidas por dupla diferença a partir do ponto base (Figura 7).

Figura 7 - Sistema de correção entre os pontos de apoio e a aeronave



Sem essa correção, o georreferenciamento absoluto do produto final estará incorreto impossibilitando a boa correlação com outros dados ou até mesmo voos complementares e revisitas.

É importante ter em mente que dados hiper abundantes podem se tornar um problema computacional, tanto pelo esforço e tempo para o processamento em todas as etapas, quanto a necessidade de espaço de armazenamento.

Características das nuvens de pontos (arquivos LAS)

No software GIS a nuvem de pontos, já reconstruída é ajustada para que seja extraído dela as informações necessárias georreferenciadas, projetadas e tratadas possibilitando uma melhor abstração da realidade.

O projeto GIS é configurado para calcular as áreas sem deformações já que o produto final depende basicamente da qualidade de determinação das áreas, para isso é adotada uma projeção conforme, por exemplo a projeção de Lambert conforme os parâmetros da Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Parâmetros da projeção de Lambert adotada

Projected Coordinate System	SIRGAS 2000 Brasil Lambert
Projection	Lambert Azimuthal Equal Area
Authority	Custom
Linear Unit	Meters (1,0)
False Easting	5.000.000,0
False Northing	10.000.000,0
Central Meridian	-54,0
Latitude Of Origin	0,0

O objetivo principal é obter um MDT que represente com precisão a superfície real do terreno, permitindo análises detalhadas sobre a capacidade de armazenamento de água dos reservatórios.

O processo inclui a filtragem da nuvem de pontos, a classificação dos dados e a geração de modelos digitais. É possível a partir do perfilamento a laser, pós processamento dos dados brutos e classificação da nuvem de pontos modelar a superfície do solo mesmo abaixo da vegetação. Esse produto é fundamental para gerar um Modelo Digital de Terreno (MDT), propriamente dito.

Mosaico entre os dados LiDAR e batimétricos

A união da batimetria e da nuvem de pontos LiDAR envolve a integração de dois conjuntos de dados distintos para criar um Modelo Digital de Terreno (MDT) completo, representando tanto a topografia emersa quanto a submersa dos reservatórios.

Ambos os conjuntos de dados (batimetria e LiDAR) precisam ser transformados para o mesmo sistema de coordenadas garantindo compatibilidade espacial. Os referenciais altimétricos também precisam ser ajustados evitando uma falsa representação da superfície.

A densidade da nuvem de pontos pode ser reduzida para aproximar-se à densidade da batimetria, garantindo uniformidade na integração. Pode-se adotar uma densidade de 0,8 a 1 ponto por metro quadrado.

Pontos redundantes na batimetria ou com profundidade zero devem ser removidos, pois não representam informações úteis para a modelagem. Por se tratar de um dado discreto com muito menos amostras que a nuvem de pontos LiDAR, é importante que sejam testados diferentes métodos de interpoladores e representações para que seja extraído o melhor resultado possível.

Interpoladores como krigagem e bilinear podem criar superfícies contínuas a partir de pontos discretos gerando uma superfície mais densa aproximando-se da densidade da nuvem de pontos agora já degradada. Essa superfície pode ser mosaicada diretamente com o MDT da parte emersa ou fazer

a regressão para pontos, mais densos que a batimetria original e gerar um novo raster com a interpolação das duas nuvens de pontos.

A criação de um TIN (Triangulated Irregular Network) é uma opção caso a mosaicagem não tenha um resultado satisfatório. O TIN representa a superfície como uma malha de triângulos irregulares, adaptando-se à complexidade do relevo. Não promove a suavização da superfície, porém se mantém fiel aos pontos (vértices) originais.

A integração resulta num MDT detalhado, que permite análises precisas das áreas inundadas, volumes de água e características morfológicas dos reservatórios.

REFERÊNCIAS

1. ABNT. *Execução de levantamento topográfico - NBR 13133*. Rio de Janeiro: ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994. NBR 13133
2. ANA. *Levantamentos Topobatimétricos e Geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN)*. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2021. ISBN 978-65-88101-11-7.
3. Guimarães, C. L.; Ribeiro, G. N.; Vieira, L. S. Levantamento batimétrico do açude paraíso, são francisco – pb. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*. 2009, Vol. 4, 1.
4. IBGE. *RESOLUÇÃO PR nº 22, de 21 de julho de 1983*. s.l. : IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1983.
5. IBGE. *IBGE-PPP: Serviço on-line para*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2023.
6. IBGE. Modelo para conversão de altitudes. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. [Online] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2022. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/31283-hgeohnor2020-modeloconversaoaltitudesgeometricasgnss-datumverticalsgb.html?=&t=processar-os-dados>.
7. IGS. Products. *International GNSS Service (IGS)*. [Online] 2024. <https://www.igs.org/products>.
8. NOAA. Antenna Calibrations. [Online] National Oceanic and Atmospheric Administration, 2022. <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>.