UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS E ESTUDOS AMBIENTAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL

MARIANA ABIBI GUIMARÃES ARAUJO BARBOSA

Avaliação do assoreamento no reservatório do Lobo – Itirapina/SP:
comparação entre os levantamentos batimétricos de 2010 e 2018

São Carlos

2019

MARIANA ABIBI GUIMARÃES ARAUJO BARBOSA

Avaliação do assoreamento no reservatório do Lobo – Itirapina/SP:
comparação entre os levantamentos batimétricos de 2010 e 2018

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como requisito para a obtenção do
Título de Mestre em Ciências da Engenharia
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pela autora.

B238a Barbosa, Mariana Abibi Guimarães Araujo
Avaliação do assoreamento no reservatório do Lobo -
Itirapina/SP: comparação entre os levantamentos
batimétricos de 2010 e 2018 / Mariana Abibi Guimarães
Araujo Barbosa; orientador Frederico Fabio Mauad. São
Carlos, 2019.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e
Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2019.

1. Batimetria. 2. Assoreamento. 3. Cota-Área-Volume.
4. Reservatório. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **MARIANA ABIBI GUIMARÃES ARAUJO BARBOSA.**

Título da dissertação: "Avaliação do assoreamento no reservatório do Lobo – Itirapina/SP".

Data da defesa: 07/02/2019.

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Dr. **Artur José Soares Matos**
(Serviço Geológico do Brasil/CPRM)

Profa. Dra. **Ana Paula Moni Silva**
(Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad, pela oportunidade, orientação, apoio e disponibilidade de infraestrutura do Núcleo de Hidrometria para realização deste trabalho.

A minha família, simplesmente pelo amor e valor de estarem sempre presentes. Em especial aos meus pais, Alexandre e Rita, e minha irmã, Laura, pelo apoio as minhas escolhas na vida e por serem os melhores exemplos.

Ao técnico do Núcleo de Hidrometria e amigo, Waldomiro Antônio Filho, por compartilhar sua experiência. E a todos os outros funcionários do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais.

Aos amigos do Núcleo de Hidrometria, pela convivência, colaboração e conversas durante o café. Um especial agradecimento à turma 2017: Allita Rezende dos Santos, por entender as horas boas e difíceis; Gabriela Leite Neves e Tainá Thomassim Guimarães, pelo carinho e valiosa parceria desde o começo; e Phelipe da Silva Anjinho, pela motivação, paciência e companhia, que fez as horas em São Carlos serem melhores.

À Prof. Dra. Dalva Maria de Castro Vitti, pela amizade, paciência e disponibilidade, sem a qual o trabalho de campo não teria sido uma tarefa fácil.

Ao Dr. Artur José Soares Matos, pela inestimável ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, pelos ensinamentos e contribuições acadêmicas.

Às velhas amigas, que não se importam com localização e distância, e continuam presentes, sendo imprescindíveis nesta caminhada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

RESUMO

BARBOSA, M. A. G. A. **Avaliação do assoreamento no reservatório do Lobo – Itirapina/SP**: comparação entre os levantamentos batimétricos de 2010 e 2018. 2019. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Os reservatórios são causas significativas de alterações no ciclo hidrossedimentológico e, ao mesmo tempo, sofrem grandes impactos por efeitos de retroalimentação. A intensificação do processo de deposição de sedimentos com a presença de reservatórios gera impactos no ecossistema da bacia e no próprio reservatório, que pode ter sua capacidade reduzida pelo assoreamento. Neste contexto, a Agência Nacional de Águas (ANA) estabelece orientações para a atualização da curva Cota x Área x Volume (CAV), por meio da Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 03 de 2010, que visa monitorar as condições de assoreamento dos reservatórios; e pode subsidiar o gerenciamento dos recursos da bacia hidrográfica. Com isso, o objetivo deste estudo é avaliar o assoreamento e gerar nova curva CAV para o reservatório do Lobo – Itirapina/SP – a partir da comparação entre as batimetrias realizadas nos anos 2010 e 2018. O levantamento batimétrico de 2018 seguiu as recomendações da resolução citada, bem como os procedimentos realizados em 2010, a fim de se obter uma comparação entre dados de metodologias coincidentes. A coleta de dados foi feita a partir de 3 principais dispositivos: ecobatímetro, *Differential Global Positioning System (DGPS) Real Time Kinematic (RTK)* e *software* de levantamento hidrográfico. Em seguida, o processamento dos dados gerou mapas indicadores de áreas de assoreamento e volumes correspondentes. A atualização da curva CAV a partir dos dados finais encontrados mostra que o reservatório não sofreu perdas significantes de volume, sendo o volume em 2010 igual a $23,9 \text{ hm}^3$ e, em 2018, $23,8 \text{ hm}^3$, correspondendo a uma perda de 0,4% em volume. Diferentes ferramentas utilizadas no processamento dos dados possibilitaram a discretização da comparação entre os volumes, sendo possível identificar o volume de 2018 que se encontra abaixo ou acima da superfície de referência 2010. O volume localizado abaixo da referência representa 1,3% do volume total e o volume localizado acima, que indica áreas assoreadas, representa 1,7% do volume total. Assim, este trabalho pode contribuir com considerações sobre diversos fatores que podem alterar resultados de comparações de batimetrias, seguindo esta metodologia. As considerações sobre a configuração dos equipamentos e sobre as recomendações da Resolução nº 03 de 2010 são relevantes na busca por resultados cada vez mais precisos na análise do assoreamento de reservatórios. Logo, espera-se que este resultado possa servir como contribuição em futuros estudos relacionados à análise de assoreamento por meio de

comparação de batimetrias; e possa auxiliar o planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do ribeirão do Lobo.

Palavras-chave: Batimetria. Assoreamento. Cota-Área-Volume. Reservatório.

ABSTRACT

BARBOSA, M. A. G. A. **Silting estimation in the Lobo reservoir - Itirapina/SP: comparison between the bathymetric surveys of 2010 and 2018.** 95 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Reservoirs are significant causes of changes in the hydrosedimentological cycle and, at the same time, suffer great impacts by feedback effects. The intensification of the sediment deposition process in the presence of reservoirs generates impacts on the basin ecosystem and on the reservoir itself, which may have its capacity reduced by silting. In this context, the National Water Agency (ANA) establishes guidelines for updating the Elevation x Area x Volume (CAV) curve, by means of ANEEL/ANA Joint Resolution No. 03 of 2010, which aims to monitor the silting conditions of reservoirs; and can support the management of river basin resources. The objective of this study was to evaluate the sedimentation and generate a new CAV curve for the Lobo reservoir - Itirapina/SP - from the comparison between the bathymetry performed in the years 2010 and 2018. The bathymetric survey of 2018 followed the recommendations of the resolution as well as the procedures carried out in 2010, in order to obtain a comparison between data from matching methodologies. The data collection was done with 3 main devices: Echo Sounder, Differential Global Positioning System (DGPS) Real Time Kinematic (RTK) and software for hydrographic survey. Then, the data processing generated maps indicating silting areas and corresponding volumes. The updating of the CAV curve with the final data found shows that the reservoir did not suffer significant losses of volume, since the volume in 2010 equals to 23.9 hm^3 and, in 2018, to 23.8 hm^3 , corresponding to a loss of 0.4% in volume. Different tools used in the data processing allowed the discretization in the comparison between the volumes, and it is possible to identify the volume of 2018 that is below or above the 2010 reference surface. The volume located below the reference represents 1.3% of the total volume and the volume located above, which indicates silted areas, represents 1.7% of the total volume. Thus, this work can contribute with considerations about several factors that can alter results of comparisons of bathymetry, following this methodology. The considerations on the configuration of the equipment and on the recommendations of the Resolution nº 03 of 2010 are relevant in the search for more precise results in the analysis of reservoir siltation. Therefore, it is expected that this result may serve as a contribution for future studies related to the silting analysis by comparing bathymetry; and can assist in the planning and management of water resources in the catchment area of the Lobo stream.

Keywords: Bathymetry. Silting. Elevation-Area-Volume. Reservoir.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação do transporte de sedimentos.....	26
Figura 2 – Padrões de deposição de sedimentos.	28
Figura 3 – Vetores de velocidade do escoamento e forças exercidas sobre as partículas de fundo ‘A’ e em suspensão ‘B’.	29
Figura 4 – Localização da bacia hidrográfica do reservatório do Lobo.	41
Figura 5 – O reservatório do Lobo e seu entorno.	42
Figura 6 – Medição acústica de profundidade.....	45
Figura 7 – Ecobatímetro Bathy 500MF e transdutor.	46
Figura 8 – Montagem para calibração bar-check.	47
Figura 9 – Tela Survey do HYPACK®.....	49
Figura 10 – Linhas de sondagem na tela do HYPACK®. Distanciamento de 100 metros.	51
Figura 11 – Montagem dos equipamentos para levantamento batimétrico com DGPS RTK..	52
Figura 12 – Exemplo de tela do editor Single Beam Max do HYPACK®.....	53
Figura 13 – Seção pós eliminação manual dos erros grosseiros.....	54
Figura 14 – Tratamento dos dados de seção pela ferramenta smooth e filter.	54
Figura 15 – Localização dos pontos de verificação na tela do HYPACK®.....	57
Figura 16 – Toughbook e antena GNSS.....	57
Figura 17 – Seções transversais das batimetrias 2010 e 2018.	59
Figura 18 – Modelo TIN do leito do reservatório do Lobo em 2010 e 2018.	61
Figura 19 – Modelo raster do leito do reservatório do Lobo em 2010 e 2018.	62
Figura 20 – Comparação entre os dados 2010 e 2018. Diferença entre superfícies TIN (esquerda); Álgebra de mapas entre superfícies raster (direita).	63
Figura 21 – Curva CAV: Reservatório do Lobo 2010/2018.	64
Figura 22 – Comparação entre medições da seção 60 com variação da velocidade do som configurada no ecobatímetro.	66
Figura 23–Variação das medidas das 3 seções teste em relação ao levantamento de 2010.	67
Figura 24 – Comparação entre os dados 2010 e 2018_sv1484. Diferença entre superfícies TIN (esquerda); Álgebra de mapas entre superfícies raster (direita).	68
Figura 25 – Divisão de setores para cálculo das diferenças médias.....	69
Figura 26 – Comparação entre os dados 2010 e 2018_ajustado. Diferença entre superfícies TIN (esquerda); Álgebra de mapas entre superfícies raster (direita).....	70

Figura 27 – Curva CAV: Reservatório do Lobo 2010/2018_ajustado.....	71
Figura 28 – Relação entre profundidades dos modelos TIN e coletadas por corda graduada. 72	
Figura 29 – Tela da controladora do GNSS com destaque na precisão dos dados.	74
Figura 30 - Comparação entre medições da seção 23 com variação da velocidade do som configurada no ecobatímetro.....	91
Figura 31 – Comparação entre medições da seção 51 com variação da velocidade do som configurada no ecobatímetro.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Volumes calculados pela ferramenta Surface Difference entre os modelos TIN 2010 e 2018.	63
Tabela 2 – Volumes calculados pela ferramenta Surface Difference entre os modelos TIN 2010 e 2018_sv1484.....	68
Tabela 3 – Volumes calculados pela ferramenta Surface Difference entre os modelos TIN 2010 e 2018_ajustado.	71
Tabela 4 – Estatísticas dos conjuntos de dados de batimetria.	74
Tabela 5 – Variação do volume total dos modelos TIN em relação ao TIN 2010.	75
Tabela 6 – Variação dos volumes negativos e positivos dos conjuntos de dados 2018.	75
Tabela 7 – Variação do volume do reservatório do Lobo entre modelo TIN e raster.	76
Tabela 8 – Dados da relação Cota x Área x Volume de 2010 do Reservatório do Lobo.	87
Tabela 9 – Dados da relação Cota x Área x Volume de 2018 do Reservatório do Lobo.	89
Tabela 10 – Dados da relação Cota x Área x Volume de 2018_ajustado do Reservatório do Lobo.....	93
Tabela 11 – Valores de profundidade nos pontos de verificação.	95
Tabela 12 – Nível d’água diário do Reservatório do Lobo referente a dias de coleta de dados de profundidade.	97

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1. EROÇÃO, TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS	25
3.2. ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS	28
3.3. LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS	32
3.4. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA – MONITORAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS EM EMPREENDIMENTOS DO SETOR ELÉTRICO	34
3.4.1. A Resolução Conjunta nº 03 de 2010 e o reservatório do Lobo.....	37
4. ÁREA DE ESTUDO	41
5. MATERIAS E MÉTODOS	45
5.1. MATERIAIS	45
5.1.1. Ecobatímetro.....	45
5.1.2. Posicionamento - Sistema de Navegação Global por Satélite	47
5.1.3. <i>Software</i> HYPACK®	48
5.1.4. Demais equipamentos.....	49
5.2. LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO	50
5.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS	53
5.3.1. Pré-processamento.....	53
5.3.2. Processamento no <i>software</i> ArcGIS v10.3.1	55
5.4. COLETA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO	56
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
6.1. LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO	59
6.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS	60
6.2.1. Análise do assoreamento	62

6.3. AJUSTE PARA COMPARAÇÃO.....	65
6.4. PONTOS DE VERIFICAÇÃO	72
6.5. DISCUSSÕES	73
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A – Relação CAV 2010.....	87
APÊNDICE B – Relação CAV 2018	89
APÊNDICE C – Levantamento de seções na análise da velocidade do som	91
APÊNDICE D – Relação CAV 2018_ajustado	93
APÊNDICE E – Pontos de verificação	95
ANEXO A – Nível d’água do Reservatório do Lobo	97

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos recursos hídricos envolve o monitoramento e controle dos usos da água, bem como de todas as atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica. O ciclo da água e o ciclo de sedimentos são processos inter-relacionados e a conservação e disponibilidade do recurso hídrico dependem da preservação de ambos.

A denominação do ciclo hidrossedimentológico se refere ao ciclo de sedimentos, que consiste nas etapas de produção, transporte e deposição de partículas. Estes processos dependem intimamente de fatores hidrológicos e podem causar diversos impactos nos mesmos.

O interesse em quantificar os processos do ciclo de sedimentos é crescente e suas razões incluem questões como o transporte de contaminantes, qualidade de água, assoreamento de reservatórios e de canais, erosão e perda de solo, impactos ecológicos e atividades recreativas.

A erosão, principal fator responsável pela produção de sedimentos, é intensamente afetada por práticas como o desmatamento, a agricultura, a urbanização e a mineração - atividades intrinsecamente antrópicas - que não priorizam a conservação dos recursos naturais.

A construção de barragens no curso dos rios é considerada o fator antrópico mais impactante no ciclo hidrossedimentológico, visto que essas obras intensificam a deposição de sedimentos e a evaporação em proporções consideráveis, alterando a dinâmica destes processos em toda a bacia e causando efeitos além dos processos físicos, incluindo todas as esferas do ecossistema.

Entre os impactos da construção de barragens, podem ser mencionados: alterações do habitat de humanos e outras espécies; contribuição na emissão de gases do efeito estufa; alteração do ecossistema no entorno e dentro do novo reservatório; alteração da dinâmica do escoamento na bacia, como as descargas líquidas e sólidas; entre outros. Esses impactos têm variados graus de intensidade, de acordo com as condições específicas do local.

O armazenamento de água é uma prática essencial para sustentar o modo de vida da população, tanto para uso direto, como uso indireto; a construção de reservatórios se justifica pela demanda social.

As ações que devem ser implementadas a fim de se alcançar a otimização e sustentabilidade no armazenamento de água em reservatórios são: quantificar a alteração causada pelos reservatórios no ciclo de sedimentos; identificar os impactos decorrentes;

estabelecer onde esses impactos acontecem; e, como e onde aplicar técnicas de controle para minimização desses impactos.

Desta forma, uma aplicação relevante da hidrossedimentologia consiste na previsão do assoreamento e da vida útil de reservatórios. A previsão do assoreamento está relacionada ao planejamento e gerenciamento dos usos múltiplos da água, que dependem diretamente da capacidade dos empreendimentos.

A capacidade de um reservatório é o parâmetro quantitativo que garante sua operação; com isso, entende-se que os reservatórios são causas significativas de alterações no ciclo hidrossedimentológico e, ao mesmo tempo, sofrem grandes impactos por efeitos de retroalimentação.

Com a problemática apresentada, diversos estudos se desenvolvem a partir de cada um dos fatores relacionados às alterações do ciclo hidrossedimentológico, sendo o assoreamento em reservatórios um tópico de estudos bastante difundido pelas suas implicações sociais, ambientais e econômicas.

Os problemas relacionados às atividades humanas no ciclo hidrossedimentológico podem não ser totalmente mitigados, uma vez que a transformação do ambiente é inevitável. Contudo, os esforços devem ser direcionados para que estes problemas sejam minimizados, de maneira que o conceito de sustentabilidade seja garantido.

É importante ressaltar a relevância do assunto em âmbito nacional, uma vez que o Brasil possui densa rede de drenagem e prática consolidada na geração de energia elétrica por meio de reservatórios; como também, armazenamento do recurso hídrico para usos múltiplos.

Neste contexto, as reguladoras Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Agência Nacional de Águas (ANA) determinam as condições e procedimentos para instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas, visando o monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água, por meio da Resolução Conjunta nº 03 de 2010 (ANEEL; ANA, 2010).

Na temática do assoreamento, a Resolução Conjunta traz como complemento um guia com orientações para geração e atualização periódica da curva Cota x Área x Volume (CAV), de maneira que o volume útil do reservatório seja monitorado, possibilitando a tomada de decisões nas esferas técnica e econômica.

O reservatório do Lobo - Itirapina/SP, área de estudo deste trabalho, possui área de drenagem caracterizada por sofrer impactos de atividades agrícolas, da pesca, do turismo, de embarcações, do desmatamento, da descarga de esgoto doméstico e de mineração de areia. Vários estudos nesta bacia apresentam as diversas consequências devido a esses impactos.

Entre as consequências sobre os recursos hídricos, que podem ser de curto, médio ou longo prazo, é listado o assoreamento dos rios tributários e do reservatório (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI; RODRIGUES, 2003).

Metodologias para quantificar o assoreamento se enquadram na demanda de informações para subsidiar o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos na área da bacia hidrográfica. Este trabalho busca complementar estudos já realizados a partir da aplicação de metodologia de comparação de batimetrias para avaliação de assoreamento no reservatório do Lobo. Este estudo é baseado em recomendações da Resolução Conjunta nº 03 de 2010.

Ademais, este estudo intenciona agregar informações ao sistema da bacia hidrográfica do ribeirão do Lobo, visando melhorar o entendimento deste ambiente.

2. OBJETIVOS

Geral:

Avaliar o assoreamento do reservatório do Lobo – Itirapina/SP a partir da comparação entre o levantamento batimétrico de 2010 e outro de 2018.

Específicos:

- Realizar levantamento batimétrico conforme as recomendações da Resolução Conjunta nº 03 de 2010 para atualização da curva CAV;
- Gerar o MDE atual da superfície do leito do reservatório do Lobo;
- Comparar as superfícies do leito do reservatório de 2010 e 2018;
- Gerar a curva CAV atual para o reservatório do Lobo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. EROSÃO, TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS

O ciclo de sedimentos, ou ciclo hidrossedimentológico, é caracterizado pelo deslocamento de sedimentos por meio de agentes hidrológicos. As partículas de sedimentos se originam, principalmente pela erosão, são transportadas pelo escoamento superficial e se depositam quando as condições do escoamento favorecem esta última etapa do processo.

A erosão pode ser classificada, conforme García (2007), em natural, que ocorre devido a eventos como movimento de placas tectônicas e ação da água, vento, gravidade e gelo em longo prazo – com taxas pequenas, se considerada uma escala de tempo humana, e de difícil controle, por não se tratar de ocorrências locais, mas sim bastante ampla. Outra classificação seria a erosão acelerada, ou induzida por atividades humanas, que tem a capacidade de alterar significativamente a geomorfologia da região em um período relativamente curto, causando desequilíbrio nos processos de produção, transporte e deposição de sedimentos.

Medidas estruturais e não estruturais de controle da erosão são apresentadas por Carvalho (2008):

- Sensibilização sobre os efeitos da erosão;
- Cumprimento das leis referentes à proteção dos solos já existentes;
- Necessidade de novas leis mais abrangentes e coercitivas;
- Incentivos fiscais à proteção das bacias;
- Manutenção de áreas de florestas;
- Mais estudos sobre o ciclo hidrossedimentológico;
- Estudos sobre a variabilidade climática e seus efeitos nas descargas líquidas e sólidas.

Entre as práticas de controle de sedimentos, pode-se destacar a aplicação de técnicas agrícolas que minimizem a erosão, pois a atividade agrícola tem expressiva importância no cenário de desenvolvimento brasileiro. Ainda, projetos de drenagem em bacias urbanizadas também são práticas de controle imprescindíveis, considerando os grandes impactos gerados pela concentração de resíduos contaminantes presentes no grande volume do escoamento superficial destas áreas.

As ações preventivas relacionadas ao controle da produção de sedimentos são as mais efetivas na resolução de problemas de transporte e deposição de sedimentos, pois aliam a conservação do solo da bacia à conservação dos corpos d'água e das obras hidráulicas.

O transporte de sedimentos pode ocorrer de maneiras diferentes (Figura 1), dependendo da granulometria e densidade do sedimento, da densidade e viscosidade do fluido e da turbulência e velocidade do escoamento. E, segundo GARCÍA (2007), uma das classificações que identifica o modo de transporte de sedimento, em canais com gradientes moderados, é a divisão entre *carga de fundo* e *carga em suspensão*, em que carga em suspensão são as partículas menores de sedimento mantidas em suspensão pela turbulência e a carga de fundo são as partículas maiores, transportadas ao longo do leito por deslizamento, rolamento ou saltos.

Figura 1 – Classificação do transporte de sedimentos.

Fonte: Kaufman, 2006.

Dados de campo para quantificação de sedimentos são essenciais na calibração e validação de modelos de transporte de sedimentos, que prevejam o comportamento dinâmico em rios e reservatórios.

No âmbito do transporte de sedimentos, existe um conceito importante: a curva-chave de sedimentos, que relaciona a vazão líquida (m^3/s) de uma seção à vazão sólida (g/m^3). Tal definição é importante quando se trata do estudo de uma seção, ou ponto específico, com comportamento conhecido, incluindo sazonalidades. No entanto, segundo Linsley e Franzini, (1978), essa relação não é precisa, como a curva-chave (nível-vazão líquida), pois o transporte de sedimentos não tem uma correlação com a vazão líquida, uma vez que a descarga sólida pode sofrer alterações instantâneas a partir de ocorrências a montante da seção em questão (despejo de sedimentos de diferentes granulometrias, depressões de deposição temporárias, entre outras). E ainda, um valor de cerca de 10% não é contabilizado, referente a carga de fundo ou outra carga não medida (LOUGHRAN, 1976; GARCÍA, 2007).

O comportamento das pequenas bacias quanto ao processo de produção de sedimento apresenta respostas mais rápidas em relação ao transporte de sedimentos, fazendo com que o

processo de deposição de sedimentos seja mais intenso quando comparado a uma grande bacia de mesmas características físicas e morfológicas (CARVALHO, 2008).

A modelagem do transporte de sedimentos em reservatórios, com base na maior parte dos modelos disponíveis atualmente, considera algumas suposições, de acordo com o conhecimento que se tem em técnicas numéricas, que acabam simplificando o comportamento do sistema, limitando a aplicação dos resultados. Considerações como: seção transversal prismática, escoamento uniforme e permanente, coluna d'água sem estratificação, fluxo de sedimentos não coesivos, entre outras, são adotadas pelos modelos, mesmo que a dinâmica de um reservatório seja completamente oposta a essas considerações (MORRIS; FAN, 2010).

García (2007) classifica a deposição de sedimentos, assim como a erosão, em natural e acelerada, tendo os mesmos princípios como base. A deposição natural ocorre a uma taxa lenta, salvos os casos de eventos extremos, como terremotos, enchentes, entre outros. A deposição acelerada, induzida por atividades humanas, ocorre quando há mudanças na morfologia dos rios ou em outros processos do ciclo hidrossedimentológico.

O depósito de sedimentos pode ocorrer tanto próximo ao local da erosão como em locais distantes. Esses depósitos podem ser em locais planos, em canais, planícies de inundação, reservatórios, deltas, estuários ou no oceano. O sedimento pode causar danos, dependendo da quantidade, qualidade e local de deposição, podendo-se destacar o depósito em reservatórios, que provoca o seu assoreamento, reduzindo o volume de água, a regularização do curso de água e a vida útil do lago; e o depósito no leito de rios, que pode intensificar a ocorrência de inundações nas planícies do curso do rio. Mas também, o depósito de argilas em planícies de inundação pode aumentar a fertilidade do solo e o depósito de partículas de tamanhos variados no curso dos rios auxilia na criação de habitats propícios à fauna desse ecossistema (COOPER et al., 2018; GARCÍA, 2007; CARVALHO, 2008).

O gerenciamento dos processos do ciclo hidrossedimentológicos objetiva lidar com o sistema rio-reservatório para que o equilíbrio de sedimentos seja alcançado, enquanto a maior capacidade de armazenamento possível é garantida e os impactos ambientais, econômicos e sociais são minimizados (POLETO; LIMA; ARAÚJO, 2014; BRUK, 1985).

Assim, as alterações nos meios de produção e deposição de sedimentos potencializam as ocorrências naturais, causando impactos na conservação desses sistemas. E ainda, os propósitos pelos quais se justificam a construção de reservatórios, como a garantia de disponibilidade de água para diversos fins e atenuação de cheias, são comprometidos com a ocorrência do assoreamento.

3.2. ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS

O assoreamento de reservatórios afeta a disponibilidade de água para consumo, a qualidade da água, a geração de energia elétrica, a capacidade de atenuação de cheias e causa uma série de impactos ambientais (SCHELLENBERG et al., 2017).

O sedimento acumulado em lagos e reservatórios forma uma camada que pode evidenciar as condições de deposição naquele ambiente ao longo dos anos, indicando parâmetros quali-quantitativos do ciclo hidrossedimentológico na bacia. No entanto, os sedimentos mais finos têm o processo de deposição alterado quando ocorrem ventos e correntes de densidade, que influenciam a dinâmica do escoamento (GARCÍA, 2007).

Os sedimentos transportados no reservatório, eventualmente, se depositam de acordo com a forma do reservatório e a granulometria do sedimento. Morris e Fan (2010), apresentam 4 tipos simplificados de padrão de deposição longitudinal em reservatórios (Figura 2). O primeiro tipo, denominado delta, se caracteriza pela deposição dos sedimentos mais grosseiros na área de entrada do afluente e a deposição de sedimentos mais finos após esse limite. O segundo tipo, cunha, são mais espessos próximos à barragem e diminuem de espessura em direção a montante do reservatório, sendo esse tipo de deposição encontrada em pequenos reservatórios com grande aporte de sedimentos finos e em grandes reservatórios com níveis baixos de operação durante eventos de cheia. O terceiro tipo de deposição, de seção decrescente, é característico de reservatórios longos, que operam em altos níveis, proporcionando a deposição progressiva dos sedimentos finos. Por último, a deposição uniforme é rara, mas ocorre em reservatórios estreitos com frequente variação de nível e baixa carga de sedimentos finos.

Figura 2 – Padrões de deposição de sedimentos.

Fonte: adaptado de Morris e Fan (2010).

Qualquer corpo d'água que apresente diminuição de velocidades são ambientes favoráveis à deposição de partículas, como é o caso dos reservatórios. Estes, por possuírem vazão efluente, permitem que parte das partículas siga para jusante e não fique retida nos depósitos, sendo que a parcela que permanece no sistema depende de variáveis que alteram o fator de eficiência de retenção do reservatório.

Conforme princípios físicos básicos, as partículas do solo tendem à deposição em meio aquático, uma vez que a densidade do solo é da ordem de 2 a 3 vezes a densidade da água. No entanto, a dinâmica do escoamento (turbulência, correntes) faz com que forças (principalmente inerciais) sejam exercidas nas partículas (Figura 3), podendo superar a gravidade e tornando o processo de deposição um comportamento não linear.

Figura 3 – Vetores de velocidade do escoamento e forças exercidas sobre as partículas de fundo 'A' e em suspensão 'B'.

Fonte: Kaufman, 2006.

Considerando somente o fator velocidade do escoamento e turbulência, os sólidos, ao chegarem ao ambiente do reservatório, tendem a deposição logo na região do delta e as partículas menores depositando-se mais a jusante, ainda no leito do reservatório (LINSLEY; FRANZINI, 1978). No entanto, os outros fatores que regem o escoamento, fazem com que a deposição das partículas em um reservatório seja bastante variável. A forma do lago, as correntes dos afluentes, a vazão, os agentes externos que alteram o escoamento (como ventos e radiação) e o próprio tipo de sedimento são algumas das variáveis que interferem no processo de deposição.

A determinação da deposição ocorrida em um reservatório é geralmente baseada em comparações entre levantamentos batimétricos, auxiliada por amostras de *core* e datação de sedimentos. Por outro lado, a estimativa da deposição pode ser feita por meio de dados de outros casos similares, em que parâmetros possam ser replicados ou regionalizados (GARCÍA, 2007).

Em alguns casos, para cálculo do volume útil, é considerado o armazenamento nas margens, que ocorre onde o solo nas margens do reservatório é permeável. Esse fator faz com

que a capacidade de armazenamento do reservatório seja superior àquela representada pela curva CAV. Outra consideração importante no cálculo da capacidade de um reservatório é a declividade da superfície da água. Sendo geralmente considerada horizontal, pode acarretar erros em situações de alta velocidade do escoamento, em que o perfil hidráulico deixa de ser horizontal (LINSLEY; FRANZINI, 1978).

O processo de assoreamento de um reservatório, como já visto, depende de vários fatores, como produção de sedimentos da bacia, transporte até o reservatório, granulometria do sedimento e dinâmica do escoamento no reservatório. A partir dessas definições surge o conceito de eficiência de retenção, que procura trazer uma abordagem mais exata ao potencial de assoreamento.

A eficiência de retenção é relacionada ao tempo de detenção da água, à capacidade e à vazão do reservatório. Podendo, assim, inferir que com o tempo, a eficiência é reduzida, pois a capacidade diminui, e o decaimento do tempo de vida útil não é linear. Verstraeten e Poesen (2000) apresentam diversas maneiras de se calcular a eficiência de retenção de um pequeno lago ou reservatório, modelos empíricos e teóricos e como o processo de assoreamento de pequenos reservatórios é diferente dos grandes reservatórios.

O controle do assoreamento deve ser previsto nas etapas de projeto do reservatório, contudo, é um parâmetro que deve ser acompanhado, pois mudanças no uso e ocupação do solo na bacia alteram a produção de sedimentos, assim como possíveis cenários de mudanças climáticas também podem interferir.

Alguns métodos para controle do assoreamento, citados por Linsley e Franzini, (1978), são:

- Parte da capacidade total do projeto reservada ao assoreamento;
- Escolha de local com baixa produção de sedimentos;
- Práticas de conservação do solo na bacia;
- Conduitos de descarga na barragem para eliminação de correntes de densidade;
- Retirada mecânica.

A retirada mecânica de sedimentos é, na maioria das vezes, inviável economicamente, pois, além da atividade de dragagem, a destinação deste “resíduo” pode ser problemática (devido à contaminação), elevando ainda mais o custo da operação.

Aumentar a capacidade do reservatório para a parcela do assoreamento se mostra uma opção não sustentável, uma vez que eleva os custos da obra, por aumentar as dimensões do projeto, e aumenta a área de superfície do reservatório, comprometendo uma área maior. E, a

escolha de local com baixa produção de sedimentos nem sempre é viável, por não ser fator decisivo no estudo de viabilidade do empreendimento.

Assim, práticas conservacionistas na bacia podem ser consideradas a melhor opção, uma vez que protegem o ambiente da bacia e do reservatório. A interdisciplinaridade do tema pode levar a novos modelos na estrutura dos reservatórios, antes não pensados pela engenharia, mas que atualmente possui ferramentas que auxiliam a criação de projetos e de atividades de manutenção de forma que o fluxo de sedimento seja considerado nos modelos.

As taxas médias de assoreamento ao redor do mundo, segundo García (2007), representadas pela porcentagem da perda anual do volume original do reservatório, são cerca de 0,1 % na América do Sul e Central, 0,2% na América do Norte, 0,2% na Europa, 1,5% no Oriente Médio e 2,3% na China. Contudo, essas médias regionais são resultados de dados unitários com grande variabilidade, apontando que existem reservatórios próximos ao fim de sua vida útil e outros, que manterão sua capacidade para operação por mais centenas de anos.

Albertin, Matos e Mauad (2010) apresentam um estudo de caso brasileiro, no reservatório Três Irmãos (SP), onde houve perda de cerca de 14% do volume útil em 36 anos. E Miranda (2015) apresenta uma ferramenta que permite inferir sobre o assoreamento principalmente de pequenos reservatórios, entre outros parâmetros sedimentológicos, validada com dados de campo da PCH Mogi-Guaçu (SP).

Tendo em vista a necessidade de estudos para previsão do assoreamento, Schellenberg et al. (2017) lista 3 programas computacionais que modelam esses processos e estratégias para gerenciamento dos mesmos. São citados os programas HEC-RAS, MIKE 21 e FAST, que já foram aplicados em casos de simulação de assoreamento, sendo que o último também inclui a simulação de mudança física no habitat.

A partir de resultados de modelagem, pode-se investir em ações que visam a prevenção do assoreamento de reservatórios e a garantia de sua vida útil; sendo que tais ações são classificadas em 3 grupos: as que conduzem a descarga de sedimentos para jusante do reservatório; as que fazem retirada de sedimento já depositado e as que minimizam o aporte de sedimentos a montante do reservatório (SCHELLENGER et al., 2017). Sendo o último tipo de ação o único que trabalha na conservação e mitigação da causa do problema.

Guertault e Fox (2018) trabalham a determinação de assoreamento de maneira teórica, baseados nos conceitos de produção de sedimentos e eficiência de retenção do reservatório; com isso, pretendem facilitar o processo de avaliação do assoreamento em locais onde os dados são inexistentes e não há intenção de coleta.

3.3. LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS

Segundo Carvalho et al. (2000), a avaliação da produção de sedimentos e do assoreamento por meio de levantamentos batimétricos são raros. Essa avaliação é feita por meio de dados hidrológicos e sedimentológicos dos cursos d'água (HENG; SUETSUGI, 2013); ou então, pelo cálculo da taxa de erosão na bacia a partir da Equação de Perda do Solo - que superestima a produção de sedimentos - uma vez que nem todo solo erodido chega aos cursos d'água, podendo se depositar em depressões ou áreas planas.

No entanto, o levantamento batimétrico é o método que melhor representa a mudança na capacidade dos reservatórios, pois trata-se de uma medida direta do sedimento depositado, e não indireta, como proporcionado pelos dados de produção e transporte fluvial de sedimentos. Segundo Eakin (1939), nota-se que os procedimentos para realização de batimetrias tiveram modificações mais relacionadas à mudança de tecnologia, permanecendo os mesmos princípios.

A batimetria consiste na coleta de pontos da superfície do leito de rios ou lagos, a partir dos quais é formado o Modelo Digital de Elevação (MDE), que representa os vales e elevações do terreno. A precisão do MDE está diretamente relacionada ao cálculo do volume do reservatório.

A coleta de pontos por meio de equipamentos de sondagem acústica é uma prática usual, mas que pode sofrer efeitos da calibração do equipamento e das especificidades do leito mapeado. A presença de objetos, como resíduos de madeira, no fundo dos reservatórios leva a medidas incorretas de profundidade. E, nesse contexto, White e Hodges 2005 testam um algoritmo para filtrar dados coletados em levantamentos, caracterizando a irregularidade desses obstáculos de fundo.

A metodologia de levantamento batimétrico com equipamentos de sondagem acústica monofeixe é aplicada em diversos casos por se tratar de um equipamento mais simples e de menor custo, se comparado ao multifeixe. A batimetria de fundo de reservatórios para determinação de sua curva CAV, como feito por Minhoni, Brito e Azevedo (2017), é uma prática recomendada, sendo importante para geração de um banco de dados sobre o empreendimento, possibilitando análises comparativas a partir dos diversos levantamentos.

Para elaboração do mapa do terreno, existem várias técnicas de interpolação para formar uma superfície contínua com os dados discretos coletados. Bielenki, Vitti e Mauad (2015) apresentam um estudo sobre a qualidade do resultado de modelos interpoladores, considerando diferentes cenários de distribuição de dados na elaboração do MDE. Os

resultados são avaliados de acordo com o valor de volume obtido entre a diferença da superfície analítica e a superfície gerada, buscando-se minimizar essa diferença, pois assim a representação do MDE gerado seria aproximada a da superfície analítica.

Estigoni, Matos e Mauad (2014) destacam dois pontos importantes a serem considerados para minimização de erros na geração do MDE, e consequente cálculo do volume do reservatório: distância utilizada entre as seções transversais e o método de interpolação dos dados para elaboração do mapa do terreno.

Diferentes espaçamentos entre seções transversais como dados de entrada para geração de MDE a partir de dois métodos de interpolação diferentes, *Triangulated Irregular Network* (TIN) e Inserção de Malha de Pontos (IMP), mostram que a metodologia geralmente adotada para obtenção do MDT a partir dos dados da batimetria se baseia na técnica TIN, que pode fazer com que a forma final do terreno não seja exatamente representada nas bordas. Para isso, o trabalho apresentado por Matos (2012) utiliza o método IMP, fazendo com que o resultado final do volume do reservatório seja mais preciso (ESTIGONI; MATOS; MAUAD, 2014; ESTIGONI et al., 2014 e MATOS, 2012).

O modelo de interpolação TIN é amplamente utilizado na caracterização de superfícies hidrográficas (BIELENKI; VITTI; MAUAD, 2015). Esta modelagem parte do princípio de constituição de triângulos a partir de todos os pontos amostrados e permite que informações morfológicas importantes do terreno sejam bem representadas no modelo, como os fundos de vale (MATOS, 2012; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2018). O ArcGIS utiliza o método de triangulação de Delaunay na criação do TIN, em que os triângulos são formados evitando-se ângulos internos agudos e com apenas uma solução otimizada para o conjunto de dados (MAZZINI; SCHETTINI, 2009).

Também apontado por Furnans e Austin (2008), a coleta de dados de profundidade com um ecobatímetro faz com que, na etapa de modelagem digital do terreno, as bordas do reservatório não sejam bem representadas. Assim, as metodologias propostas por esses estudos visam minimizar os erros relativos às áreas rasas nas bordas do reservatório.

A comparação entre levantamentos batimétricos, realizados com certo espaçamento temporal, mostram diferenças no perfil do terreno, que representam degradação ou aggradação de sedimentos, levando a conclusões sobre alterações na dinâmica do sistema e como esses processos devem ser controlados.

A avaliação do assoreamento é totalmente dependente da precisão do levantamento batimétrico. Todas as técnicas possuem erros relacionados; portanto, se faz necessário a

utilização de técnicas e métodos que minimizem tais erros, sendo necessário a busca pela otimização em cada caso de estudo, não podendo haver generalizações.

A precisão dos dados de posicionamento está intrinsicamente relacionada à qualidade e precisão do levantamento batimétrico. Nakao e Krueger (2017) avaliaram o desempenho de 3 diferentes técnicas e, entre considerações, é concluído que todas as técnicas, inclusive o sistema DGPS, atendem aos requisitos da Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 03 de 2010.

A comparação entre levantamentos batimétricos feitos com equipamentos diferentes ou baseados em distribuição de seções transversais que não geram um MDE adequado e não são similares resultam em uma quantificação equivocada do assoreamento no reservatório. Estigoni et al. (2009) e Estigoni, Miranda e Mauad (2017) exemplificam esse resultado a partir de estudos de caso no reservatório do Lobo (SP) e no reservatório Mogi-Guaçu (SP).

O avanço tecnológico em relação a aquisição de dados por satélites, por sensoriamento remoto, tem permitido que essa metodologia seja aplicada de maneira confiável em diferentes tipos de análises (CASTILLO-LÓPEZ et al., 2017; NAJHAN et al., 2018). Collischonn e Clarke (2016) mostram que também é possível realizar uma “batimetria remota” obtendo resultados satisfatórios, mas ainda com algumas restrições, como o tamanho do reservatório e tipo de operação, que devem ser grandes e de regularização (com grande variação no nível da água) para implementação da metodologia. Gao (2009) também propõe metodologia para batimetria realizada por meio de imageamento, sendo, desta forma, uma atividade de menor custo, mais eficiente e aplicável em área rasas.

3.4. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA – MONITORAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS EM EMPREENDIMENTOS DO SETOR ELÉTRICO

Em termos gerais legais, a Marinha do Brasil normatiza os levantamentos hidrográficos em todas as Águas Jurisdicionais Brasileiras por meio da NORMAN-25 (DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO, 2017). Segundo esta norma, o tipo de levantamento hidrográfico como o proposto por este trabalho estaria enquadrado na categoria “B”, que se refere aos levantamentos executados sem o propósito de produzir elementos que sirvam para atualização de documentos náuticos.

Esta instituição maior do Brasil se baseou, e usa como referência, a Publicação Especial nº 44 (S-44) – “Especificações da Organização Hidrográfica Internacional para Levantamentos Hidrográficos”, disponível no sítio da Organização Hidrográfica Internacional (OHI), também autora do *Manual on Hydrography* – Publicação C-13.

De maneira mais direcionada ao setor elétrico; e uma vez reconhecida a influência de um reservatório na dinâmica do ecossistema da bacia e os impactos causados pelas alterações advindas desses empreendimentos; a Resolução Conjunta nº 03 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Agência Nacional de Águas (ANA) (ANEEL, ANA, 2010) resolve:

Art. 1º Estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamento hidrelétricos, e dar outras providências.

Conforme a referida Resolução, a densidade de estações e o tipo de monitoramento necessário são definidos conforme a área de drenagem incremental do aproveitamento, sendo que quanto maior é esse parâmetro, maior o número de estações instaladas. Em relação ao monitoramento sedimentométrico, a Resolução traz as seguintes considerações:

Art. 8º Para as usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, o processo de assoreamento do reservatório deverá ser avaliado com base na atualização das curvas cota-área-volume realizada pelo concessionário ou autorizado, da seguinte forma:

I – para empreendimentos que, na data de publicação desta Resolução, estiverem em operação há oito anos ou mais, a atualização deverá ser feita no prazo de até 24 meses contados da data de publicação desta Resolução e, a partir da referida atualização, a cada 10 anos;

II – para os demais empreendimentos não atingidos pelo inciso I, a atualização deverá ser realizada a cada 10 anos, contados a partir do início de sua operação comercial.

A ANA, a partir dessa Resolução, é responsável por orientar sobre os procedimentos de coleta, tratamento e armazenamento dos dados hidrométricos. A partir da LEI Nº 9.984, de 17 de Julho de 2000, que dispõe sobre a criação da ANA, art. 4º, inciso XIII e XIV, a agência deve “promover a coordenação das atividades desenvolvidas no âmbito da rede hidrometeorológica nacional, em articulação com órgãos e entidades públicas ou privadas que a integram, ou que dela sejam usuárias” e “organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos”.

Nesse sentido, a ANA (2013) apresenta orientações técnicas para atualização da curva CAV, com base em procedimentos de definição de potencial de assoreamento, de estabelecimento de seções de controle e de execução do trabalho. As informações do nível de

criticidade, calculado a partir do potencial de assoreamento do reservatório, e do tipo de dados topobatimétricos já disponíveis/existentes são tabeladas e cruzadas e resultam em um sistema de enquadramento do empreendimento que dita quais ações devem ser tomadas para atendimento aos requisitos da resolução.

Fica claro que a Resolução Conjunta estabelece “que cabe à Agência Nacional de Águas – ANA, organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos”, fazendo com que as operações normatizadas pela resolução sejam apresentadas de forma mais regulamentada às concessionárias, permitindo melhor entendimento e cumprimento.

A Resolução Nº 396 (ANEEL, 1998b), que foi revogada pela Resolução Conjunta Nº 03 de 2010, estabelecia as condições para implantação, manutenção e operação de estações apenas fluviométricas e pluviométricas. Ainda, não apresentava diretrizes para o cumprimento das condições estabelecidas, uma vez que a ANA foi criada em 2000, não estabelecia termos para fiscalização e penalidades e não previa atualização de seus próprios termos. Contudo, já se baseava no Decreto Nº 2.335 de 1997 que estabelece a competência da ANEEL em regular e fiscalizar a conservação e o aproveitamento dos potenciais de energia hidráulica, cumprir e fazer cumprir o Código de Águas, na área de sua responsabilidade, regular o uso dos potenciais de energia hidráulica e dos reservatórios de usinas hidrelétricas em harmonia com a Política Nacional de Recursos Hídricos, sendo parte integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, criado pelo art. 32 da Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997.

Considerando o Decreto Nº 24.643 de 1934, que decreta o Código de Águas, complementado pela alínea “d” do art. 104 do Decreto Nº 41.019 de 1957, que regulamenta os serviços de energia elétrica, pode-se acrescentar que a Resolução revogada Nº 396 de 1998 também já previa a obrigação por parte do concessionário em “construir e manter nas proximidades da usina, onde fôr determinado pelo Serviço de Águas, as instalações necessárias para observações linimétricas e medições de descargas do curso d'água utilizado”.

No entanto, mesmo que a Resolução Conjunta tenha apresentado grande avanço em relação à Resolução revogada Nº 396 de 1998, muitas dificuldades ainda são encontradas no cumprimento das normas. Segundo Souza e Alvarenga (2015), a variabilidade dos custos dos equipamentos, serviços e atividades constantes de manutenção; confiabilidade dos dados hidrológicos coletados; quantidade de dados hidrológicos a ser processada; complexidade do relatório de consistência anual; negociação de terras para a instalação dos equipamentos de medição e monitoramento; e ausência de fiscalização e indefinição de penalidades quanto ao

descumprimento da legislação são alguns dos desafios encontrados para o cumprimento da resolução.

3.4.1. A Resolução Conjunta nº 03 de 2010 e o reservatório do Lobo

Conforme as orientações da ANA (2013), o mapeamento da área molhada do reservatório deve ser realizado por meio de ecobatímetro de feixe único (*single beam*), ou múltiplos feixes (*multibeam*), com antena do equipamento de navegação por satélite posicionada no mesmo eixo do transdutor do ecobatímetro, para que o posicionamento planimétrico da embarcação e a medida da profundidade não apresentem *offset*.

No caso da utilização de ecobatímetro *single beam*, o levantamento batimétrico deve ser feito pelo método de linhas regulares de sondagem (LS) equidistantes e, conforme classificação da usina em Pequena Central Hidrelétrica (PCH) ou Usina Hidrelétrica (UHE), a equidistância referencial entre as seções transversais deve ser obtida a partir das fórmulas:

$$E_{ST} = \frac{0,35A^{0,35}}{D}, \text{ para UHE's} \quad (1)$$

$$E_{ST} = \frac{0,1A^{0,25}}{D}, \text{ para PCH's} \quad (2)$$

em que:

E_{ST} = equidistância das seções topobatimétricas transversais, em km;

A = área do reservatório em seu nível operacional normal, em ha;

D = extensão do reservatório (corpo principal), em nível operacional normal, em km.

Assim, para cumprimento das orientações conforme a Resolução nº 03, a classificação do local de estudo, a usina do Lobo, como Pequena Central Hidrelétrica (PCH) ou Usina Hidrelétrica (UHE) é importante para normatizar a avaliação do assoreamento no reservatório.

Conforme a Resolução Nº 394 (ANEEL, 1998a), o enquadramento de empreendimentos como Pequenas Centrais Hidrelétricas era regido pelos seguintes requisitos:

Art. 2º Os empreendimentos hidrelétricos com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, com área total de reservatório igual ou inferior a 3,0 km², serão considerados como aproveitamentos com características de pequenas centrais hidrelétricas.

Art. 3º O empreendimento que não atender a condição de área máxima inundada poderá, consideradas as especificidades regionais, ser também

enquadrado na condição de pequena central hidrelétrica, desde que deliberado pela Diretoria da ANEEL, com base em parecer técnico, que contemple, entre outros, aspectos econômicos e sócio-ambientais.

A partir desses requisitos, a usina do Lobo era classificada como PCH, conforme listado no Anexo I-A, de ANEEL (2002).

Com a Resolução N° 394 revogada, a Resolução N° 652 (ANEEL, 2003) atualizou as definições do enquadramento conforme os seguintes requisitos:

Art. 3o Será considerado com características de PCH o aproveitamento hidrelétrico com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, destinado a produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma, com área do reservatório inferior a 3,0 km².

Art. 4o O aproveitamento hidrelétrico que não atender a condição para a área do reservatório de que trata o artigo anterior, respeitados os limites de potência e modalidade de exploração, será considerado com características de PCH, caso se verifique pelo menos uma das seguintes condições:

[...]

II - reservatório cujo dimensionamento, comprovadamente, foi baseado em outros objetivos que não o de geração de energia elétrica.

[...]

§ 2o Na verificação da condição descrita no inciso II, a ANEEL articulará com a Agência Nacional de Águas - ANA, os Comitês de Bacia Hidrográfica, os Estados e o Distrito Federal, conforme for o caso, de acordo com a respectiva competência, quanto aos objetivos para definir as dimensões do reservatório destinado ao uso múltiplo.

Com a nova resolução para enquadramento, o reservatório do Lobo passa a ser considerado uma UHE unicamente pelo motivo de não ter sido dimensionado, na época de sua construção, para diferentes usos. A realidade da utilização do reservatório do Lobo para usos múltiplos já é consolidada há muitos anos, visto que as pesquisas são realizadas de maneira intensa neste reservatório desde a criação do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais da USP São Carlos; e a recreação é um atrativo da região.

A definição de um empreendimento em PCH ou UHE, além das consequências técnicas na determinação da equidistância de levantamento batimétricos, implica em diferentes pareceres econômicos. Existe uma parcela da taxa recolhida pelas concessionárias pela utilização dos recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica chamada de Compensação Financeira, que corresponde a 7% do valor da energia produzida. Esses 7% são divididos entre o Ministério do Meio Ambiente (0,75%), para aplicação na implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e entre os municípios atingidos pelos reservatórios (2,8%), os estados (2,8%) e a

União (0,65%). As PCHs são dispensadas do recolhimento da taxa da Compensação Financeira (OUTORGAS E REGISTROS DE GERAÇÃO, ANEEL).

4. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do reservatório do Lobo está contida na área da Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo 13 (URGHI 13), dos rios Tietê e Jacaré-Guaçu; é formada, principalmente, pelo ribeirão do Lobo, rio Itaqueri e pelos córregos Geraldo e Perdizes (Figura 4).

Figura 4 – Localização da bacia hidrográfica do reservatório do Lobo.

Fonte: elaborado por Phelipe da Silva Anjinho.

Segundo Tundisi, Bicudo e Matsumura-Tundisi (1995), a bacia se estende por uma área de 227,7 km², com densidade de drenagem de 0,75 km/km², altitude máxima de 940 m, altitude mínima de 680 m e precipitação média de 1300 mm/ano.

O reservatório do Lobo está localizado entre os municípios de Itirapina e Brotas, com coordenadas aproximadas de 22°15'S e 47°40'W. Sua construção em 1936 foi em vista do aproveitamento para geração de energia elétrica e, em 1970, se tornou atração turística regional (ESTIGONI; MATOS; MAUAD, 2014). Atualmente, seus usos incluem recreação, pesquisa e geração de energia elétrica. Possui potência instalada de 1.590 kW e potência

líquida de 1.580 kW, sendo descrita como geração distribuída, controlada pela Claro S.A desde julho de 2018 (CATALANO, 2018).

A Hidrelétrica do Lobo deve manter nível de montante entre as cotas 703,0 e 703,30, para atender ao perfil econômico da região, o que se refere à exploração das atividades de lazer e turismo. E, devido ao valor referente à potência instalada, não é despachada centralizadamente e nem é submetida às regras do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (ANEEL, 2006).

Segundo Estigoni, Matos e Mauad (2014), o reservatório do Lobo possuiu 6,2 km de comprimento, profundidade máxima de 14 m, profundidade média de 5,8 m, área de superfícies de 5,6 km² e volume de 24,3 hm³. Tais parâmetros já são atualização em relação aos apresentados por Tundisi, Matsumura-Tundisi e Rodrigues (2003), que determinam profundidade média de 3,2 m, área de 6,8 km² e volume de 22 hm³.

A forma do reservatório e as áreas do seu entorno podem ser observadas na Figura 5. A barragem está localizada na extremidade norte do reservatório, o córrego Perdizes é o tributário a oeste, o córrego Geraldo, leste, e o ribeirão do Lobo e rio Itaqueri, ao sul. Indicando o escoamento no reservatório no sentido sul – norte.

Figura 5 – O reservatório do Lobo e seu entorno.

Fonte: adaptado de Google Earth.

A área do entorno do reservatório é composta, principalmente, por áreas de cerrado, reflorestamento, áreas alagadas e área urbanas de baixa densidade demográfica. Tais

características sugerem que a região não possui grandes fluxos de sedimentos que possam atingir o reservatório (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2014).

Contudo, a escolha do local de estudo se deve ao fator localização, uma vez que os responsáveis por este estudo ficam locados no Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA), situado a alguns metros da barragem do reservatório. E, mais importante, pela disponibilidade de dados primários confiáveis, visto que a metodologia de comparação a ser realizada necessita de dados de batimetria anteriores, com um intervalo de tempo em anos significativo para alcançar os objetivos deste estudo.

5. MATERIAS E MÉTODOS

5.1. MATERIAIS

5.1.1. Ecobatímetro

O levantamento de dados de profundidade é feito por meio de um ecobatímetro, um equipamento de sondagem acústica, com princípio de funcionamento baseado na emissão de ondas ultrassônicas, que atingem a superfície refletora e retornam ao receptor (Figura 6). Pelo tempo de trajetória da onda sonora é calculada a distância entre o equipamento e a superfície, uma vez que a velocidade de propagação do som no meio é configurada no equipamento.

Figura 6 – Medição acústica de profundidade.

Fonte: adaptado de US Army Corps of Engineers, 2013

A presença de superfícies refletoras, que estejam na trajetória entre o equipamento e o leito do reservatório, pode gerar dados que não correspondem ao valor real de profundidade no ponto. Camadas de estratificação térmica, ou de densidade, ou material biológico podem formar tais superfícies refletoras (SYQWEST INCORPORATED, [2000?]), mas que são identificadas na etapa de processamento dos dados.

O ecobatímetro utilizado neste trabalho é o modelo Bathy-500MF *Survey Echo Sounder* da marca SyQwest (Figura 7), de feixe único, podendo sua fonte de alimentação de energia ser 12 VCC ou 110/220 VCA e saída acústica única selecionável entre 33, 40, 50 e

200 Hz. Este equipamento atende às recomendações da ANA para atualização da curva CAV (ANA, 2013).

Pelo princípio de funcionamento do equipamento, a energia elétrica é transformada em ondas ultrassônicas por meio de um transdutor, que, após receber o sinal sonoro refletido, transforma novamente em sinal elétrico para determinação das medidas de profundidade. O transdutor utilizado neste trabalho é o modelo P/N 01540, com 8° de largura do feixe no ponto de 3 dB (SYQWEST INCORPORATED, [2000?]).

Na campanha realizada em 2018 para este trabalho, a saída acústica configurada foi de 200 Hz, a mesma utilizada na campanha de 2010, a fim de se manter o mesmo procedimento. O código de saída dos dados foi configurado como ODOMet, que são *input* no *software* de levantamento de campo HYPACK®, descrito adiante. Na montagem do equipamento em campo, o transdutor foi imerso na água de maneira que o valor de ‘y’, representado nas Figura 6 e Figura 7, foi de 30 cm.

Figura 7 – Ecobatímetro Bathy 500MF e transdutor.

A calibração do ecobatímetro é essencial para se garantir medidas precisas de profundidade e, para os ecobatímetros *single beam*, a técnica do *bar-check* (Figura 8) é bastante utilizada pela simplicidade e eficácia do procedimento. Tal técnica consiste em colocar um anteparo a uma profundidade conhecida e realizar a leitura com o ecobatímetro, ajustando o valor de velocidade do som até que a medida lida pelo equipamento seja igual a medida real conhecida (FERRARI, 2006; INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION, 2011b; US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2013).

Figura 8 – Montagem para calibração *bar-check*.

Fonte: adaptado de US Army Corps of Engineers, 2013.

Além da velocidade do som, os parâmetros: ganho, TVG (*time-varied gain*), alcance e fase podem ser configurados, sendo os dois primeiros relacionados à amplificação do sinal (INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION, 2011b) e os dois últimos, à magnitude das medidas de profundidade. Assim, durante o *bar-check*, a velocidade do som foi configurada em 1505 m/s, o ganho em 42, o TVG em 50, a fase de 0 - 40 m e o alcance de 5, 10 ou 20 m, dependendo da região do reservatório.

5.1.2. Posicionamento - Sistema de Navegação Global por Satélite

O Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), sigla em inglês de *Global Navigation Satellite System*, utilizado nesse trabalho foi o *Differential Global Positioning System* (DGPS) com desempenho *Real Time Kinematic* (RTK) da marca Leica. O sistema é composto por duas antenas receptoras modelo GS15, uma base e uma móvel, e uma controladora modelo CS10, que possibilitam medições com precisão da ordem de milímetros (em condições favoráveis de operação – posição dos satélites, velocidade de deslocamento, distância entre os receptores etc.).

O princípio de funcionamento do posicionamento diferencial RTK proporciona medidas mais precisas em tempo real. O sistema é composto por pelos menos dois receptores GPS – um receptor de referência (base), posicionado em ponto de coordenadas absolutas conhecidas, e um receptor remoto (*móvel*), que ocupa novos pontos a serem determinados – que realizam medições de fase e produzem soluções das medições em uma frequência da ordem de segundos. O receptor base transmite suas informações de soluções por meio de sinal de rádio em tempo real e, desse modo, o receptor móvel calcula a posição absoluta correta,

melhorando a precisão das medidas (INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION, 2011a).

A controladora mantém comunicação com as antenas por meio da tecnologia sem-fio Bluetooth®, possibilitando a configuração dos equipamentos pelo *software* Smart Worx Viva. Nas configurações para este trabalho, ficaram definidas as comunicações Bluetooth®, a comunicação via rádio entre as antenas e o código das mensagens de saída de dados.

Segundo ANA (2013), o posicionamento em mapeamentos da área molhada de reservatórios deve ser executado empregando-se correções diferenciais provenientes de uma base RTK. Com isso, o equipamento utilizado atende às orientações normativas.

5.1.3. *Software* HYPACK®

Durante o levantamento batimétrico, o DGPS e o ecobatímetro são conectados a um computador portátil pelas portas seriais, no qual os dados são integrados por meio do *software* de levantamento hidrográfico HYPACK® versão 6.2a.

Na fase de preparação do levantamento em campo, o HYPACK® permite que sejam configurados os equipamentos conectados ao computador, selecionando os *drivers* (controladores) de cada dispositivo. Ainda nesta fase, determina-se as configurações geodésicas e as linhas de sondagem (traçados dos transectos a serem medidos), que servem de guia durante o levantamento.

Durante o levantamento, a tela *Survey* do HYPACK® pode ser configurada de maneira que fique visível diferentes informações, relevantes à execução do trabalho. Na Figura 9, fica exemplificado a organização das informações utilizadas no levantamento deste trabalho: a janela “Map” (esquerda) mostra as linhas de sondagem e a posição do barco em relação ao planejamento; a janela “Data Display” (direita) mostra dados instantâneos; e a janela “Helm Left/Right Indicator” (inferior) serve de orientação ao piloto da embarcação, mostrando a distância do barco em relação a linha selecionada para medição.

Figura 9 – Tela *Survey* do HYPACK®.

Após a coleta, o HYPACK® possui a ferramenta de pré-processamento dos dados, que será detalhada mais adiante.

Esse programa computacional ainda possui diversas outras ferramentas para auxiliar durante o levantamento e após o mesmo, como: marcação de objetos-alvo na área do mapeamento, ajuste da velocidade do som, ajuste de *offsets*, configurações para navegação e de *design* da interface do programa para melhor aproveitamento de cada usuário.

5.1.4. Demais equipamentos

Além dos materiais descritos nos itens anteriores, foram utilizados como material de apoio ao processo:

- Barco de alumínio LeveFort Squalus 600 cast;
- Motor Yamaha 15 Hp, modelo 15FMHS;
- Equipamentos de proteção;
- Corda graduada;
- Gerador Honda EU 10i, combustível gasolina, saídas CA: 120/220 V, 60 Hz; CC 12 V, 8 A;
- Computador portátil – *Toughbook* Panasonic, modelo CF-31, processador Intel® Core™ i5.

5.2. LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

O reservatório do Lobo, conforme Matos (2012), foi objeto de estudo do levantamento batimétrico realizado em 2010, em que foram seguidas orientações da Resolução N°03 de 2010 (ANA, 2013). Assim, a partir do objetivo deste estudo, em comparar as batimetrias, o levantamento realizado neste trabalho segue os procedimentos do levantamento de 2010 e, também, as orientações da ANA.

A campanha de 2010 é um levantamento batimétrico com alto nível de detalhamento do reservatório do Lobo, sendo as seções transversais equidistantes em 10 m, possibilitando que a campanha de 2018 fosse realizada em seções coincidentes, independente do espaçamento.

A partir da metodologia de cálculo proposta pelas orientações da ANA, apresentada no item 3.4, e as dimensões do reservatório do Lobo, apresentadas no item 4, calculou-se a equidistância entre as seções para o levantamento batimétrico (Equação 3).

$$E_{ST} = \frac{0,1A^{0,25}}{D} = \frac{0,1.(560ha)^{0,25}}{6,2km} = 78m \quad (3)$$

Pode-se notar que a equação utilizada corresponde à elaborada para empreendimentos do tipo PCH, devido a equidistância resultante desta fórmula servir para um levantamento mais detalhado em relação ao resultado da fórmula para UHE, que seria de aproximadamente 500 m.

Assim, os transectos planejados para o trabalho de campo são espaçados em 100 m, totalizando 72 seções, traçadas de acordo com o posicionamento das seções levantadas em 2010, constituindo um arquivo de extensão .lnw, que corresponde às linhas de sondagem no *software* HYPACK® (Figura 10).

Figura 10 – Linhas de sondagem na tela do HYPACK®. Distanciamento de 100 metros.

A montagem dos equipamentos para o levantamento batimétrico requer, no barco, um suporte para instalação da haste do transdutor, que também encaixa a antena móvel do DGPS. Desta maneira, os dados de profundidade e de posicionamento são coletados no mesmo eixo, gerando, no HYPACK®, pontos definidos por 3 coordenadas (x,y,z), evitando a necessidade de correção de *offset*.

A antena base do DGPS fica instalada em pontos de coordenadas conhecidas, próxima ao reservatório, mantendo comunicação com a antena móvel. A bordo do barco, a antena móvel tem seu *status* de conexão com a base acompanhado por meio da controladora e os dados coletados da batimetria são acompanhados por meio da tela do HYPACK® no *Toughbook*. O esquema da Figura 11 mostra as conexões entre os equipamentos durante o levantamento.

A saída de dados do DGPS e do ecobatímetro é representada pelo código das mensagens na transferência de informações de cada dispositivo e a fonte de alimentação elétrica do ecobatímetro é feito por meio do gerador descrito no item 5.1.4.

Figura 11 – Montagem dos equipamentos para levantamento batimétrico com DGPS RTK.

O HYPACK®, durante a coleta de dados, permite que os dados de cada transecto sejam salvos em um arquivo de extensão .raw (FIPAI, 2009) e todos os transectos gravados em um dia são salvos em conjunto num arquivo de extensão .log. O nome dos arquivos .raw é composto pelo número da seção medida e o horário do início da medição: por exemplo, às 15:22h teve início a medição da seção 2; assim, o arquivo de dados brutos correspondente a essa seção é 002_1522.raw.

É importante destacar que os trabalhos de coleta em campo dependem de fatores ambientais e, no caso da batimetria, dependem intensamente das condições de vento. A ação do vento causa pequenas ondas na superfície da água do reservatório, que causam oscilações nas medições de profundidade, no caso de não estar montado um sensor para compensar este movimento do barco.

5.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS

5.3.1. Pré-processamento

O pré-processamento dos dados é realizado no HYPACK®, na ferramenta de edição de dados mono feixe (*Single Beam Editor*), com a qual é possível abrir os arquivos .raw ou .log para visualização das seções e tratamento de erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios.

A tela do editor *Single Beam Max* pode ser configurada conforme a intenção do usuário e, na Figura 12, são apresentados os recursos utilizados neste trabalho: a planilha de dados, a vista superior da seção em relação à linha de sondagem e a vista de perfil dos dados de profundidade.

Figura 12 – Exemplo de tela do editor *Single Beam Max* do HYPACK®.

A planilha de dados apresenta os dados brutos coletados e os dados de profundidade corrigidos, sendo esta correção obtida a partir da diferença entre o nível d'água real e o nível adotado como referência, mais a medida da profundidade em que o transdutor fica imerso na água (30 cm, como apresentado no item 5.1.1). O nível de referência adotado para correção de toda campanha é 703,06 m, por ser esta a cota do nível d'água do dia da imagem utilizada para extrair a forma do contorno do reservatório; e os níveis d'água reais diários do reservatório do Lobo estão apresentados no Anexo A.

A visualização do perfil dos dados permitem que as medidas discrepantes sejam eliminadas por meio de avaliação visual. Mas também, o programa permite que sejam configurados parâmetros de avaliação do perfil gerado e, assim, sugere pontos a serem eliminados, destacados pelo símbolo ‘×’ em amarelo.

A sugestão do programa para eliminação de pontos pode ser adotada e executada de maneira que todas as marcações serão removidas; no entanto, esta prática não é recomendada, uma vez que o comportamento real dos dados pode não coincidir com o padrão esperado pelo programa, eliminando dados válidos. Assim, a eliminação manual dos erros para cada seção foi realizada, como está mostrado na Figura 13, que é o resultado do pré-processamento dos dados da seção apresentada anteriormente na Figura 12.

Figura 13 – Seção pós eliminação manual dos erros grosseiros.

Algumas exceções na eliminação manual de erros tiveram que ser adotados, em casos nos quais as medidas do ecobatímetro apresentaram oscilações mais intensas. Nestes casos, foram utilizadas as ferramentas *smooth* e *filter* do editor, que permitem que a superfície seja suavizada e os pontos marcados são interpolados na nova superfície (Figura 14). A suavização da superfície só foi possível ser utilizada em seções nas quais o perfil do canal não é acentuado, uma vez que não é possível delimitar áreas específicas para aplicação da ferramenta e, quando o perfil do canal é mais acentuado, a aplicação dessa função altera mais significativamente as profundidades extremas.

Figura 14 – Tratamento dos dados de seção pela ferramenta *smooth* e *filter*.

A partir do nível d'água de referência, as medidas de profundidade são transformadas em valores de elevação e tem-se, então, dados finais pré-processados das seções levantadas. Esses dados podem ser gravados pelo editor *Max* na extensão .edt para processamento em ferramentas do HYPACK®, ou podem ser exportados em arquivos .txt para processamento em outro *software*, que, em nosso caso, foi o programa ArcGIS.

5.3.2. Processamento no *software* ArcGIS v10.3.1

Os arquivos .txt gerados após o pré-processamento são inseridos no *software* ArcGIS v10.3.1, especificando quais são as entradas x,y,z e o datum de referência e, desse modo, o conjunto de todas as seções é exportado para criação de único arquivo *shapefile* (.shp), usado no ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Os dados da campanha de 2010 foram disponibilizados por Matos (2012) no formato .shp. O procedimento de processamento foi realizado para ambos os arquivos, 2010 e 2018.

A primeira ferramenta executada nos dados de batimetria é a criação do modelo TIN, disponível entre as ferramentas do *3D Analyst*. Essa ação faz com que os pontos discretos obtidos no levantamento batimétrico sejam transformados em uma superfície contínua, o MDE que caracteriza o fundo do reservatório.

Nos dados de entrada para criação do TIN, além do arquivo .shp com os dados da batimetria, é inserido o arquivo .shp do contorno do reservatório, que atua como uma *softline* - linha de quebra – com valor atribuído de elevação igual a 703,06 m. O .shp do contorno, também disponibilizado por Matos (2012), foi utilizado no processamento dos dados de 2010 e, portanto, para os dados de 2018, com o objetivo de fazer com que as áreas do reservatório sejam coincidentes. A elevação atribuída corresponde ao nível d'água no dia da obtenção da imagem (MATOS, 2012).

A partir dos modelos TIN, por meio da ferramenta *Surface Difference* do *3D Analyst*, gera-se um mapa que aponta as diferenças entre as superfícies, determinando polígonos onde o TIN de 2018 está abaixo, acima, ou na mesma elevação, que o TIN de referência 2010. Dessa maneira, a tabela de atributos quantifica o volume de cada polígono.

Com a ferramenta *Conversion* do *3D Analyst*, pode-se transformar o modelo TIN para modelo raster, que é caracterizado por um mosaico regular de células e, no caso deste trabalho, constitui-se de células 22 x 22 cm. O modelo raster permite que seja gerado uma

malha de pontos do fundo do reservatório, em que cada ponto, correspondente de cada célula, possui a elevação atribuída à célula na transformação de TIN para raster.

A álgebra de mapas, realizada por meio da ferramenta *Map Algebra* do *Spacial Analyst*, calcula a diferença entre os modelos raster, subtraindo o modelo 2018 do modelo 2010. Assim, o mapa resultante possui células com valores em metros, positivos ou negativos, apontando a espessura da camada entre os dois modelos.

O cálculo do volume do reservatório é feito por meio da ferramenta *Surface Volume*, do *3D Analyst*, a qual opera com os dados de entrada: superfície TIN e elevação do plano de referência. Por exemplo, o volume do reservatório do Lobo em 2018, com o nível d'água na cota de 703 m, é calculado com o *input* do modelo TIN 2018 e o plano de referência 703 m. A execução desta ferramenta gera um arquivo .txt com as informações de cota, área e volume e, então, para diferentes planos de referência, obtém-se a relação CAV do reservatório.

5.4. COLETA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

A coleta de dados de profundidade com o ecobatímetro é um procedimento que mede uma distância de maneira indireta, por meio do deslocamento de ondas de som, e está sujeito às incertezas relacionadas às diversas etapas envolvidas no processo: calibração, desempenho dos equipamentos, condições ambientais, entre outras. Portanto, optou-se por realizar um levantamento batimétrico de verificação de maneira direta, com uma corda graduada.

Para isto, foram determinados 25 pontos no reservatório, em locais de diferentes profundidades, escolhidos de acordo com os dados brutos visualizados no HYPACK®. Os pontos foram salvos como um arquivo .tgt do programa (Figura 15), caracterizando pontos alvo na área do levantamento, facilitando a orientação da navegação na ferramenta *Survey*.

Figura 15 – Localização dos pontos de verificação na tela do HYPACK®.

Em campo, a montagem dos equipamentos foi constituída por uma antena receptora GPS conectada ao *Toughbook* (Figura 16) para orientação da navegação até os pontos de interesse. A medição da profundidade com a corda graduada foi realizada pelo técnico e, então, os valores das leituras e as coordenadas do local registradas na tela do computador foram anotadas manualmente.

Figura 16 – *Toughbook* e antena GNSS.

A tabela gerada com as informações das coordenadas espaciais x,y,z dos 25 pontos foi importada no *software* ArcGIS para possibilitar a comparação entre os dados amostrados e o valores das profundidades nos mesmos pontos do modelo TIN. Para a comparação, o valor da profundidade foi corrigido, conforme a cota de referência adotada para todos os dados do levantamento com o ecobatímetro, a partir da informação do nível d'água no dia da coleta.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

A coleta de dados em campo gerou um arquivo de pontos .shp, com informações x,y,z de todos os pontos localizados nos traçados das seções equidistantes em 100 m. Com as correções de profundidade e tratamento de erros grosseiros já realizados na etapa de pré-processamentos dos dados, a visualização dos pontos no ArcGIS permitiu que fossem identificados pontos medidos não pertencentes ao traçado das seções, os quais foram eliminados.

O carregamento dos dados da batimetria de 2010 e 2018 na tela do ArcGIS, conforme mostrado na Figura 17, mostra o posicionamento de todos os pontos coletados e a comparação entre o traçado das seções nas duas campanhas.

Figura 17 – Seções transversais das batimetrias 2010 e 2018.

Na comparação das seções de pontos coletados, pode-se perceber alguns traçados não coincidentes em sua totalidade. A primeira seção na entrada de cada tributário - corrêgo Perdizes, ribeirão do Lobo e rio Itaqueri - mostra traçados completos em 2010 e incompletos em 2018, pois o acesso de barco a estes locais estava comprometido pela pequena lâmina d'água disponível para a navegação. Os traçados na região de entrada do rio Itaqueri se estendem mais em 2018, uma vez que em 2010 a área estava comprometida para coleta pela presença de banco de macrófitas.

As pequenas áreas não coincidentes correspondem aos pontos não registrados pelo HYPACK® durante a campanha 2018. As condições de coleta de levantamentos hidrográficos fazem com que o sinal do sistema DGPS RTK sofra perdas e impossibilite o registro da profundidade nos pontos sem dados de posicionamento. A perda do sinal pode estar relacionada ao efeito do multicaminhamento (LIU et al., 2012), que ocorre quando as antenas estão próximas às superfícies refletoras, como os corpos d'água, causando multi reflexão do sinal antes de alcançar a antena do receptor.

Por fim, previamente à geração dos MDEs, decidiu-se remover os pontos coletados em 2018 das áreas onde estavam presentes as macrófitas em 2010, para melhor comparação dos dados.

6.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS

A transformação dos pontos da batimetria em MDE, por meio das ferramentas de criação de modelos TIN e raster, gerou mapas do leito do reservatório em 2010 e em 2018 que possibilitam a visualização do padrão de profundidade das superfícies.

O modelo TIN dos dois anos analisados, apresentados na Figura 18, mostram que as bordas do reservatório e as regiões de montante, correspondentes a entrada dos tributários, são as áreas com menor profundidade. Ainda é possível observar a declividade do terreno, pela variação na largura das faixas de cor da escala, as quais são mais estreitas na região próxima à barragem e se tornam faixas mais largas na direção sul, entrada do ribeirão do Lobo e do rio Itaqueri.

A cota máxima dos dois mapas, 703,06 metros, é referente à elevação atribuída ao contorno do reservatório na criação destes MDEs e as cotas mínimas são iguais a 690,42 m em 2010 e 690,12 m em 2018, apontando uma profundidade máxima próxima de 13 m em ambos os casos. Pode-se dizer que os valores de profundidade a partir da cota de referência

adotada são quase constantes ao longo do ano, uma vez que a operação da usina mantém o nível d'água próximo à cota de 703,00 m, como descrito no item 4.

Figura 18 – Modelo TIN do leito do reservatório do Lobo em 2010 e 2018.

A transformação dos modelos TIN para raster manteve o padrão do leito do reservatório, mostrado na Figura 19, mas também deixou mais claro o traçado original do canal do ribeirão do Lobo, facilitando a visualização da morfologia do terreno.

Nota-se que o modelo raster, por diferir do modelo TIN no princípio de interpolação, gerando superfícies de diferentes grades, apresenta cotas mínimas mais altas que as calculadas pelo modelo TIN. Em 2010, a cota mínima é igual a 691,06 m e em 2018 é igual a 690,77 m.

Figura 19 – Modelo raster do leito do reservatório do Lobo em 2010 e 2018.

6.2.1. Análise do assoreamento

A análise da diferença entre as superfícies de 2010 e 2018 foi feita por meio das ferramentas *Surface Difference* e *Map Algebra*, que utilizam, respectivamente, os modelos TIN e raster como dados de entrada, como descrito no item 5.3.2.

Na Figura 20 são apresentados os mapas resultantes da execução das ferramentas acima e aponta, nas áreas em vermelho dos dois mapas, os locais onde houve acúmulo de sedimentos durante os 8 anos entre os levantamentos batimétricos.

O mapa da esquerda, do modelo TIN, permite que sejam visualizadas as áreas onde o leito do reservatório em 2018 está acima, abaixo, ou é o mesmo da referência 2010. Cada polígono deste mapa possui um volume e uma área e, então, a partir destes dados, calcula-se os valores totais correspondentes a cada posição relativa entre os mapas (Tabela 1).

A álgebra de mapas raster, à direita, faz a mesma avaliação, porém, apresenta os resultados de maneira diferente, uma vez que os mapas são constituídos por grades diferentes. Cada célula deste mapa tem um valor, positivo, quando a superfície de 2018 está acima, e negativo, quando está abaixo da superfície de 2010. Assim, é possível visualizar, de maneira

mais detalhada, os pontos onde houve maior ou menor acúmulo de sedimentos, ou se estão pouco ou muito abaixo da referência de 2010.

Figura 20 – Comparação entre os dados 2010 e 2018. Diferença entre superfícies TIN (esquerda); Álgebra de mapas entre superfícies raster (direita).

Tabela 1– Volumes calculados pela ferramenta *Surface Difference* entre os modelos TIN 2010 e 2018.

	Volume (m³)	Área (m²)	Distribuído (m/m²)
Abaixo	-1,37.10 ⁶	4,79.10 ⁶	-0,29
Igual	0	4,71.10 ⁴	-
Acima	1,88.10 ⁵	8,27.10 ⁵	0,23

A partir dos dados da Figura 20 e da Tabela 1, o assoreamento no reservatório do Lobo pode ser determinado como característico de algumas áreas nas bordas do reservatório, principalmente na entrada dos tributários, e na proximidade da barragem e, quantitativamente, corresponde a $1,88.10^5 \text{ m}^3$, representando, em média, 23 cm/m^2 .

A relação CAV, gerada para os dois anos analisados conforme metodologia do item 5.3.2, foi tabelada e plotada em um gráfico (Figura 21), caracterizando a curva CAV do

reservatório do Lobo nos anos 2010 e 2018. Os dados tabelados da relação CAV de 2010 e de 2018 são apresentados, respectivamente, no Apêndice A e no Apêndice B.

Figura 21 – Curva CAV: Reservatório do Lobo 2010/2018.

O volume do reservatório em 2018, na cota 703,06m, que corresponde ao maior nível d'água utilizado no cálculo da curva CAV, é igual a 25,1 hm³. Com isso, o volume do assoreamento acumulado nos 8 anos, de 1,88.10⁵ m³ (Tabela 1), corresponde a 0,8% do volume total do reservatório.

A análise da Figura 21 também mostra que o volume calculado a partir da superfície de 2018 é, no total, maior que o calculado de 2010, que, na cota 703,06 m, é igual a 23,9 hm³. As maiores profundidades em 2018, apresentadas na Figura 20, e o volume de 1,37.10⁶ m³ que se encontra abaixo da referência de 2010 (Tabela 1), agregam informações e justificam o fato da curva CAV de 2018 estar deslocada abaixo da curva de 2010.

É importante ressaltar que, conforme os resultados apresentados, o total de medidas de 2018 com maiores profundidades em relação a 2010 é bastante significativo e representa 85% de toda a área do reservatório. Essa área, em média, está 29 cm abaixo da referência e corresponde a 5% do volume total do reservatório em 2018.

Desta forma, o resultado encontrado de 0,8% de assoreamento corresponde à análise apenas do volume de 2018 que se encontra acima da referência. No entanto, se considerados os volumes totais, como apresentados na curva CAV, o volume de 2018 é 5% maior que o volume de 2010 e, como o volume de 2018 abaixo da referência também é de 5%, pode-se

dizer que, se ignoradas as medidas negativas, os volumes foram coincidentes e o assoreamento foi próximo de inexistente.

Para uma análise mais detalhada e na busca de eliminação de erros, o item 6.3 apresenta novos dados para execução das mesmas ferramentas na intenção de se aprimorar o resultado do assoreamento no reservatório do Lobo.

6.3. AJUSTE PARA COMPARAÇÃO

O levantamento batimétrico de 2018 apresentou, no geral, dados mais profundos em relação ao levantamento de 2010, fazendo com que etapas do processo fossem revistas para discussão dos resultados, uma vez que a remoção de sedimentos do fundo do reservatório de forma natural ou por obras não é considerada como uma opção plausível nesta discussão.

A frequência de operação do ecobatímetro de 200 Hz foi confirmada, sendo esta a mesma da operação em 2010 e a velocidade do som de 1505 m/s utilizada durante a campanha deste trabalho teve sua confirmação em campo, quando foi realizada a técnica do *bar-check*, em que também foram calibrados o ganho e o TVG do ecobatímetro.

Assim, mesmo com a calibração *bar-check*, decidiu-se realizar o levantamento de 3 seções, a número 23 - na região mais profunda do reservatório, próxima a barragem, a número 60 - na região da metade do comprimento do reservatório, e a número 51 - na região de montante ao sul, na entrada do tributário do ribeirão do Lobo.

A montagem dos equipamentos em campo foi a mesma da apresentada no item 5.2. Nesta etapa, apenas a velocidade do som foi o parâmetro a ser analisado: cada seção foi medida 6 vezes, com diferentes configurações sonoras. As velocidades 1478, 1484, 1490, 1505 e 1532 m/s foram utilizadas e a última medida corresponde à velocidade de 1532 m/s, mas com diferente configuração do TVG.

Na Figura 22 apresenta-se o resultado destas 6 medições na seção 60, comparados com os dados dos levantamentos de 2010 e 2018 da mesma seção. Ressalta-se que a última medida, com velocidade de 1532 m/s e diferente TVG, não está representada no gráfico por ter se apresentado bastante inconsistente. Os gráficos das seções 23 e 51 tiveram comportamentos semelhantes e são apresentados no Apêndice C.

Figura 22 – Comparação entre medições da seção 60 com variação da velocidade do som configurada no ecobatímetro.

A avaliação visual das medidas das 3 seções mostra que o levantamento de 2018 apresentou um comportamento de erro sistemático - que será um pouco mais discutido nas considerações finais - com um deslocamento do perfil abaixo do perfil das medidas de 2010 e de todas as medidas de teste da velocidade do som, inclusive da medida realizada na velocidade de 1505 m/s, que corresponde a mesma utilizada na campanha de 2018.

A partir deste resultado, para se minimizar a espessura da faixa de deslocamento do perfil, e reduzir o volume negativo apresentado na Tabela 1, foram aplicadas correções aos dados do levantamento de 2018. Assim, a primeira correção foi determinada a partir dos dados coletados das 3 seções de teste de velocidade, com os quais foi possível determinar um valor de velocidade do som melhor ajustado em relação aos dados de 2010, e a segunda correção foi determinada a partir de diferenças médias entre as profundidades de 2010 e 2018.

A primeira correção foi aplicada por meio do *Single Beam Editor* do HYPACK®, com o qual, como já mencionado, é possível aplicar correção da velocidade do som nos dados dos transectos. Os arquivos .edt salvos após pré-processamento (item 5.3.1), podem ser carregados novamente na ferramenta do editor e, no início do processo, determina-se o valor da velocidade do som para qual os dados serão transformados.

Na determinação da velocidade do som a ser utilizada para correção, os dados das medidas das 3 seções foram analisados de acordo com a Figura 23, que apresenta a diferença média dos dados coletados em relação aos valores de 2010, que são a referência 0 no eixo vertical do gráfico.

Nota-se, na Figura 23, que a velocidade de 1532 m/s indicou as maiores profundidades, com maiores diferenças em relação a 2010, tanto por faixa de profundidade quanto na média total, e as medidas de 1478 e *1532 m/s (diferente TVG), também se mostraram bastante inconsistentes por faixa de profundidade, apesar de estarem semelhantes a outras medidas na média total.

As velocidades 1484, 1490 e 1505 m/s apresentaram dados mais coerentes em algumas faixas de profundidade, apesar de alguns valores mal ajustados, como a diferença da medida de 1484 m/s na faixa de 11 a 12 m, que é aproximadamente 40 cm acima da referência. Tais valores anômalos são devido à representatividade do conjunto de dados utilizados no cálculo destas diferenças médias, uma vez que apenas 3 seções foram medidas e poucos pontos foram coletados em faixas de profundidades maiores, representando, portanto, medidas locais específicas.

O valor de 1484 m/s foi o que melhor se ajustou aos dados de 2010 nas profundidades médias, onde a faixa de deslocamento do perfil é mais evidente, e apresenta a menor diferença média total em relação a 2010; logo, este valor de velocidade foi escolhido para aplicação na correção, visto que a deposição de sedimentos no reservatório não é intensa e as alterações no leito deveriam ser mínimas.

Figura 23–Variação das medidas das 3 seções teste em relação ao levantamento de 2010.

Após esta primeira correção, os dados foram novamente processados no ArcGIS para análise dos resultados gerados pelas ferramentas *Surface Difference* e *Map Algebra* (Figura 24 e Tabela 2). O novo conjunto dos dados da batimetria 2018 corrigidos para a velocidade do som 1484 m/s é denominado 2018_sv1484.

Figura 24 – Comparação entre os dados 2010 e 2018_sv1484. Diferença entre superfícies TIN (esquerda); Álgebra de mapas entre superfícies raster (direita).

Tabela 2 – Volumes calculados pela ferramenta *Surface Difference* entre os modelos TIN 2010 e 2018_sv1484.

	Volume (m³)	Área (m²)	Distribuído (m/m²)
Abaixo	-1,13.10 ⁶	4,66.10 ⁶	-0,24
Igual	0	4,71.10 ⁴	-
Acima	2,10.10 ⁵	9,54.10 ⁵	0,22

Visualmente, os mapas da Figura 24 ainda mostram o quão significativo é o volume formado pelas diferenças negativas entre os modelos; entretanto, a correção da velocidade do som teve algum efeito sobre o resultado do processamento dos dados, pois os polígonos do TIN 2018 que estão abaixo da referência tiveram área reduzida em 3%, correspondendo à

redução de 17% do volume, e os polígonos que estão acima, que caracterizam o assoreamento, tiveram aumento de 15% em área, 11% em volume.

O volume total do reservatório do Lobo na cota 703,06 m calculado a partir da nova superfície é igual a 24,8 hm³, 1,2 % menor que o volume 2018 original (igual a 25,1 hm³) e 3,9% maior que o volume de 2010 (igual a 23,9 hm³).

Em seguida, a aplicação da segunda correção se baseia em um ajuste manual das profundidades, de acordo com a diferença média entre os dados de 2010 e 2018_sv1484. A determinação da diferença média foi feita por faixa de profundidade, assim como na análise dos dados das 3 seções medidas para teste da velocidade do som.

Como exemplo, todos os pontos coincidentes da superfície 2010 e 2018, com valores de profundidade entre 1 e 2 m, foram subtraídos e, a partir da diferença entre todos os pontos, obteve-se uma média da diferença entre as superfícies nesta faixa de profundidade. Então, quando essa diferença é negativa, o valor é aplicado aos dados entre 1 e 2 m de profundidade da superfície de 2018_sv1484, fazendo com que o perfil da mesma, que estava abaixo, seja deslocado para cima.

Para que as diferenças médias pudessem ser mais específicas, o reservatório foi dividido em 11 setores, pois assim os valores são mais representativos das medidas na área de cada setor (Figura 25).

Figura 25 – Divisão de setores para cálculo das diferenças médias.

Cada setor possui um conjunto de pontos separados por faixas de 1 metro de profundidade, que gerou uma planilha com as diferenças entre cada ponto e, então, a média de cada faixa. Os valores médios foram, por fim, aplicados ao conjunto de pontos de cada setor por meio do programa ArcGIS, gerando um novo arquivo de dados da batimetria de 2018, agora denominado 2018_ajustado.

Ressaltando que a comparação entre pontos coincidentes dos mapas dos anos analisados foi possível por meio da transformação do modelo raster para pontos, que transforma cada célula da grade em ponto, com valores atribuídos de elevação conforme os valores das células.

O novo conjunto de dados gerou novos modelos TIN e raster para os dados de 2018 e as ferramentas *Surface Difference* e *Map Algebra* foram mais uma vez executadas. Na Figura 26 e na Tabela 3 são apresentados os resultados finais da comparação entre os dados de batimetria 2010 e os dados 2018_ajustado.

Figura 26 – Comparação entre os dados 2010 e 2018_ajustado. Diferença entre superfícies TIN (esquerda); Álgebra de mapas entre superfícies raster (direita).

Tabela 3 – Volumes calculados pela ferramenta *Surface Difference* entre os modelos TIN 2010 e 2018_ajustado.

	Volume (m ³)	Área (m ²)	Distribuído (m/m ²)
Abaixo	-3,14.10 ⁵	2,82.10 ⁶	-0,11
Igual	0	4,71.10 ⁴	-
Acima	4,00.10 ⁵	2,79.10 ⁶	0,14

Os mapas apresentados na Figura 26, resultantes do processamento após aplicação dos ajustes, permitem que seja inferido, por análise visual, que o volume negativo da comparação foi significativamente reduzido. As escalas verde, do mapa da esquerda, e azul, do mapa da direita, foram minimizadas pelo processo de ajuste.

O volume total do reservatório em 2018 é agora calculado em 23,8 hm³, 0,4% menor que o volume do reservatório em 2010. Na comparação entre os volumes obtidos a partir dos dados 2018 e 2018_ajustado, tem-se que o volume das áreas abaixo da referência foi reduzido em 77%, correspondendo, agora, a 1,3% (3,14.10⁵ m³); e o volume acima da referência, elevado em 113%, representando 1,7% (4,00.10⁵ m³) do volume total após correções.

O modelo TIN 2018_ajustado foi usado para o cálculo de nova relação CAV (Apêndice D) e, novamente, os valores tabelados foram plotados com os valores da relação CAV 2010, resultando nas curvas apresentadas na Figura 27.

Figura 27 – Curva CAV: Reservatório do Lobo 2010/2018_ajustado.

A curva CAV final mostra que, no período de 8 anos entre os levantamentos batimétricos, não houve mudança significativa de volume no reservatório do Lobo, inclusive na cota máxima representada no gráfico, que corresponde a cota normal de operação. Sendo importante ressaltar que a curva CAV apresenta uma comparação entre os volumes totais do reservatório nos anos analisados, diferente da ferramenta *Surface Difference*, que possibilitou identificar a diferença entre o volume de assoreamento propriamente dito, uma vez que, no caso deste estudo, a diferença negativa de volume foi um parâmetro signifiicante na análise.

6.4. PONTOS DE VERIFICAÇÃO

De acordo com a metodologia do item 5.4, os dados do levantamento batimétrico de 2018 foram analisados em relação a uma amostra de 25 pontos, medidos de maneira direta por uma corda graduada. As medidas, comparadas aos valores de profundidade do TIN 2018 e do TIN 2018_ajustado nos mesmos pontos, são apresentadas na Figura 28 e no Apêndice E, que mostra as medidas de cada ponto e a variação percentual da medida do modelo TIN em relação à medida da corda.

Figura 28 – Relação entre profundidades dos modelos TIN e coletadas por corda graduada.

A variação média dos pontos é igual a 7% no caso do TIN 2018 e 11%, no TIN 2018_ajustado, o que aponta para um melhor ajuste dos dados 2018 originais em relação aos dados de referência da corda graduada. O gráfico da Figura 25 corrobora tal afirmação, já que o ajuste linear dos pontos do TIN 2018 possui inclinação da reta mais próxima do valor unitário, e o valor do coeficiente de correlação é superior.

6.5. DISCUSSÕES

O resultado da comparação entre as batimetrias 2010 e 2018, independente de ajustes aplicados aos dados, mostra que o aporte de sedimentos no reservatório do Lobo é baixo e não provoca alterações significativas neste ambiente, considerando que o reservatório existe desde a década de 30 e, segundo Catalano (2018) não há registros de intervenções necessárias por motivo de acúmulo de sedimentos.

A área de contribuição do reservatório do Lobo, independente das características de uso do solo, é caracterizada por pequenos barramentos nos cursos d'água afluentes ao reservatório e possui uma área alagada expressiva na entrada do rio Itaqueri, um dos principais tributários; logo, tais características interferem na dinâmica do transporte de sedimentos na bacia e podem causar a deposição dos mesmos antes de atingirem o reservatório (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2014).

É importante destacar que, nos meses de março/abril de 2018, a tubulação condutora da água represada até a usina passou por manutenção para corrigir locais de vazamento, assim, a vazão efluente do reservatório foi toda direcionada à saída do canal natural, o que pode ter alterado o padrão de escoamento próximo à barragem, modificando o leito nesta área.

Em relação à coleta em campo, a condição de perdas de sinal do sistema DGPS RTK fez com que o planejamento de instalação dos receptores base tivesse que ser adaptado. À princípio, as bases tinham 3 pontos de coordenadas absolutas conhecidas (VITTI et al., 2015), que seriam utilizadas na configuração do sistema. Entretanto, para melhor desempenho do equipamento, o ponto de instalação da base foi alterado diversas vezes em torno do reservatório, para que a distância entre a base e o móvel fosse minimizada e, consequentemente, as perdas evitadas.

A instalação da base em pontos de coordenadas desconhecidas é possível nas configurações do equipamento e apresentou medições com precisão satisfatória, mesmo sendo esperado que a precisão fosse prejudicada devido às condições de instalação (Figura 29). Contudo, quando a distância entre o barco e a base chegava próxima aos limites do alcance da

comunicação entre as antenas, notava-se perda significativa na precisão dos dados e, então, a coleta de dados era suspensa e a base movida para outro local mais próximo, e assim sucessivamente.

Figura 29 – Tela da controladora do GNSS com destaque na precisão dos dados.

Os arquivos de pontos de dados batimétricos permitem que o ArcGIS gere uma tabela com as estatísticas do conjunto, como apresentado na Tabela 4. Nota-se que a quantidade de pontos coletadas pelo ecobatímetro nas 72 seções foi semelhante, indicando que as falhas nos transectos não foi proporcionalmente significativa; contudo, as pequenas falhas foram suficientes para gerar valores atípicos no processo de comparação dos mapas.

Tabela 4 – Estatísticas dos conjuntos de dados de batimetria.

	Dados 2010	Dados 2018	Dados 2018_ajustado
Contagem de pontos	144617	147083	147083
Prof. máxima (m)	12,64	12,94	12,41
Prof. mínima (m)	0,52	0,43	0,42
Prof. média (m)	4,44	4,93	4,68

O ajuste dos dados 2018 provocou a maior variação percentual na profundidade média, que foi reduzida em 5,1% (25 cm). Em termos absolutos, a profundidade máxima sofreu redução de 53 cm (4,1%).

Como apresentado nos itens anteriores, a variação do volume total de 2018 em relação ao volume total de 2010 foi ajustado conforme as correções foram aplicadas, fazendo com que

a variação negativa da comparação com dos dados originais de 2018 passasse a ser positiva, com os dados ajustados (Tabela 5).

Tabela 5 – Variação do volume total dos modelos TIN em relação ao TIN 2010.

Modelo	Volume (hm³)	Variação (%)
TIN 2010	23,9	-
TIN 2018	25,1	-5,0
TIN 2018_sv1484	24,8	-3,9
TIN 2018_ajustado	23,8	0,4

Na Tabela 6 são mostrados os dados apresentados de maneira resumida, indicando o percentual dos volumes negativos (Abaixo) e positivos (Acima) em relação ao volume total de cada superfície. Nota-se que o ajuste dos dados teve efeito positivo na comparação das superfícies, reduzindo o volume negativo, que corresponde ao erro sistemático das medidas.

Tabela 6 – Variação dos volumes negativos e positivos dos conjuntos de dados 2018.

	2018		2018_sv1484		2018_ajustado	
	(m³)	(%)	(m³)	(%)	(m³)	(%)
Abaixo	-1,37.10 ⁶	5,5	-1,13.10 ⁶	4,6	-3,14.10 ⁵	1,3
Acima	1,88.10 ⁵	0,8	2,10.10 ⁵	0,8	4,00.10 ⁵	1,7
Total	25,1.10 ⁶		24,8.10 ⁶		23,8.10 ⁶	

Desta forma, o assoreamento determinado pela comparação dos volumes totais é igual a 0,4% de perda de volume do reservatório do Lobo em um período de 8 anos. Enquanto que, a análise discretizada da diferença das superfícies, indica que o assoreamento é igual a 1,7%, considerando os dados ajustados. Mas, ressalta-se que tais informações são complementares, visto que a diferença entre o volume negativo e positivo da Tabela 6 indica exatamente a diferença entre o volume total de 2010 e 2018_ajustado.

Nas etapas de processamento dos dados, informações entre os modelos TIN e raster foram aplicadas de maneira cruzada; portanto, destaca-se que também existe uma variação entre os volumes totais gerados por uma superfície TIN ou raster (Tabela 7), e é significativa, considerada a magnitude do assoreamento encontrada.

Tabela 7 – Variação do volume do reservatório do Lobo entre modelo TIN e raster.

Dados	Variação (m³)	Variação (%)
2010	1,55.10 ⁵	0,65
2018	1,50.10 ⁵	0,60
2018_sv1484	1,49.10 ⁵	0,62
2018_ajustado	1,44.10 ⁵	0,61

Os ajustes aplicados aos dados se justificam pela presença de um erro sistemático nas medições, fazendo com que a superfície de 2018 esteja, em geral, deslocada abaixo da superfície de 2010, onde deveriam ser coincidentes. Assim, a correção a partir de diferenças médias, além de reduzir o volume negativo da comparação, aumentou o volume de assoreamento.

Os levantamentos batimétricos para avaliação de alterações no leito de corpos d'água, conforme US Army Corps Of Engineers (2013), Ferrari (2006) e Morris e Fan (2010), devem ser realizados de acordo com as condições de aporte e deposição de sedimentos específicas de cada localidade. A Resolução nº 03 de 2010 estabelece um intervalo de 10 anos para atualização da curva CAV de qualquer empreendimento. Com isso, e baseado nos resultados deste estudo, pode-se dizer que a norma da ANEEL pode exigir, de casos como o reservatório do Lobo, um trabalho dispensável no período estabelecido.

Os resultados obtidos neste trabalho apontam para diversas causas de erros na metodologia de comparação de batimetrias, podendo estar relacionados à procedimentos, equipamentos ou algoritmos de processamento. Desta forma, em casos como do reservatório do Lobo, onde as proporções do assoreamento podem estar equivalentes às proporções de erros, a determinação do volume de assoreamento pelo método da curva CAV pode não ser tão eficiente. A aplicação de diferentes ferramentas de processamento dos dados em ambiente SIG se revelaram uma metodologia mais detalhada, que possibilita análises mais específicas dos resultados.

Os principais usos para os quais a água do reservatório do Lobo é destinada: geração de energia e recreação, não são afetados pelo assoreamento identificado. Desta maneira, é plausível que, em reservatórios que tenham condições semelhantes ao Lobo, o levantamento batimétrico para atualização da curva CAV seja conduzido apenas nas áreas mais susceptíveis à deposição de sedimentos, sendo mais viável técnica e economicamente um levantamento detalhado destas áreas.

Apesar da legislação vigente não enquadrar a usina do Lobo como PCH, as considerações técnicas para a realização do levantamento batimétrico apontam para melhores resultados quando considerada PCH. Segundo a norma, o Lobo só é enquadrado como UHE, pois, quando da sua criação na década de 30, seu único uso era geração de energia, o que não corresponde à realidade dos usos múltiplos aos quais é submetido atualmente. Caso o levantamento fosse realizado utilizando a equidistância de 500 m entre os transectos, dada as dimensões do reservatório, seu leito não seria bem representado, perdendo ainda mais informações no modelo do terreno.

Entre as vantagens da etapa de deposição de sedimentos no ciclo hidrossedimentológico, pode-se citar o ambiente favorável que é constituído nas entradas dos tributários do reservatório do Lobo, onde pode ser observado o desenvolvimento e reprodução de diversas espécies de peixes.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A metodologia usada para o levantamento batimétrico aplicada neste trabalho foi eficiente e os resultados foram satisfatórios, indicando valores pouco significantes de assoreamento no reservatório do Lobo.
- Os erros sistemáticos, aos quais aparelhos de medição indireta estão sujeitos, se mostraram um desafio nos estudos de comparação de batimetrias e resultados neste formato não são amplamente discutidos nos meios de compartilhamento de informações acadêmicas, impossibilitando comparações.
- As configurações da amplitude de saída do sinal sonoro podem ter sido a causa do erro sistemático presente nas medidas, sendo recomendado que se desenvolva outros estudos para melhor definição e esclarecimento dessa variável no processo.
- O desempenho da modelagem no processamento dos dados pode ter sido afetado pelo formato da distribuição espacial dos pontos, normal de batimetrias. A grande densidade de pontos em linhas paralelas não favorece o formato da triangulação de Delaunay no modelo TIN.
- O parâmetro latência, na configuração dos equipamentos no HYPACK®, é coincidente para os equipamentos, o ecobatímetro e o DGPS RTK, assim como no projeto do levantamento de 2010. Contudo, é recomendado um teste para calibração da latência nas condições de operação no local do reservatório do Lobo para maior precisão nos dados coletados.
- A utilização de ferramentas em ambiente SIG se mostraram úteis na complementação de informações a respeito do volume de assoreamento que não podem ser inferidas pela comparação das curvas CAV.
- O intervalo de tempo entre levantamentos batimétricos para atualização da curva CAV proposto pela Resolução nº 03 de 2010 poderia ser revisto e adequado aos diversos casos existentes no Brasil. Assim como a equidistância entre seções poderia ser analisada conforme o padrão de cada reservatório, em oposição à formula universal recomendada pela norma.
- A legislação de enquadramento de empreendimentos como PCH ou UHE pode acarretar soluções técnicas significativamente diferentes, uma vez que a Resolução nº 03 de 2010 se baseia em tal atributo na determinação da equidistância entre as linhas

de sondagem. Casos como o do reservatório do Lobo devem considerar a relevância deste termo e analisar o enquadramento mais apropriado tecnicamente.

- O período de 8 anos entre os dados analisados não foi suficiente para identificar alterações expressivas no leito do reservatório da maneira como o levantamento foi conduzido. Assim, uma batimetria mais detalhada das áreas mais alteradas, indicadas neste estudo, pode quantificar o assoreamento de maneira mais precisa.
- Espera-se que o resultado deste estudo possa servir para o desenvolvimento de estudos posteriores, no aprimoramento de técnicas e para a avaliação do assoreamento em reservatórios que estejam sob condições semelhantes ao reservatório do Lobo.
- Espera-se que este trabalho possa contribuir para melhor entendimento do ambiente e suas relações na bacia hidrográfica do ribeirão do Lobo, auxiliando a comunidade e gestores locais em processos decisórios que envolvam ações para preservação dos recursos hídricos locais.

REFERÊNCIAS

- ALBERTIN, L. L.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Cálculo do Volume e Análise da Deposição de Sedimentos do Reservatório de Três Irmãos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 4, p. 57-67. out/dez 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Brasília: ANA, SGH, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução N° 394**, de 04 de dezembro de 1998 (revogada). Brasília: ANEEL, 1998a.
- _____. **Resolução N° 396**, de 04 de dezembro de 1998 (revogada). Brasília: ANEEL, 1998b.
- _____. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002.
- _____. **Resolução N° 652**, de 9 de dezembro de 2003. Brasília: ANEEL, 2003.
- _____. **Contrato de concessão de geração nº 001/2006**. Cláusula terceira, subcláusula segunda. Brasília: ANEEL, 2006.
- _____.; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Resolução Conjunta N° 03**, de 10 de agosto de 2010. Brasília: ANEEL; ANA, 2010.
- _____. **Outorgas e registros de geração**. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/>> Acesso em: 18 dez. 2018.
- BIELENKI JÚNIOR, C.; VITTI, D. M. C.; MAUAD, F. F. Superfícies analíticas como meio de avaliação de estratégias de processamento de dados batimétricos. **Ciência & Engenharia**, v. 24, n. 1, p. 143-149, jan/jun 2015.
- BRUK, S. (Org.) **Methods of computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs**. Unesco, Paris, 1985. p. 1-54.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.
- CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL. 2000. 140p.
- CASTILLO-LÓPEZ, E. et al. The importance of atmospheric correction for airborne hyperspectral remote sensing of shallow waters: application to depth estimation. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 10, p. 3919-3929, 2017.
- CATALANO, M. A. G. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <marianagb2@gmail.com> em 12 nov. 2018.

COLLISCHONN, B.; CLARKE, R.T. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 719-727, out/dez 2016.

COOPER, M.; LEWIS, S.; STIEGLITZ, T.; SMITHERS, S. Variability of the useful life of reservoirs in tropical locations: A case study from the Burdekin Falls Dam, Australia. **International Journal of Sediment Research**, v. 33, p. 93–106, 2018.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos**. 2ª rev. Marinha do Brasil: 2017.

EAKIN, H. M. **Silting of Reservoirs**. Technical Bulletin No 524. United States Department of Agriculture. Revised by Brown, C. B. Washington, D.C. U. S. Government Printing Office, 1939.

ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; PIOLTINE, V; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. Comparação de diferentes batimetrias do reservatório da Usina Hidroelétrica do Lobo. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009, Campo Grande, MS. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Assessment of the accuracy of different standard methods for determining reservoir capacity and sedimentation. **Journal of Soils and Sediments**, v.14, p. 1224-1234. 2014.

ESTIGONI, M.V.; REQUENA SANCHEZ, N.P.; MIRANDA, R.B.; KUWAJIMA, J.I.; MAUAD, F.F. Comparison of methods to assess reservoir volume and sedimentation based on bathymetric surveys. **3rd IAHR Europe Congress**, Book of Proceedings. Porto, Portugal. 2014.

ESTIGONI, M. V.; MIRANDA, R.B.; MAUAD, F. F. Hydropower reservoir sediment and water quality assessment. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 28, n. 1, p. 43-56, 2017.

FERRARI, R. L. **Reconnaissance techniques for reservoir surveys**. U. S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation, Denver, 2006.

FUNDAÇÃO PARA O INCREMENTO DA PESQUISA E DO APERFEIÇOAMENTO INDUSTRIAL. **Estudo do assoreamento do reservatório formado pela barragem da UHE Três Irmãos**. São Carlos, 2009. (Relatório P&D, Convênio FIPAI/CESP).

FURNANS, J.; AUSTIN, B. Hydrographic survey methods for determining reservoir volume. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 139-146. 2008.

GAO, J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. **Progress in Physical Geography**, v. 33, n. 1, p. 103-116. 2009.

GARCÍA, M. H., ed. **Sedimentation engineering - Processes, measurements, modeling and practice**. Manual 110, American Society of Civil Engineers – ASCE. 2007.

GUERTAULT, L.; FOX, G. A. M. Impact of Data Availability and Resolution on Long-Term Sedimentation Estimates in a Storage Reservoir. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 10. 2018.

HENG, S.; SUETSUGI, T. Using Artificial Neural Network to Estimate Sediment Load in Ungauged Catchments of the Tonle Sap River Basin, Cambodia. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 5, p. 111-123. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Modelagem digital de terreno. **Divisão de processamento de imagens**. [2018?]. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/modelagem.html>> Acesso em: 09 out 2018.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. Positioning. In:_____. **Manual on hydrography. Publication C-13**. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2011a. cap. 2.

_____. Depth determination. In:_____. **Manual on hydrography. Publication C-13**. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2011b. cap. 3.

KAUFMAN, A. J. Lecture 3: **Fluid dynamics and sediment transport**. Disponível em: <www.geol.umd.edu/~kaufman/ppt/G342_06/2Feb06_lec.doc> 2006.> Acesso em: 03 abr 2018.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. **Engenharia de recursos hídricos**. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo/SP. 1978.

LIU, C.; ZHOU, F.; GAO, J.; WANG, J. Some problems of GPS RTK technique application to mining subsidence monitoring. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 22, n. 2, p. 223-228. 2012.

LOUGHRAN, R. J. The calculation of suspended-sediment transport from concentration v. discharge curves: chandler river, n.s.w. **Catena**, v. 3, p. 45-61, 1976.

MATOS, A. J. S. **Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional “CAV-NH”**. 125p. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo, Brasil. 2012.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 13, n. 1, p. 53-64. 2009.

MINHONI, R. T. A.; BRITO, G. M.; AZEVEDO, R. F. Uso de ecobatímetro monofeixe na determinação da curva Cota x Área x Volume do reservatório da PCH Pipoca – Minas Gerais – Brasil. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 1, p. 87-100, jan/mar 2017.

MIRANDA, R.B. **Ferramenta computacional para a estimativa de parâmetros hidrossedimentológicos em reservatório: estudo de caso da PCH de Mogi-Guaçu (SP)**. 226p. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo, Brasil. 2015.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir Sedimentation Handbook**, McGraw-Hill Book Co., New York. Versão Eletrônica. Ver 1.04, 2010.

NAJHAN, R. M. N. et al. Evaluating satellite-derived bathymetry accuracy from Sentinel-2A high-resolution multispectral imageries for shallow water hydrographic mapping. **Earth and Environmental Science**, 169, 2018.

NAKAO, L. T. H.; KRUEGER, C. P. Análise dos métodos de posicionamento e dos parâmetros definidores da qualidade de um levantamento batimétrico. **Bulletin of Geodetic Sciences**, Articles section, Curitiba, v. 23, n. 3, p. 419-433, jul/set 2017.

POLETO, C.; LIMA, J. E. F. W.; ARAÚJO, J. C. Overview of the work in Latin America on erosion and sediment dynamics. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1213-1215. 2014.

SCHELLENBERG, G.; DONNELLY, R. C.; HOLDER, C.; AHSAN, R. Dealing with Sediment: Effects on Dams and Hydropower Generation. **Hidro Review**. 2017. Disponível em: <<http://www.hydroworld.com/articles/print/volume-25/issue-1/features/dealing-with-sediment-effects-on-dams-and-hydropower-generation.html>> Acesso em: 25 nov 2017.

SOUZA, J. C.; ALVARENGA, J. F. Dificuldades para atendimento à resolução conjunta ANEEL/ANA N° 03/2010: a visão do empreendedor. **PCH Notícias & SHP News**, v. 66, n. 3, p. 8-12. jul/set 2015.

SYQWEST INCORPORATED. **Bathy-500MF Multi Frequency – Survey Echo Sounder**: manual técnico. Rhode Islanda, EUA: [2000?].

TUNDISI, J.G.; BICUDO, C.E.M.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnology in Brazil**. Rio de Janeiro: ABC/SBL, 1995. 219-244p.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. The ecology of UHE Carlos Botelho (Lobo-Broa Reservoir) and its watershed, São Paulo, Brazil. **Freshwater Reviews**, v. 6, n. 2, fev 2014.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; RODRIGUES, S.L. **Gerenciamento e recuperação das bacias hidrográficas dos rios Itaqueri e do Lobo e da represa da UHE Carlos Botelho (Lobo-Broa)**. São Carlos: IIE, IIEGA, 2003.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydrographic Surveying**. Engineer Manual 1110-2-1003. 30 nov. 2013. Disponível em: <https://www.publications.usace.army.mil/usace-publications/engineer-manuals/?udt_43544_param_page=4>. Acesso em: 5 abr 2018.

VERSTRAETEN, G.; POESEN, J. Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. **Progress in Physical Geography**, v. 24, n. 2, p. 219-251. 2000.

VITTI, D. M. C.; BIELENKI JUNIOR, C.; MAUAD, F. F.; VERONEZ, M. R.; INOCÊNCIO, L. C. Implantação de rede geodésica local para levantamento topobatimétrico das áreas seca e rasa da represa do lobo, Itirapina-Brotas, SP. **Anais do XIV Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental**, p. 368-373. 2015.

WHITE, L.; HODGES, B. R. Filtering the signature of submerged large woody debris from bathymetry data. **Journal of Hydrology**, v. 309, p.53-65. 2005.

APÊNDICE A – Relação CAV 2010

Tabela 8 – Dados da relação Cota x Área x Volume de 2010 do Reservatório do Lobo.

Cota	Área (km²)	Volume (hm³)
690,50	$9,35 \cdot 10^{-06}$	$2,61 \cdot 10^{-07}$
691,00	$4,37 \cdot 10^{-04}$	$7,81 \cdot 10^{-05}$
691,50	$2,95 \cdot 10^{-03}$	$7,65 \cdot 10^{-04}$
692,00	$7,36 \cdot 10^{-03}$	$3,32 \cdot 10^{-03}$
692,50	$1,34 \cdot 10^{-02}$	$8,41 \cdot 10^{-02}$
693,00	$3,40 \cdot 10^{-02}$	$1,91 \cdot 10^{-02}$
693,50	$7,96 \cdot 10^{-02}$	$4,69 \cdot 10^{-02}$
694,00	$1,52 \cdot 10^{-01}$	$1,03 \cdot 10^{-01}$
694,50	$2,43 \cdot 10^{-01}$	$2,02 \cdot 10^{-01}$
695,00	$3,57 \cdot 10^{-01}$	$3,50 \cdot 10^{-01}$
695,50	$5,08 \cdot 10^{-01}$	$5,65 \cdot 10^{-01}$
696,00	$7,78 \cdot 10^{-01}$	$8,78 \cdot 10^{-01}$
696,50	1,18	1,36
697,00	1,59	2,06
697,50	1,92	2,94
698,00	2,22	3,98
698,50	2,52	5,16
699,00	2,84	6,50
699,50	3,19	8,00
700,00	3,53	9,68
700,50	3,86	$1,15 \cdot 10^{01}$
701,00	4,25	$1,36 \cdot 10^{01}$
701,50	4,70	$1,58 \cdot 10^{01}$
702,00	5,05	$1,82 \cdot 10^{01}$
702,50	5,30	$2,08 \cdot 10^{01}$
703,06	5,63	$2,39 \cdot 10^{01}$

APÊNDICE B – Relação CAV 2018

Tabela 9 – Dados da relação Cota x Área x Volume de 2018 do Reservatório do Lobo.

Cota	Área (km²)	Volume (hm³)
690,50	$8,99.10^{-05}$	$8,59.10^{-06}$
691,00	$1,94.10^{-03}$	$4,77.10^{-04}$
691,50	$4,26.10^{-03}$	$1,96.10^{-03}$
692,00	$8,88.10^{-03}$	$5,11.10^{-03}$
692,50	$2,17.10^{-02}$	$1,22.10^{-02}$
693,00	$5,72.10^{-02}$	$3,06.10^{-02}$
693,50	$1,25.10^{-01}$	$7,43.10^{-02}$
694,00	$2,30.10^{-01}$	$1,63.10^{-01}$
694,50	$3,53.10^{-01}$	$3,08.10^{-01}$
695,00	$4,91.10^{-01}$	$5,18.10^{-01}$
695,50	$7,04.10^{-01}$	$8,11.10^{-01}$
696,00	1,03	1,24
696,50	1,43	1,86
697,00	1,75	2,66
697,50	2,05	3,61
698,00	2,34	4,71
698,50	2,68	5,96
699,00	3,01	7,38
699,50	3,36	8,98
700,00	3,70	$1,07.10^{01}$
700,50	4,02	$1,27.10^{01}$
701,00	4,37	$1,48.10^{01}$
701,50	4,70	$1,70.10^{01}$
702,00	5,00	$1,95.10^{01}$
702,50	5,27	$2,20.10^{01}$
703,06	5,63	$2,51.10^{01}$

APÊNDICE C – Levantamento de seções na análise da velocidade do som

Figura 30 - Comparação entre medições da seção 23 com variação da velocidade do som configurada no ecobatímetro.

Figura 31 – Comparação entre medições da seção 51 com variação da velocidade do som configurada no ecobatímetro.

APÊNDICE D – Relação CAV 2018_ajustado

Tabela 10 – Dados da relação Cota x Área x Volume de 2018_ajustado do Reservatório do Lobo.

Cota	Área (km ²)	Volume (hm ³)
690,50	0,00	0,00
691,00	$9,34.10^{-05}$	$8,00.10^{-06}$
691,50	$2,48.10^{-03}$	$5,57.10^{-04}$
692,00	$6,10.10^{-03}$	$2,65.10^{-03}$
692,50	$1,27.10^{-02}$	$7,12.10^{-03}$
693,00	$3,37.10^{-02}$	$1,78.10^{-02}$
693,50	$7,75.10^{-02}$	$4,44.10^{-02}$
694,00	$1,52.10^{-01}$	$1,00.10^{-01}$
694,50	$2,42.10^{-01}$	$1,99.10^{-01}$
695,00	$3,60.10^{-01}$	$3,48.10^{-01}$
695,50	$5,08.10^{-01}$	$5,63.10^{-01}$
696,00	$7,70.10^{-01}$	$8,78.10^{-01}$
696,50	1,20	1,36
697,00	1,58	2,06
697,50	1,92	2,94
698,00	2,22	3,98
698,50	2,51	5,15
699,00	2,86	6,50
699,50	3,18	8,00
700,00	3,54	9,68
700,50	3,87	$1,15.10^{01}$
701,00	4,24	$1,36.10^{01}$
701,50	4,66	$1,58.10^{01}$
702,00	4,98	$1,82.10^{01}$
702,50	5,25	$2,08.10^{01}$
703,06	5,63	$2,38.10^{01}$

APÊNDICE E – Pontos de verificação

Tabela 11 – Valores de profundidade nos pontos de verificação.

Ponto	Corda	Z_2018	Z_2018_ajustado	Variação	Variação
	(m)	(m)	(m)	2018	2018_ajust.
1	7,14	5,74	5,45	20%	24%
2	2,24	2,01	1,85	10%	17%
3	6,74	5,99	5,71	11%	15%
4	11,04	10,55	10,20	4%	8%
5	11,64	11,63	11,44	0%	2%
6	7,74	7,62	7,34	1%	5%
7	4,64	4,71	4,32	2%	7%
8	4,74	4,71	4,49	1%	5%
9	3,24	3,08	2,94	5%	9%
10	5,74	5,47	5,28	5%	8%
11	5,34	4,99	4,72	7%	12%
12	3,44	3,67	3,45	7%	0%
13	1,94	1,77	1,75	9%	10%
14	2,34	2,27	2,04	3%	13%
15	2,74	2,74	2,46	0%	10%
16	2,34	2,29	2,09	2%	11%
17	1,84	1,67	1,64	9%	11%
18	1,34	0,62	0,61	54%	55%
19	2,74	2,62	2,41	4%	12%
20	3,84	3,84	3,58	0%	7%
21	5,74	6,96	6,70	21%	17%
22	5,84	5,75	5,55	2%	5%
23	6,94	6,78	6,43	2%	7%
24	10,34	9,88	9,66	4%	7%
25	10,04	9,88	9,62	2%	4%

ANEXO A – Nível d'água do Reservatório do Lobo

Tabela 12 – Nível d'água diário do Reservatório do Lobo referente a dias de coleta de dados de profundidade.

Atividade	Data	Nível d'água (m)
Campanha 2018	12/09/2018	703,04
Campanha 2018	13/09/2018	703,05
Campanha 2018	02/10/2018	702,88
Campanha 2018	10/10/2018	703,08
Medição dos pontos de verificação	29/10/2018	702,92
Medição de seções para ajuste dos dados	20/12/2018	702,80
Campanha 2010	20/05/2010	703,12
Campanha 2010	24/05/2010	703,08
Campanha 2010	25/05/2010	703,08
Campanha 2010	27/05/2010	703,05
Campanha 2010	31/05/2010	703,02
Campanha 2010	16/07/2010	703,19
Campanha 2010	19/07/2010	703,20
Campanha 2010	20/07/2010	703,20
Campanha 2010	21/07/2010	703,20
Campanha 2010	22/07/2010	703,19
Campanha 2010	23/07/2010	703,19
Campanha 2010	24/07/2010	703,19
Campanha 2010	26/07/2010	703,20
Campanha 2010	27/07/2010	703,20
Campanha 2010	29/07/2010	703,19
Campanha 2010	30/07/2010	703,18

Fonte: Catalano (2018).