

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**YOULIA KAMEI SAITO**

**PROCESSO DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS.  
ESTUDO DE CASO: LAGO DO RIO PIUMHI – MG**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**2020**

**YOULIA KAMEI SAITO**

**PROCESSO DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS.  
ESTUDO DE CASO: LAGO DO RIO PIUMHI – MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Dalto Domingos Rodrigues

Coorientadores: Eduardo Antonio Gomes Marques

Ana Augusta Passos Rezende

Mariangela Garcia Praça Leite

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S158p  
2020 Saito, Youlia Kamei, 1993-  
Processo de assoreamento em reservatórios de barragens :  
estudo de caso: Lago do Rio Piumhi – MG / Youlia Kamei Saito.  
– Viçosa, MG, 2020.  
135 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Inclui apêndices.

Orientador: Dalto Domingos Rodrigues.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.100-109.

1. Sedimentos (Geologia) - Modelos matemáticos. 2. Mapas batimétricos. 3. Sedimentos fluviais. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22 ed. 551.304

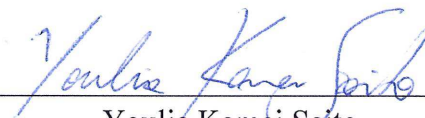
**YOULIA KAMEI SAITO**

**PROCESSO DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS.  
ESTUDO DE CASO: LAGO DO RIO PIUMHI – MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



---

Youlia Kamei Saito

Autora



---

Dalto Domingos Rodrigues

Orientador

Dedico este trabalho aos meus pais,  
responsáveis por tudo que sou e por  
tudo que construí.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo amor, força, paciência e compreensão nessa jornada em Viçosa.

A todos os meus familiares pelo apoio e carinho.

Aos orientadores e coorientadores Dalto Domingos Rodrigues, Eduardo Antonio Gomes Marques, Ana Augusta Passos Rezende e Mariângela Garcia Praça Leite pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta dissertação.

Ao professor Dr. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira pela imensa ajuda compartilhando seus conhecimentos, pela participação na defesa desta dissertação e por todas as sugestões que contribuíram muito para este trabalho.

Aos técnicos Priscila Romana (LESA), Anderson, Marcelo, Dedé e Giovani (LEC) pelo apoio e ensinamento nas análises laboratoriais. E aos funcionários do Laboratório de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Geraldo e Tiago, pela ajuda e boa vontade ao ceder os equipamentos que eram necessários.

Ao engenheiro Gabriel Diniz pela ajuda na programação para iniciar o processamento dos dados.

À Prefeitura de Capitólio e à COPASA por fornecerem informações importantes para a realização deste trabalho e pela ajuda nas adversidades encontradas em campo.

Ao GEPLH, em especial ao professor Ítalo Ferreira e aos estudantes Laura, Felipe e Léo pela ajuda fundamental na viagem de campo.

Ao Masami Kaneko sensei, Nobuhiko Yoshimura sensei, Flávio Furukawa e à Ee Hung Khew pela amizade e todos os ensinamentos compartilhados. E à JICA pela bolsa de estudo no Japão.

À Cooxupé, em especial ao Éder Ribeiro dos Santo e Eduardo Melo por fornecerem os dados climatológicos.

À Universidade Federal de Viçosa, que desde de 2011 é a grande responsável por toda a minha formação acadêmica.

Ao Henrique, pelo companheirismo, motivação e muita paciência.

Às amigas de infância Mariane, Bia e Poliana, pela amizade de longa data e por sempre me apoiarem nessa jornada. Aos amigos de Viçosa, em especial aos da salinha 318 (Lucas, Iann, Jairo, Raiane, Priscila, Franciele, Sidmar, Layane, Matheus, Guilherme, Marconi e Larissa), da EAM (Hilda, Natália, Winicius, Bruno e Fernanda) e do Arroix (Erick, Douglas, Rodrigo, João e Helena) pelos infinitos momentos de alegria e descontração! E às amigas de intercâmbios Marcellas Pônzio e Fortino, Heloísa, Luzia, Mariana, Maria Luíza e Diana, pelo apoio e por sempre incentivarem a ciência.

E a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos, o meu muito obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

“Você não pode mudar o vento, mas pode ajustar as velas do barco para chegar onde quer”. (Confúcio)

## RESUMO

SAITO, Youlia Kamei, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Processo de assoreamento em reservatórios de barragens. Estudo de caso: Lago do Rio Piumhi – MG.** Orientador: Dalto Domingos Rodrigues. Coorientadores: Eduardo Antonio Gomes Marques, Ana Augusta Passos Rezende e Mariangela Garcia Praça Leite.

O assoreamento em corpos d'água é um problema mundial e, em reservatórios, acarreta a diminuição da sua capacidade parcial ou total. É um processo natural, mas que tem sido intensificado pela ação do homem através do desmatamento, movimentos de terra, técnicas agrícolas inadequadas e lançamento de efluentes, em especial esgotos domésticos. Este trabalho visa avaliar o processo de assoreamento do reservatório da barragem de Furnas nas proximidades da área urbana de Capitólio – Minas Gerais, utilizando técnicas de batimetria automatizada monofeixe. Através de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e curvas de Cota x Área X Volume Acumulado (curvas CAV) para os levantamentos de 2013 e 2019, além de análises físicas dos sedimentos depositados, análises físico-químicas da água, análises das mudanças de uso e ocupação da região de contribuição do reservatório e a precipitação na região, buscou-se encontrar uma correlação destes fatores com o assoreamento no local. Realizou-se também uma análise do assoreamento no reservatório utilizando o *software* HEC-RAS no período entre os levantamentos e posteriormente foi realizada uma projeção futura deste processo. Foram sugeridas áreas a serem desassoreadas e medidas preventivas para que obras de dragagem não tenham que ser realizadas frequentemente.

Palavras-chave: Batimetria. Levantamento Batimétrico. Assoreamento. Dragagem. Modelagem de Sedimentos.

## ABSTRACT

SAITO, Youlia Kamei, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Silting process in dam reservoirs. Case study: Lake on the Piumhi River – Minas Gerais.** Advisor: Dalto Domingos Rodrigues. Co-advisers: Eduardo Antonio Gomes Marques, Ana Augusta Passos Rezende and Mariangela Garcia Praça Leite.

Silting in bodies of water is a worldwide problem and, in reservoirs, it results in the reduction of their partial or total capacity. It is a natural process, but it has been intensified by the action of man through deforestation, land movements, inadequate agricultural techniques and the discharge of effluents, especially domestic sewage. This work aims to evaluate the silting process of the Furnas dam reservoir near the urban area of Capitólio - Minas Gerais, using automated single-beam bathymetry techniques. An analysis of the charts showing the Digital Elevation Models and Elevation x Surface Area X Accumulated Volume for the surveys conducted in 2013 and 2019, in addition to physical analyzes of deposited sediments, physical-chemical analyzes of water, analyzes of changes in use and occupation of the region of contribution of the reservoir and the precipitation in the region, the author tried to find a correlation of these factors with the silting in the place. An analysis of silting in the reservoir was also carried out using the HEC-RAS software in the period between the surveys and later a future projection of this process was carried out. Areas to be dredging and preventive measures were suggested so that dredging works do not have to be carried out frequently.

Keywords: Bathymetry. Bathymetric Survey. Silting. Dredging. Sediment Modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Planejamento de seções batimétricas.....	22
Figura 2 - Levantamento Batimétrico Monofeixe.....	24
Figura 3 - Rotações e translações de uma embarcação.....	25
Figura 4 - Barragem para captação de sedimentos.....	33
Figura 5: Localização de Capitólio e a área de estudo.....	39
Figura 6: Lagos de Capitólio e área de estudo.....	40
Figura 7: Limites das áreas de drenagem das bacias do rio Grande e do São Francisco: A) antes da transposição das águas; B) após a transposição das águas e ilustração do percurso das obras de dragagem.....	42
Figura 8: Mapa geológico da área de estudo.....	44
Figura 9: Mapa geomorfológico da área de estudo.....	45
Figura 10: Mapa pedológico da área de estudo.....	46
Figura 11 – Localização das coletas das amostras de sedimento.....	49
Figura 12 – Localização das coletas de amostras de água.....	51
Figura 13: Representação gráfica das linhas de sondagem realizadas em campo.....	56
Figura 14– Fluxograma para delimitação da área de contribuição do reservatório.....	61
Figura 15 - Fluxograma para classificação de uso e ocupação do solo.....	61
Figura 16 – Linhas projetadas para inserção de dados no HEC-RAS.....	66
Figura 17 - Histogramas referentes à variável altitude dos levantamentos batimétricos de A) 2013; e B) 2019.....	73
Figura 18 - Gráficos de Tendência dos levantamentos de A) 2013; e B) 2019.....	75
Figura 19 - MDE A) Dados de 2013. B) Dados de 2019.....	76
Figura 20 - Diagrama Cota x Área x Volume Acumulado - Levantamento de 2013.....	77
Figura 21 - Diagrama Cota x Área x Volume Acumulado - Levantamento de 2019.....	78
Figura 22 - Gráfico Cota x Volume Acumulado para os levantamentos realizados.....	80
Figura 23 - MDE da distribuição do volume assoreado.....	81

Figura 24 - Triângulo textural utilizado para determinar a textura do solo.....	85
Figura 25 – Distribuição Granulométrica - A) Primeira coleta B) Segunda coleta.....	86
Figura 26 – Variação da massa específica das partículas nas amostras coletadas.....	86
Figura 27 – Mapas de uso e ocupação da área de contribuição do reservatório A) em 2013 B) em 2019.....	93
Figura 28 – Comparação entre as batimetrias de 2013 e 2019 e o resultado estimado para 2019.....	97
Figura 29 – Comparação entre a batimetria de 2019 e o resultado estimado para 2025.....	98
Gráfico 1 - Curva granulométrica no ponto 1A da 1ª coleta.....	120
Gráfico 2 - Curva granulométrica no ponto 1B da 1ª coleta.....	120
Gráfico 3 - Curva granulométrica no ponto 1C da 1ª coleta.....	121
Gráfico 4 - Curva granulométrica no ponto 2A da 1ª coleta.....	121
Gráfico 5 - Curva granulométrica no ponto 2B da 1ª coleta.....	122
Gráfico 6 - Curva granulométrica no ponto 2C da 1ª coleta. ....	122
Gráfico 7 - Curva granulométrica no ponto 3A da 1ª coleta.....	123
Gráfico 8 - Curva granulométrica no ponto 3B da 1ª coleta.....	123
Gráfico 9 - Curva granulométrica no ponto 4A da 1ª coleta.....	124
Gráfico 10 - Curva granulométrica no ponto 4B da 1ª coleta.....	124
Gráfico 11 - Curva granulométrica no ponto 4C da 1ª coleta.....	125
Gráfico 12 - Curva granulométrica no ponto 5A da 1ª coleta.....	125
Gráfico 13 - Curva granulométrica no ponto 6A da 1ª coleta.....	126
Gráfico 14 - Curva granulométrica no ponto 6B da 1ª coleta.....	126
Gráfico 15 - Curva granulométrica no ponto 6C da 1ª coleta.....	127
Gráfico 16 - Curva granulométrica no ponto 1A da 2ª coleta.....	127
Gráfico 17 - Curva granulométrica no ponto 1B da 2ª coleta. ....	128
Gráfico 18 - Curva granulométrica no ponto 1C da 2ª coleta.....	128
Gráfico 19 - Curva granulométrica no ponto 2A da 2ª coleta. ....	129
Gráfico 20 - Curva granulométrica no ponto 2B da 2ª coleta. ....	129
Gráfico 21 - Curva granulométrica no ponto 2C da 2ª coleta.....	130

Gráfico 22 - Curva granulométrica no ponto 3 da 2ª coleta.....	130
Gráfico 23 - Curva granulométrica no ponto 4 da 2ª coleta. ....	131
Gráfico 24 - Curva granulométrica no ponto 5 da 2ª coleta.....	131
Gráfico 25 - Curva granulométrica no ponto 6 da 2ª coleta.....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espaçamento entre as seções transversais.....	23
Tabela 2 - Usos benéficos mais compatíveis com material degradado de dada composição.....	35
Tabela 3 - Parâmetros de qualidade da água.....	38
Tabela 4 - Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa.....	63
Tabela 5 - Classificação dos sedimentos no HEC-RAS.....	69
Tabela 6 - Faixa de valores de entrada para funções de transporte de sedimento.....	70
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos das altitudes do leito do lago, coletadas nos levantamentos batimétricos.....	73
Tabela 8 - Dados para a construção dos diagramas Cota x Área x Volume Acumulado.....	78
Tabela 9 - Variação do Volume Acumulado do represamento entre os levantamentos.....	82
Tabela 10 – Resultados médios das análises laboratoriais da primeira coleta (Fevereiro 2018).....	84
Tabela 11 – Resultados médios das análises laboratoriais da segunda coleta (Agosto 2019).....	84
Tabela 12 – Resultados das análises de qualidade de água.....	88
Tabela 13 – Precipitação mensal em Carmo do Rio Claro.....	91
Tabela 14 – Resultado das classificações de uso e ocupação do solo.....	93
Tabela 15 – Resultados das avaliações para as classificações.....	94
Tabela 16 – Resultado da caracterização das amostras de sedimentos da primeira coleta.....	119
Tabela 17 – Resultado da caracterização das amostras de sedimentos da segunda coleta.....	119
Tabela 18 – Matriz confusão da classificação da imagem de 2013.....	133
Tabela 19 – Matriz confusão da classificação da imagem de 2019.....	133
Tabela 20 – Altitudes mínimas das 65 sessões.....	134
Tabela 21 – Dados de vazão do Córrego do Ambrósio.....	135

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
2.1	Objetivos Gerais .....	18
2.2	Objetivos Específicos .....	18
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVAS</b> .....	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
4.1	Levantamentos Batimétricos .....	20
<b>4.1.1</b>	<b>Métodos de Levantamento Batimétrico</b> .....	<b>21</b>
4.1.1.1	Método de levantamento de contornos do reservatório .....	21
4.1.1.2	Método de levantamento de linhas topo-batimétricas .....	21
<b>4.1.2</b>	<b>Levantamento Batimétrico Monofeixe</b> .....	<b>23</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Velocidade de propagação do som na água</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Nível de Redução (NR)</b> .....	<b>26</b>
4.2	Processo de Sedimentação.....	26
<b>4.2.1</b>	<b>Erosão</b> .....	<b>27</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Transporte de sedimentos</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Deposição e adensamento</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Dinâmica de sedimentos em lagos</b> .....	<b>31</b>
4.3	Desassoreamento e Dragagem.....	32
<b>4.3.1</b>	<b>Medidas preventivas de controle de sedimentos</b> .....	<b>33</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Descarte de materiais dragados</b> .....	<b>34</b>
4.4	Avaliação de Qualidade da Água .....	36
<b>4.4.1</b>	<b>Parâmetros físicos, químicos e biológicos</b> .....	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>39</b>
5.1	Localização .....	39
5.2	Histórico .....	41
5.3	Clima .....	43
5.4	Geologia .....	43
<b>5.5</b>	<b>Geomorfologia</b> .....	<b>45</b>
5.6	Pedologia .....	45
<b>6</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>48</b>
6.1	ANÁLISE DE SEDIMENTOS.....	48
<b>6.1.1</b>	<b>Equipamentos utilizados na coleta de sedimentos</b> .....	<b>48</b>

6.1.2	<b>Amostragem e caracterização dos sedimentos</b> .....	48
6.2	<b>ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA</b> .....	50
6.2.1	<b>Equipamentos utilizados na coleta de água</b> .....	50
6.2.2	<b>Amostragem e análises de parâmetros físico-químicos da água</b> ...	51
6.3	<b>LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO</b> .....	53
6.3.1	<b>Equipamentos utilizados no levantamento batimétrico</b> .....	53
6.3.2	<b>Metodologia do Levantamento Batimétrico</b> .....	54
6.3.2.1	Planejamento .....	54
6.3.2.2	Execução .....	54
6.3.2.3	Processamento dos dados batimétricos de 2019.....	56
6.4	<b>ESTIMATIVA DE ASSOREAMENTO</b> .....	58
6.4.1	<b>Análise e Processamento de Dados Batimétricos de 2013</b> .....	58
6.4.2	<b>Cálculo do Assoreamento</b> .....	59
6.5	Análise de uso e ocupação do solo na área de contribuição do reservatório 59	
6.6	Análise do assoreamento utilizando o HEC-RAS.....	64
6.6.1	<b>Software HEC-RAS</b> .....	64
6.6.2	<b>Modelagem no HEC-RAS</b> .....	64
6.6.2.1	Dados de Geometria .....	65
6.6.2.2	Dados de Escoamento Quasi-Não Permanente .....	66
6.6.2.3	Dados de Sedimento.....	68
6.6.2.4	Projeção do Assoreamento .....	72
7	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	73
7.1	Levantamento Batimétrico.....	73
7.1.1	<b>Quantificação do Assoreamento</b> .....	77
7.2	Caracterização dos Sedimentos.....	83
7.3	Análise da Qualidade da Água.....	87
7.4	Distribuição de Chuvas .....	91
7.5	Uso e ocupação do solo na área de contribuição do reservatório.....	93
7.6	Modelagem com o HEC-RAS.....	95
8	<b>CONCLUSÕES</b> .....	98
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	100
	<b>APÊNDICE A - PROGRAMA PARA UNIÃO DOS DADOS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS</b> .....	110
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTOS</b> .....	118

<b>APÊNDICE C – CURVAS GRANULOMÉTRICAS .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE D – MATRIZES CONFUSÃO DAS CLASSIFICAÇÕES DE 2013 E 2019 132</b>	
<b>APÊNDICE E - VALORES DE ALTITUDE MÍNIMA DE CADA SESSÃO TRANSVERSAL .....</b>	<b>133</b>
<b>ANEXO A – DADOS DE VAZÃO DA COPASA .....</b>	<b>135</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, cerca de 60,84% da energia elétrica gerada vem das usinas hidrelétricas (ANEEL, 2017). Entretanto, apesar dessas estruturas serem geradoras de energia elétrica com baixa emissão de poluentes, elas provocam grandes impactos ambientais com sua construção.

Os impactos causados por esta fonte de energia renovável referem-se à: desapropriação e deslocamento de pessoas da área de inundação do lago; redução da velocidade do escoamento, que propicia a deposição de sedimentos na entrada e ao longo do reservatório; redução da velocidade e a entrada de nutrientes, que facilitam o processo de eutrofização, gerando gases e contribuindo para o crescimento de algas que podem produzir toxinas; alteração da fauna e flora devido à variação dos níveis e da velocidade do curso d'água, além de interrupção de corredores biológicos devido à presença do reservatório; acúmulo de carga poluente no fundo do reservatório, que pode se misturar com a massa de água, acarretando a redução da sua qualidade; e riscos de inundação à montante devido ao assoreamento no reservatório e incertezas na operação das comportas do vertedor e das turbinas (TUCCI & MENDES, 2006).

Para evitar a remoção da população de suas residências devido à operação das comportas, procura-se resolver este problema construindo diques em locais que retenham o volume de água que alagaria o local. A implantação desta obra pode provocar alterações ambientais como a alteração dos leitos dos córregos e ribeirões que, ao longo dos anos, vão diminuindo sua capacidade de retenção de água devido ao assoreamento. Este fato pode ser agravado quando, além dos sedimentos, lixo e esgoto são depositados sobre o curso d'água, acumulando ainda mais dejetos em seu leito. Carvalho *et al.* (2000) diz que reservatórios de pequenas dimensões apresentam um processo de sedimentação acelerado e, portanto, devem ser objetos de ações preventivas rapidamente. Como o lago do Rio Piumhi em Capitólio – MG é de pequeno porte, nota-se a necessidade de medidas emergentes para conter este processo de assoreamento.

Uma das medidas tomadas pelos órgãos competentes para evitar a sedimentação nestes reservatórios é a retirada do material depositado para que o lago mantenha a sua capacidade original de projeto ou aumente a capacidade de volume retido. O

desassoreamento é uma medida corretiva dispendiosa que, por isso, não deve ser tomada como uma ação recorrente, devendo-se buscar medidas preventivas que evitem o assoreamento desde o planejamento, nas fases de inventário, viabilidade e projeto, até a fase de operação (CARVALHO, 2008).

Caso não seja possível haver esse controle de sedimento dentro do lago, seja natural ou artificial, e desassorear seja a providência mais adequada a ser tomada, procura-se então o descarte mais apropriado para os sedimentos. Se ações precipitadas forem postas em prática, podem acarretar sérios impactos ambientais referentes à deposição inadequada desses sedimentos. Deste modo, um estudo prévio do local deve ser realizado para analisar pontos como as características físico-químicas do material dragado, volume de dragagem e análises físico-químicas da água e dos sedimentos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo analisar o processo de assoreamento de um dos lagos do dique localizado no reservatório da barragem de Furnas, no município de Capitólio, MG, utilizando técnicas de levantamento batimétrico monofeixe e simulações matemáticas.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Estimar a evolução do assoreamento no reservatório;
- Analisar como as mudanças do uso e ocupação na área de contribuição do reservatório e a precipitação na região impactaram o assoreamento.

### 3 JUSTIFICATIVAS

Segundo dados do IBGE (2017), apenas 41,5% do total de municípios brasileiros possuíam Plano Municipal de Saneamento Básico, regulamentado ou não, dos quais 94,1% possui serviço de esgotamento sanitário. As outras cidades em que o esgoto não foi devidamente coletado, normalmente o despejam em rios, lagos e córregos, provocando um grave desequilíbrio no ecossistema aquático. O esgoto doméstico em cursos d'água consome oxigênio em seu processo de decomposição, ocasionando a morte de peixes. Em altas concentrações, nutrientes como fósforo e nitrogênio liberados nos ambientes aquáticos causam a proliferação excessiva de algas, desequilibrando o ecossistema local. Além disso, pode acentuar o processo de assoreamento devido aos sedimentos presentes nos dejetos.

O esgoto doméstico da cidade de Capitólio não passa por nenhum tratamento e é despejado no lago em estudo que, nos últimos anos, passou por uma revitalização de sua orla. Esta ação contou com um projeto paisagístico com cicloviárias, calçadas e áreas gramadas, de modo a torná-la atrativa para os moradores e milhares de turistas que visitam o “mar de Minas”.

Além disso, as águas pluviais transportam sedimentos de áreas no entorno do lago para dentro dela. Com a retirada de vegetação do solo para uso urbano como a criação de loteamentos, intensifica-se ainda mais o processo de assoreamento.

Entretanto, os elevados investimentos nessas obras de revitalização seriam perdidos caso o lago seja totalmente assoreado. Em função de pequenos lagos apresentarem um processo de assoreamento rápido, uma ação mitigadora emergente deve ser tomada (CARVALHO *et al.*, 2000).

Portanto, um estudo detalhado de caracterização com foco na taxa de assoreamento, a caracterização físico-química e microbiológica da água e física do material sedimentado, fornecerá informações importantes que servirão de base para que se execute obras e medidas de intervenção que possam reduzir a taxa de sedimentação no lago de Capitólio.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Levantamentos Batimétricos

Batimetria é a ciência que tem por finalidade determinar a topografia submersa, sendo necessária em diversas áreas, como construção de obras civis, manutenção de portos e hidrovias, dragagens e gestão de reservatórios (ESTIGONI, 2012). Segundo Eakin (1939) apud Matos (2012), o imediato objetivo da batimetria é determinar o volume e a espacialização do sedimento depositado durante determinado período de tempo.

Os levantamentos batimétricos em reservatórios têm como produto final os seguintes itens: determinação da capacidade do reservatório, determinação da nova área do espelho d'água, obtenção de curvas cota x área e cota x volume, determinação da nova geometria do leito, desenho da curva de dejeção de sedimentos, obtenção da taxa de deposição de sedimentos por comparação com levantamentos anteriores na mesma área, determinação da capacidade de retenção do reservatório e da descarga sólida média afluyente e conhecimento da disposição dos sedimentos ao longo do fundo do reservatório (CARVALHO *et al.*, 2000).

Apesar de ter uma importância significativa na manutenção de obras de barragem, levantamentos batimétricos precisam ser realizados por profissionais capacitados que possuam experiência e conhecimento na área. Eles precisam ter domínio dos equipamentos e *softwares* especializados na coleta e processamento dos dados, conhecer as condições favoráveis para realização do levantamento e conhecer bem o local visando evitar atolamentos da embarcação e possíveis danos aos aparelhos.

Para a realização de um levantamento batimétrico é necessário se atentar para questões como o limite exato a ser levantado, os apoios de campo necessários, os equipamentos disponíveis e a escala a ser utilizada, de acordo com a finalidade do projeto.

#### 4.1.1 Métodos de Levantamento Batimétrico

Os métodos mais comuns utilizados em levantamentos batimétricos são: o método de levantamento de contornos do reservatório e o método de levantamento das linhas topo-batimétricas (CARVALHO *et al.*, 2000). Os mesmos são considerados e descritos detalhadamente em vários trabalhos como Estigoni (2012), Matos (2012), Brito (2013) e Nakao (2015). A seguir será apresentado um pequeno resumo destes métodos.

##### 4.1.1.1 Método de levantamento de contornos do reservatório

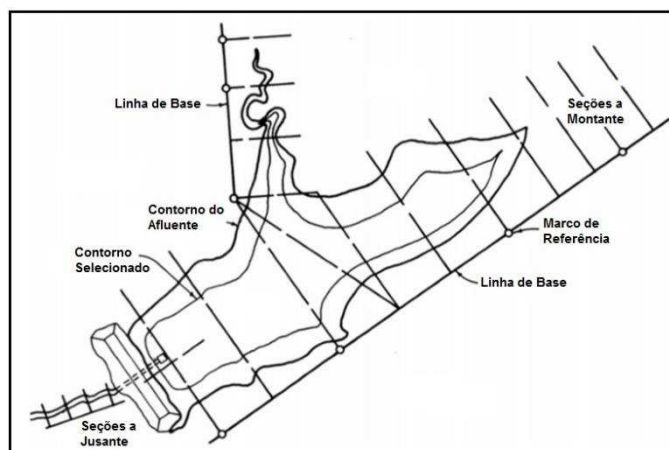
Este método emprega basicamente o uso de mapeamento topográfico por imagens de satélite ou do Google Earth, utilizando-se de fotos de vários níveis de água em épocas diferentes. Este tipo de levantamento restringe-se a pequenos reservatórios ou àqueles possíveis de serem esvaziados a um nível baixo. Estigoni (2012) destaca a utilização de técnicas de Varredura Laser e utilização de imagem de satélites de alta resolução, cuja vantagem é a alta precisão, porém, possui elevado custo (CARVALHO *et al.*, 2000). Além de preciso, Heinemann (1963) apud Matos (2012) ressalta que o método é mais direto e adaptável para a determinação da capacidade do reservatório. Porém, seu emprego deve ser feito quando se possui um mapa base com espaçamento de curvas de nível superior a 3 metros (EAKIN, 1939 apud MATOS, 2012).

##### 4.1.1.2 Método de levantamento de linhas topo-batimétricas

Este é o método mais usado para médios e grandes reservatórios por ser mais simples (BRUK, 1985 apud CARVALHO *et al.*, 2000). Consiste no levantamento de seções transversais bem definidas ao longo do reservatório para confecção de um mapa topo-batimétrico. De acordo com Matos (2012), a taxa de assoreamento é determinada pela diferença entre duas batimetrias. Assim, o mapa gerado será comparado com outros levantamentos realizados anteriormente para que se possa determinar o volume de sedimentos acumulado no reservatório para o período considerado (BRITO, 2013). Matos (2012) também traz em seu trabalho um exemplo

de “layout” de levantamento, apresentado na Figura 1, primeiramente apresentado por Heinemann (1963) e usado em vários outros trabalhos posteriores (HEINEMANN, 1968; VANONI, 1977; CARVALHO, 1994; CARVALHO *et al.*, 2000).

Figura 1 - Planejamento de seções batimétricas.



Fonte: Adaptado de Heinemann (1963) apud Matos (2012).

Carvalho *et al.* (2000) subdividem o levantamento de linhas topo-batimétricas em outros métodos que variam de métodos muito simples, com uso de trenas e régua para posicionamento e escala graduada para obtenção de profundidade, até métodos mais sofisticados com o uso de DGPS para a posição e ecobatímetros digitais para medição da profundidade.

No uso de ecobatímetros monofeixe, os levantamentos no corpo principal, braços, afluentes e canais do reservatório deverão ser realizados empregando-se linhas regulares de sondagem equidistantes, transversalmente e longitudinalmente às curvas isobatimétricas da área, como mostrado na Figura 1 (FERREIRA *et al.*, 2013). Segundo IHO (2005), quando se opta por levantamento monofeixe, as linhas devem ser perpendiculares ao talvegue da área, o que ajuda na determinação de mudanças no relevo do fundo do reservatório, levantando, neste caso, o perfil batimétrico transversal (no qual ocorre variação mais rápida do relevo).

Com relação ao espaçamento entre as seções transversais, Carvalho *et al.* (2000) o define de acordo com a escala do mapa final (Tabela 1). Ferreira *et al.* (2013) afirmam que essa distância pode ser reduzida caso o fundo do reservatório seja muito irregular. Esses autores afirmam ainda que é possível estimar a precisão de um levantamento batimétrico através de linhas de verificação que interceptam

ortogonalmente, de preferência, as linhas regulares de sondagem. O intervalo entre as linhas de verificação deve ser até 15 vezes o espaçamento escolhido para as linhas regulares (NORMAM-25/DHN, 2014).

No trabalho de Ferreira *et al.* (2013) é apresentado o termo “feriado”, que são áreas sem dados de profundidade no mapa final, gerados por má condução da embarcação e/ou obstáculos. Martini (2007) adota o valor de 1 mm na escala de levantamento para os feriados e, caso estes excedam este limite, é proposto o levantamento de dados nas áreas dos feriados.

Tabela 1 - Espaçamento entre as seções transversais.

Escala do mapa	Distância entre seções (m)	Tipo de reservatório	Observação
1:2.000	20	Pequeno	Permite o desenho de seções a cada
1:5.000	50	Médio	
1:10.000	100	Médio a grande	1,0 cm no mapa
1:20.000	200	Grande	
1:25.000	250	Grande	

Fonte: Carvalho *et al.* (2000).

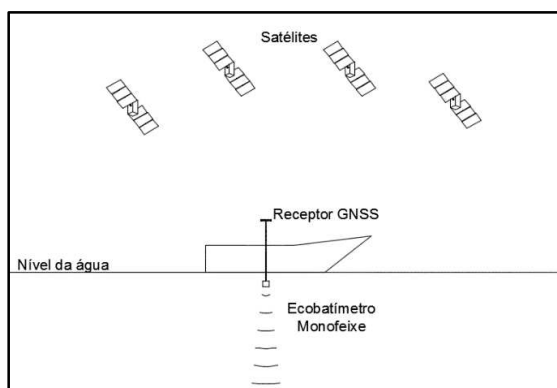
#### 4.1.2 Levantamento Batimétrico Monofeixe

Nos levantamentos batimétricos monofeixe as profundidades são coletadas através de ecobatímetros monofeixe (*SBES - Single Beam Echo Sounders*), enquanto o georreferenciamento destas profundidades é realizado com auxílio de sistemas diferenciais de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*), preferencialmente em tempo real. Em alguns casos também é necessário o uso de sensores de medição inercial.

Apesar da evolução tecnológica e de outras formas de obtenção da batimetria, como o uso do sensoriamento remoto para águas rasas e sistema *LiDAR* batimétricos (FERREIRA; SANTOS; RODRIGUES, 2013), o Levantamento Batimétrico Monofeixe (Figura 2) ainda é uma técnica largamente utilizada, inclusive por agência reguladoras, como por exemplo, a ANA (Agência Nacional de Água) (ANA, 2013). Isto deve-se ao fato de ser uma técnica de levantamento batimétrico automatizada de relativo baixo custo, que pode ser usada para medição de profundidades rasas e também é muito

utilizado em águas profundas, e por ser muito útil em trabalhos em que se deseja determinar a camada de lama fluida presente no fundo do reservatório (FERREIRA; SANTOS; RODRIGUES, 2015).

Figura 2 - Levantamento Batimétrico Monofeixe.



Fonte: A autora

O ecobatímetro monofeixe é constituído por um transdutor que emite pulsos acústicos verticais em alta frequência que se propagam na água, atingem superfícies normais à direção de propagação no fundo do reservatório e retornam à superfície, fornecendo a profundidade de um único ponto por medida quase que contínua, segundo o esquema da Figura 2 (PARKINSON, 2001 apud VIEIRA *et al.*, 2015). Ainda segundo o mesmo autor, geralmente, “a intensidade do sinal refletido depende da refletividade da interface e a maior intensidade registrada é inerente ao fundo marinho verticalmente abaixo do transdutor”. A sondagem medida pelo ecobatímetro é obtida pela equação:

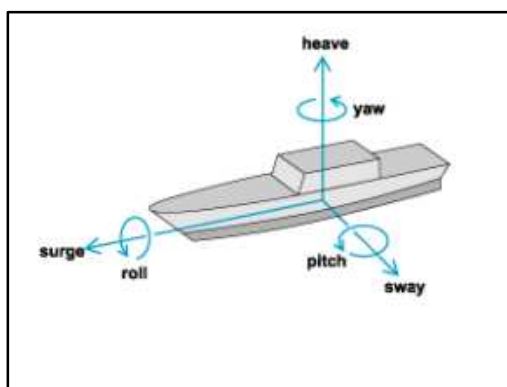
$$S = 0,5. v. t \quad (1)$$

Em que **S** é sondagem (profundidade), **v** é a velocidade de propagação do som na água, e **t** é o tempo gasto pelo sinal para ir ao fundo e retornar ao ecobatímetro (IHO, 2005).

Vale ressaltar que as profundidades são medidas a partir da base do transdutor, que permanece submerso durante todo o levantamento. Logo, existe uma diferença entre a base do transdutor e o nível da água, a qual é conhecida como “*draft*” e o seu valor deve ser somado à todas as profundidades medidas (FERREIRA; SANTOS; RODRIGUES, 2013).

Com relação à embarcação, esta afeta diretamente a qualidade da batimetria devido aos seus movimentos possíveis em relação ao sistema de coordenadas tridimensionais (X, Y e Z), com origem no centro de massa da mesma. Os movimentos são compostos por três rotações (*Roll*, *Pitch* e *Yaw*), e três translações (*Surge*, ao longo do eixo X; *Sway*, ao longo do eixo Y e *Heave* ao longo do eixo Z) (Figura 3). Na batimetria, se está interessado nas três rotações, que descrevem a atitude da embarcação, e a translação no eixo vertical Z (*heave*). Esses movimentos podem ser determinados por sensores inerciais e sensores de proa ou ainda sensores inerciais com informações GNSS integradas (IHO, 2005; SIMÕES, 2007).

Figura 3 - Rotações e translações de uma embarcação.



Fonte: Paulo e Holmes (2011) apud FERREIRA; SANTOS; RODRIGUES (2013).

#### 4.1.3 Velocidade de propagação do som na água

A água é uma grande fonte de incertezas sistemáticas para obtenção de profundidades através de pulsos sônicos devido à complexidade de seu meio. A velocidade do som na água é aproximadamente 4 vezes a sua velocidade no ar, que é 1500 m/s à 25°C. Isto deve-se ao fato de que o aumento de densidade do meio (dependente da temperatura, pressão e salinidade) provoca também o aumento da velocidade de propagação de ondas mecânicas no meio (IHO, 2005).

A determinação da velocidade do som na água depende então do comportamento da mesma ao longo da coluna d'água. Porém, em levantamentos que se utilizam de transdutores monofeixe que transmitem pulsos verticalmente, basta se conhecer um valor médio da velocidade ao longo da coluna d'água, pois o pulso

vertical único emitido sofre menos refração do que se o mesmo fosse emitido obliquamente (IHO, 2005).

#### 4.1.4 Nível de Redução (NR)

A Estação Maregráfica materializa um “*datum*” vertical local para referência de profundidade denominado Nível de Referência (NR). Todas as profundidades são reduzidas a este nível visando uma padronização, bem como a eliminação das variações do nível d’água durante o levantamento.

Em rios e reservatórios, onde não existem grandes variações de nível d’água, o controle do nível pode ser realizado apenas no início e no final do levantamento batimétrico. Esse controle pode ser feito instalando-se réguas limnimétricas niveladas em relação à uma Referência de Nível (RN) nas proximidades da área (FERREIRA; SANTOS; RODRIGUES, 2015). Caso não exista uma RN nas proximidades da área de estudo é necessário realizar um nivelamento geométrico de alta precisão para se definir a altitude de referência do nível da água. Em qualquer tipo de levantamento, caso o nível do reservatório esteja abaixo do nível de redução, que é o plano de referência adotado, é necessário complementar o levantamento de cada seção e margem por topografia terrestre (CARVALHO, 2000).

## 4.2 Processo de Sedimentação

De acordo com Chien e Wan (1999), sedimento pode ser definido como material resultante da desintegração de rochas e que é transportado, suspenso ou depositado pela água ou ar ou acumulado no leito por outros agentes naturais. Podem ter se resultado de atividades vulcânicas ou terremotos, porém os sedimentos fluviais são originários principalmente da desintegração de rochas da crosta terrestre.

Os sedimentos que se depositam nos reservatórios são originários da área de drenagem contribuinte e são transportados através de canais fluviais. Segundo (ICOLD, 1989, apud CARVALHO *et al.*, 2000), os principais fatores da produção de sedimentos na área de drenagem são:

- Precipitação - quantidade, intensidade e frequência;
- Tipo de solo e formação geológica;
- Cobertura do solo (vegetação, rochas aparentes e outros);
- Uso do solo (práticas de cultivo, pastagens, exploração de florestas, atividades de construção e medidas de conservação);
- Relevo;
- Natureza da rede de drenagem – densidade, declividade, forma, tamanho e conformação dos canais;
- Escoamento superficial;
- Características dos sedimentos (granulométricas, mineralógicas);
- Hidráulica dos canais.

Além destes, outros fatores podem ser considerados. Somente com a avaliação técnica de um especialista poderá se obter uma conclusão precisa sobre a origem do material e assim, quais as medidas mais adequadas para se reverter o processo de sedimentação.

#### **4.2.1 Erosão**

A erosão é um processo mecânico que atua na superfície e na profundidade de certos tipos de solo sob determinadas condições físicas e que podem tornar-se críticas pela atividade humana. Envolve a desagregação, o transporte e a deposição de partículas do solo, subsolo e rocha em decomposição por agentes como água, vento ou geleiras (MAGALHÃES, 1995).

Segundo Morgan (2005), este processo apresenta efeitos “on-site” e “off-site”. Os efeitos “on-site” estão ligados à agricultura, como a perda de solo no campo, quebra da estrutura do solo e declínio dos teores de matéria orgânica e nutrientes, que resultam na redução da profundidade de solo cultivável e no declínio da fertilidade do solo. Nos efeitos “off-site” ocorre a sedimentação à jusante e à montante de um curso de água, reduzindo sua capacidade hídrica, aumentando o risco de enchentes, bloqueando os canais de irrigação e diminuindo a “vida útil” do projeto do reservatório. Sedimentos levados para a água podem levar à sua poluição por despejar elementos químicos. Com a quebra do solo em partículas de areia, silte e argila, o carbono

mantido na argila e na matéria orgânica do solo é liberado para a atmosfera como dióxido de carbono, processo que está diretamente ligado à mudança climática visto que o aumento deste gás na atmosfera intensifica o efeito estufa (MORGAN, 2005).

Segundo Magalhães (1995), a erosão pode ser classificada em duas categorias. A primeira é a erosão geológica ou normal que ocorre na superfície terrestre sob condições naturais. A segunda é a erosão acelerada, decorrente do aumento da taxa de erosão sobre a erosão geológica ou normal, resultado do desequilíbrio ambiental devido às atividades humanas.

A água pode ser considerada um dos principais agentes erosivos em locais de clima tropical e subtropical úmido. Assim, o crescente uso do solo atrelado à erosão hídrica, tem causado significativas perdas e degradação dos solos (HERNANI *et al.*, 2002)

A erosão hídrica ocorre devido ao destacamento das partículas do solo pela ação da precipitação e do escoamento, acarretando o transporte das partículas para jusante, onde se depositam, podendo ser novamente destacadas (LIMA, 2010). Pode ser classificada das seguintes formas: erosão pelo impacto da chuva, erosão laminar, erosão em sulcos, voçorocas, deslocamentos e escorregamentos de massas de solo, erosão em pedestal, erosão em pináculo, erosão em túnel, erosão da fertilidade do solo. A erosão pelo impacto da chuva ocorre quando as gotas de chuva tocam o solo causando o desprendimento das partículas, fragmentando-as, diminuindo a capacidade de infiltração e fazendo com que haja acúmulo de água. Na erosão laminar, a água acumulada desloca-se no sentido da inclinação do terreno, retirando pequenas camadas de solo no seu trajeto, na dependência da magnitude da enxurrada. A erosão em sulcos surge devido a pequenas irregularidades na declividade do terreno, que faz com que o acúmulo de água em alguns pontos do terreno atinja volume e velocidade que formarão riscos no solo. A erosão em voçorocas é a forma mais agressiva de erosão e a de maior dificuldade de contenção, ocorre quando existe grande concentração de enxurradas, com contribuição de erosão causada pela percolação de água subterrânea, que aflora na sua cicatriz (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1995).

#### 4.2.2 Transporte de sedimentos

Os responsáveis pelo transporte de sedimentos são a água, o ar, o gelo e a gravidade.

Quando ocorre o fenômeno de chuva, a água pode evaporar-se, infiltrar-se ou ficar na superfície do solo. No momento em que a intensidade de precipitação ultrapassa a taxa de infiltração de água no solo ou excede a sua capacidade de acumulação, ocorre a formação de poças de água na superfície do terreno. Após atingir o limite de retenção, dá-se o escoamento superficial. Este transporta os elementos presentes na superfície do solo como matéria orgânica, compostos químicos, defensivos agrícolas e as partículas de solo em suspensão (PRUSKI, BRANDÃO e SILVA, 2011).

As partículas de solo atingem o curso d'água e, segundo Chien e Wan (1999), podem ser transportadas de diversas maneiras, seja por saltos, por rolamento ou arrastamento e em suspensão. No transporte por suspensão, os sedimentos finos, como silte e argila, movem-se acompanhando as correntes de água. Os sedimentos grosseiros como cascalho e areia são transportados pelo fundo da corrente, rolando ou saltando. No segundo, considera-se que as partículas são esféricas e estão sobre um fundo liso, assim, a força da água age contra o lado de montante da partícula que começa a rolar.

A composição do material que origina um sedimento num certo lugar está diretamente ligada ao meio de transporte. A capacidade de uma corrente de água depende da quantidade e do tamanho dos detritos, da viscosidade do meio, da quantidade de água, do diâmetro da corrente e do declive. Quando a capacidade aumenta, por exemplo, por causa de aumento da quantidade de água pelos afluentes, ou de aumento do declive, a corrente poderá transportar matéria mais grosseira. Porém, quando a capacidade diminui, parte do detrito transportado depositar-se-á. Normalmente a matéria grosseira sedimenta-se, contudo, parte da matéria mais fina pode depositar-se também (KONDOLF, 2014).

### 4.2.3 Deposição e adensamento

Quando um curso de água tem sua velocidade de corrente reduzida, o tamanho da partícula e a carga total que pode ser transportada também sofrem uma redução, deixando-a sobrecarregada e assim, nota-se a deposição de sedimentos (VALENT, 2019). Isto ocorre, por exemplo, quando um rio passa de uma área montanhosa para uma região plana.

Os sedimentos mais densos tendem a se depositar segundo as condições da água. Devem-se observar as diferenças de densidade entre as partículas e a água, a viscosidade do líquido, e as características do sedimento - seu tamanho, forma e floculação. A viscosidade do fluido é alterada pela sua temperatura e concentração de partículas, alterando assim, a velocidade de queda. A quantidade de floculação depende do tamanho, forma e composição das partículas e da composição química e da turbulência da água (CHIEN E WAN, 1999).

À medida que os sedimentos se acumulam no lago, a capacidade de armazenamento de água deste decresce. Quando a vida útil do aproveitamento é afetada pelos depósitos, nota-se a necessidade de realizar mudanças na operação do reservatório ou outras medidas que procurem solucionar o problema (ICOLD, 1989, apud CARVALHO *et al.*, 2000).

#### 4.2.4 Dinâmica de sedimentos em lagos

Quanto maior o assoreamento na região, menor o armazenamento do lago, maior a influência do remanso à montante, maior a velocidade no lago e maior a quantidade de sedimentos que escoarão a jusante, ocasionando a deficiência de retenção de partículas.

Os sedimentos depositados pela influência do lago se estendem para montante e para jusante, não se distribuindo uniformemente. A deposição de montante é denominada depósito do remanso (*backwater deposit*), a de dentro do reservatório é chamada de delta (delta), ocorrendo ainda a de depósito de margem (*overbank*) e a de depósito do leito (*bottom-set deposit*). O delta é composto por sedimentos grossos, enquanto os de depósitos do interior, por sedimentos mais finos (MAHMOOD, 1987).

Os depósitos de sedimentos finos nas margens do curso de água e no lago propiciam o desenvolvimento de plantas aquáticas, ocasionando a *eutrofização*, processo em que um corpo de água aumenta o nível de nutrientes, reduz o de oxigênio dissolvido e aumenta a produtividade biológica. Isto causa a alteração na composição química do rio, ocasionando modificações na fauna e flora de todo o seu percurso (CARVALHO *et al.*, 2000).

Segundo Brandt (2000), a construção de barragens leva a mudanças no regime hidrológico de um rio, em relação ao fluxo de água e ao fluxo de sedimentos, que acarretam em mudanças nos seus processos morfológicos. De acordo com Webb & Walling (1996), o transporte de sedimentos provoca alterações na qualidade de água, como sua mudança térmica, fator que influencia a capacidade de transporte do fluxo de sedimentos. Esta redução de transporte de partículas, atrelada ao contínuo fluxo de água, pode ocasionar uma mudança no perfil longitudinal do represamento, como a erosão fluvial no seu leito, também conhecido como entalhamento.

A erosão marginal nos canais fluviais processa-se de modo contínuo e espontâneo pela ação das correntes dos rios. No entanto, normalmente, o entalhe tende a ser mais intenso do que a erosão lateral, modificando gradualmente o perfil transversal do canal à medida que o fundo vai sendo alargado e aprofundado

(COELHO, 2008). Este processo já foi observado em reservatórios de diversos países como Austrália, China, Etiópia e EUA (VALENTIN *et al.*, 2005).

#### 4.3 Desassoreamento e Dragagem

Desassoreamento é o termo utilizado quando se remove depósitos de sedimentos acumulados de um canal ou corpo hídrico. Já dragagem refere-se à escavação de materiais abaixo do nível de água, seja para ampliação do canal ou corpo hídrico ou como atividade de manutenção, neste caso o termo desassoreamento também pode ser empregado. Os principais objetivos destas atividades são manter a profundidade de navegação ou a capacidade de armazenamento, ou ambos (PEPPER & RICKARD, 2009)

A dragagem é uma operação de elevado custo e pode provocar graves impactos ambientais. Os custos não se referem apenas à operação, mas também à deposição do material dragado, que pode estar contaminado e requer disposição para um aterro licenciado, com custos de transporte associados. Portanto, este processo deve ser evitado sempre que possível, especialmente porque quase nunca é uma operação isolada, requerendo a realização de outros procedimentos.

Os danos ao meio ambiente podem ser reduzidos através da realização da dragagem na estação apropriada, por exemplo, para evitar a poluição dos locais de criação de peixes com sedimentos finos perturbados pelo processo de dragagem. Evitar a temporada de verão, quando o barco e outras atividades baseadas no rio estão no auge também é aconselhável. A escolha correta do equipamento para a dragagem também pode reduzir o impacto ambiental, uma vez que a remoção mecânica do material do leito acarreta distúrbios no local e, conseqüentemente, a poluição dos sedimentos (PEPPER & RICKARD, 2009).

No Brasil, a resolução CONAMA n° 454 (2012) “Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional”. Segundo esta norma, antes da realização da dragagem, o interessado deve apresentar ao órgão ambiental licenciador informações sobre o projeto, tais como o levantamento batimétrico da área a ser dragada; as cotas pretendidas e cotas de eventual projeto anterior; as coordenadas georreferenciadas

que delimitam a área a ser dragada; o volume a ser dragado; as coordenadas georreferenciadas que delimitam as áreas de disposição propostas; o cronograma de execução; e as características dos equipamentos de dragagem.

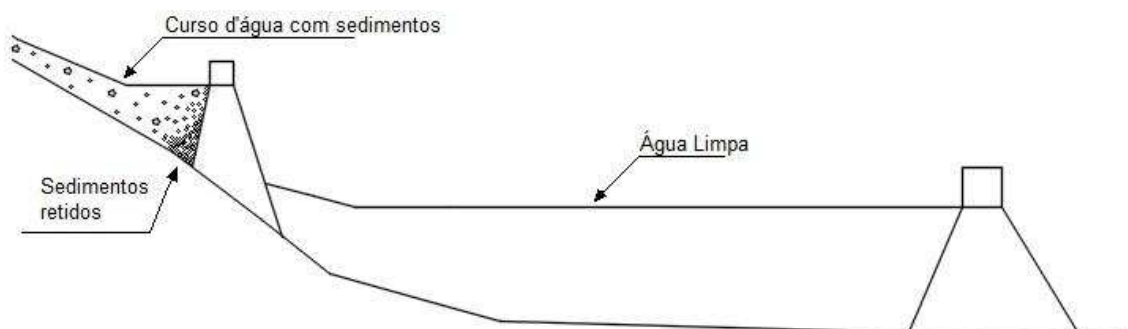
#### 4.3.1 Medidas preventivas de controle de sedimentos

Medidas corretivas como a dragagem apresentam elevados custos de operação, assim, são executadas quando não houver previsão adequada e o assoreamento estiver causando danos ao local (CARVALHO, 2008). Deste modo, busca-se outros métodos que possam diminuir o processo de sedimentação a fim de evitar o uso de medidas corretivas.

O assoreamento não é possível de ser totalmente evitado, contudo, procura-se retardá-lo com algumas medidas preventivas como a proteção das margens com vegetação ciliar, o controle de erosão na bacia e o controle de afluência e deposição de sedimentos (CARVALHO, 1982 apud CARVALHO, 2008).

No controle de afluência de sedimentos ao reservatório, capta-se os sedimentos que estão no curso d'água, a montante do lago, utilizando-se uma pequena barragem, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Barragem para captação de sedimentos



Fonte: A autora

A redução de erosão do solo pode ocorrer utilizando-se a rede de vegetação. Esta barreira pode ser natural ou artificial e atua espalhando o sedimento afluente, reduzindo sua velocidade e ocasionando sua retenção.

A adoção do muro de gabião no córrego pode também ser utilizada para reduzir a velocidade do fluxo de água e conseqüentemente favorecer a deposição dos sedimentos antes que eles sejam depositados no lago (BIFULCO *et al.*, 2016).

#### **4.3.2 Descarte de materiais dragados**

O material degradado pode ser descartado de diversas maneiras, em corpos hídricos abertos como mares, rios, lagos e estuários; áreas de deposição confinadas, podendo ser próximas à costa e subaquáticas; e pode ser beneficiado para ser utilizado em outros locais (USACE, 2015).

O beneficiamento do material dragado pode ser subdividido em sete categorias descritas abaixo (USACE, 2006 apud U.S.EPA & USACE, 2007):

- **Recuperação e Desenvolvimento de Habitats:** o material de dragagem é utilizado para construir e restaurar o habitat da vida selvagem, especialmente as zonas úmidas ou outro habitat à base de água (como ilhas de nidificação e recifes do mar).
- **Beach Nourishment:** o material de dragagem (principalmente material arenoso) é utilizado para reconstruir praias sujeitas à erosão.
- **Parques e Recreação:** o material de dragagem é utilizado para fundações de parques e instalações recreativas, como por exemplo, parques aquáticos que oferecem atrações como natação, piquenique, camping ou passeios de barco.
- **Agricultura, silvicultura, horticultura e aquacultura:** o material de dragagem é utilizado para substituir a camada superficial erodida, elevar a superfície do solo ou melhorar as suas características físicas e químicas.
- **Recuperação de minas a céu aberto e Gerenciamento de Resíduos Sólidos:** o material de dragagem é utilizado para recuperar minas a céu aberto, cobrir aterros de resíduos sólidos ou para proteger aterros sanitários.

- Construção / Desenvolvimento Industrial: o material de dragagem é utilizado para suportar atividades comerciais ou industriais (incluindo redesenvolvimento de áreas industriais), principalmente perto de vias navegáveis; por exemplo, expandindo ou aumentando a altura da base terrestre, ou fornecendo estabilização da margem. Além disso, o material de dragagem pode ser usado em material de construção.
- Atividades de múltiplos propósitos: o material de dragagem é utilizado para atender simultaneamente a uma série de necessidades, tais como conservação de estradas vicinais, desenvolvimento de habitat, recreação e *beach nourishment*, que podem ser apoiados por um único projeto de uso benéfico.

Na Tabela 2 a seguir apresentam-se os usos mais adequados para cada tipo de material.

Tabela 2 - Usos benéficos mais compatíveis com material degradado de dada composição

Tipo de Material	Potencial Uso Benéfico*
Rocha	<p><b>Recuperação e Desenvolvimento de Habitats</b></p> <p><b><i>Beach Nourishment (somente bermas offshore)</i></b></p> <p>Parques e Recreação</p> <p>Agricultura, Silvicultura, Horticultura, e Aquacultura</p> <p>Recuperação de Mina a Céu Aberto / Gerenciamento de Resíduos Sólidos</p> <p><b>Construção / Desenvolvimento Industrial</b></p>
Areia e Cascalho	<p><b>Recuperação e Desenvolvimento de Habitats</b></p> <p><b><i>Beach Nourishment</i></b></p> <p><b>Parques e Recreação</b></p> <p>Agricultura, Silvicultura, Horticultura, e Aquacultura</p> <p>Recuperação de Mina a Céu Aberto / Gerenciamento de Resíduos Sólidos</p> <p><b>Construção / Desenvolvimento Industrial</b></p>
Argila Consolidada	<p><b>Recuperação e Desenvolvimento de Habitats</b></p> <p>Parques e Recreação</p>

**Agricultura, Silvicultura, Horticultura, e Aquacultura**

Construção / Desenvolvimento Industrial

---

Silte / Argila	<b>Recuperação e Desenvolvimento de Habitats</b>
Mole	Parques e Recreação
	<b>Agricultura, Silvicultura, Horticultura, e Aquacultura</b>
	Construção / Desenvolvimento Industrial
Mistura	Recuperação e Desenvolvimento de Habitats
(Rocha /	<i>Beach Nourishment</i> (somente bermas <i>offshore</i> )
Areia /	Parques e Recreação
Cascalho /	Agricultura, Silvicultura, Horticultura, e Aquacultura
Silte / Argila	Recuperação de Mina a Céu Aberto / Gerenciamento de Resíduos
Mole)	Sólidos
	Construção / Desenvolvimento Industrial

---

\* Textos em negrito correspondem aos usos mais adequados para o tipo de material correspondente

Fonte: Adaptado de U.S.EPA & USACE (2007)

#### 4.4 Avaliação de Qualidade da Água

A avaliação da qualidade da água de águas doces, salobras e salinas do Território Nacional deve passar por análises físicas, químicas e biológicas normatizadas pela Resolução do CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Para os corpos d'água localizados no estado de Minas Gerais, a classificação segue também a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008.

As águas doces podem ser classificadas em cinco níveis: classes especial, 1, 2, 3 e 4, que são determinadas conforme suas destinações como abastecimento para consumo humano, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário e secundário, irrigação, pesca amadora, dessedentação de animais, navegação e harmonia paisagística.

Cada classe deve obedecer a certas condições e padrões, devendo ser verificada a presença de efeitos tóxicos crônicos a organismos, materiais flutuantes, óleos e graxas, substâncias que comuniquem gosto ou odor, corantes provenientes de fontes antrópicas e resíduos sólidos objetáveis. Além disso, devem ser realizadas análises laboratoriais de parâmetros que não podem ser determinados somente com a visualização.

#### **4.4.1 Parâmetros físicos, químicos e biológicos**

Os parâmetros utilizados para a caracterização de corpos d'água podem ser diferenciados em físicos, químicos e biológicos. Os parâmetros físicos apresentam muitas vezes informações preliminares que contribuirão para as análises químicas como os elementos que produzem odor e sabor na água. As informações químicas são as mais utilizadas e informam os nutrientes presentes, força iônica, gases dissolvidos, entre outros. Estes parâmetros químicos podem ser divididos em orgânicos e inorgânicos, sendo estes subdivididos em metálicos e não metálicos. Já os indicadores biológicos podem detectar agentes patogênicos que podem causar perigo à saúde da população. Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros a serem determinados, divididos por classes.

Tabela 3 - Parâmetros de qualidade da água

Parâmetros Físicos	Parâmetros Inorgânicos não Metálicos	Parâmetros Orgânicos	Parâmetros Biológicos e Microbiológicos	Parâmetros Metálicos
Cor	Acidez	Ácidos voláteis	Algas	Alumínio
Condutividade	Alcalinidade	Carbono orgânico	Bactérias	Cálcio
Odor Sólidos	Cianeto	Demanda Bioquímica	Clorofila a	Chumbo
Salinidade	Cloreto	Demanda Química de	Coliformes fecais	Cobre
Sabor	Cloro (residual)	Fenóis	Fungos	Cromo
Temperatura	Dióxido de	Halogênio orgânico	Macroinvertebrados	Ferro
Turbidez	Nitrogênio	Metano	Macrófitas	Magnésio
	Oxigênio	Óleos e graxas	Plâncton	Manganês
	Ozônio	Pesticidas orgânicos	Protozoários	Mercúrio
	pH		Salmonela	Níquel
	Fósforo		Vírus	Potássio
	Sílica			Sódio
	Enxofre			Zinco

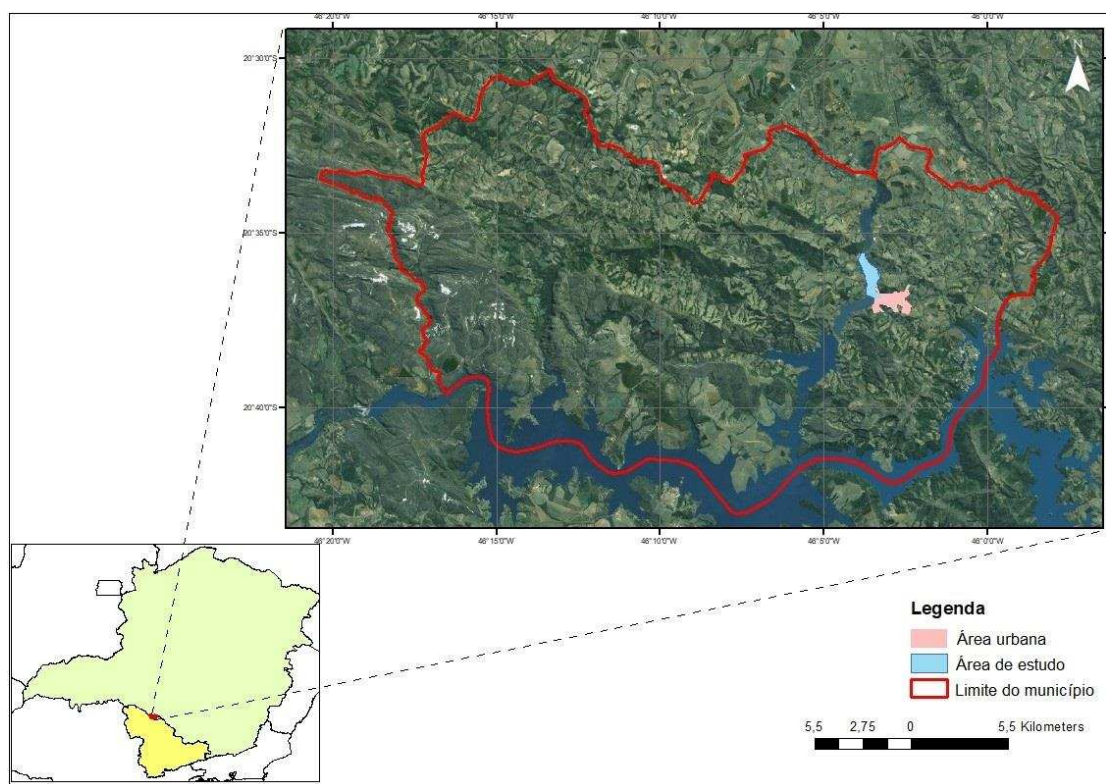
Fonte: Adaptado de CMB (2007)

## 5 ÁREA DE ESTUDO

### 5.1 Localização

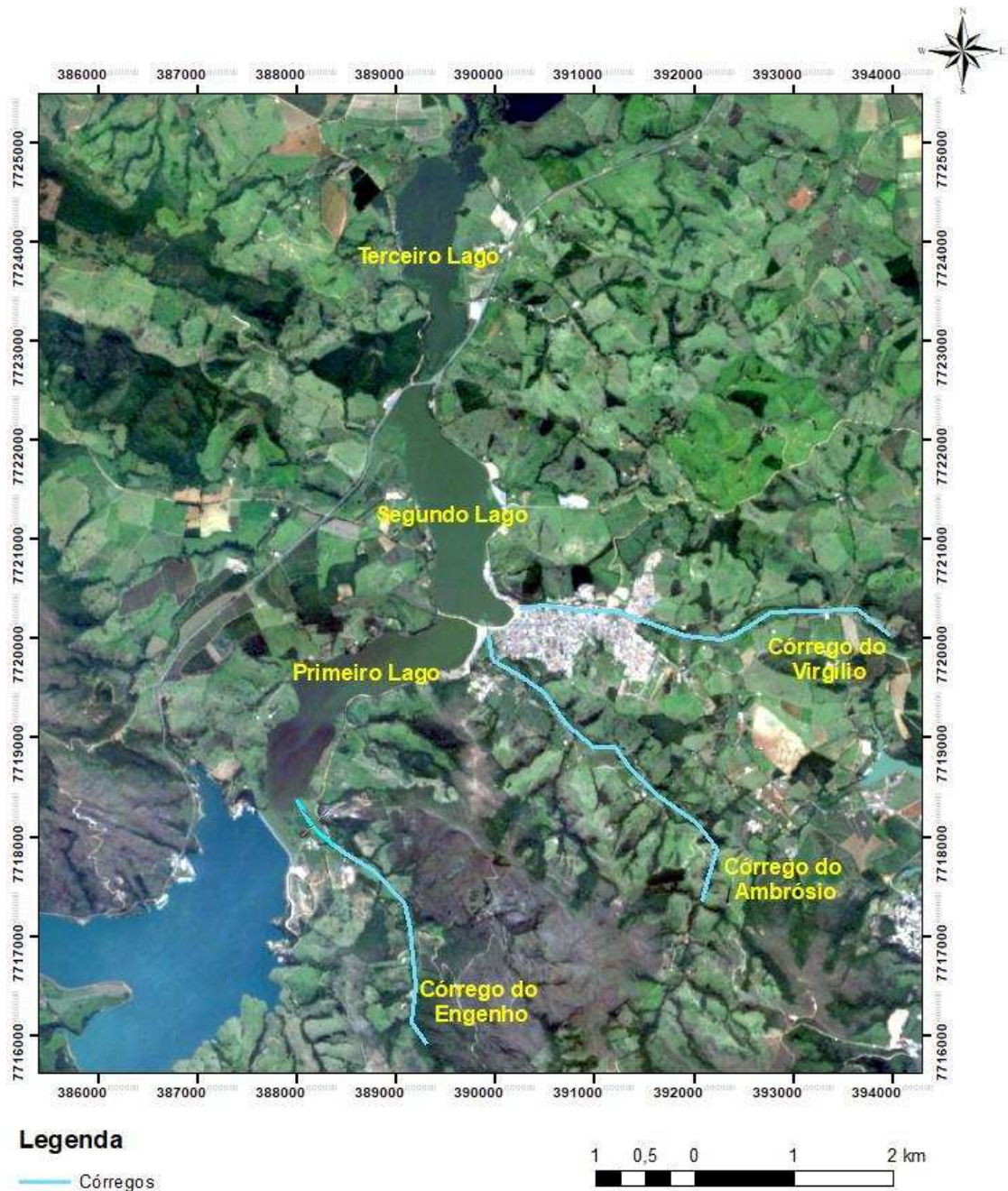
A área de estudo é o segundo lago do Lago do Rio Piumhi localizado no município de Capitólio, situado na mesorregião Sul de Minas Gerais, compreendida entre as coordenadas geográficas  $20^{\circ}36'55,57''$  S  $46^{\circ} 3'13,73''$  W e  $20^{\circ}35'35,82''$  S  $46^{\circ} 4'0,18''$  W. As dimensões do Lago são de aproximadamente 2,5 km de linha de talvegue e 760 metros de largura máxima (Figura 5 e Figura 6).

Figura 5: Localização de Capitólio e a área de estudo.



Fonte: IBGE (2013)

Figura 6: Lagos de Capitólio e área de estudo



Fonte: Planet (2019)

No projeto de revitalização da orla do segundo lago executado pela Prefeitura de Capitólio, foram implantados calçadões, uma estreita faixa de servidão gramada, ciclovia e ruas pavimentadas. Na fração próxima ao terceiro lago, nota-se a presença de muitas pastagens. No entorno da área de estudo, observam-se muitas construções nas áreas mais próximas ao primeiro lago, vias pavimentadas ao longo de todo o lado leste e estradas de terra do lado oeste. O segundo lago é abastecido pelos córregos

do Ambrósio e do Virgílio, este onde há o despejo de esgoto doméstico proveniente da área urbana do município; e também pelo córrego do Engenho, que abastece o primeiro lago e conseqüentemente o segundo. Percebe-se também a presença de bancos de sedimentos dentro do lago, localizados principalmente na região onde o córrego desemboca no lago.

## 5.2 Histórico

Segundo Moreira Filho e Buckup (2005), entre o final da década de 1950 e início dos anos 1960, foi construída a usina hidrelétrica de Furnas sobre o rio Grande, pertencente à bacia do rio Paraná. A construção da barragem da usina resultou numa represa que alagou uma grande extensão de terra hoje conhecida como “Lago de Furnas”. Entretanto, quando as comportas da Usina Hidrelétrica de Furnas fossem fechadas, o volume de água represado ultrapassaria o limite que pudesse ser comportado. Desse modo, o município de Capitólio ficaria inundado e suas águas escoariam até a bacia do Rio São Francisco, ocasionando a união das águas da bacia hidrográfica do rio Paraná e do São Francisco.

A solução encontrada para resolver parte desse problema foi a construção de um dique que reteria as águas de Furnas nas proximidades de Capitólio. Contudo, esse dique represou também o rio Piumhi, um dos afluentes da margem direita do rio Grande naquele período.

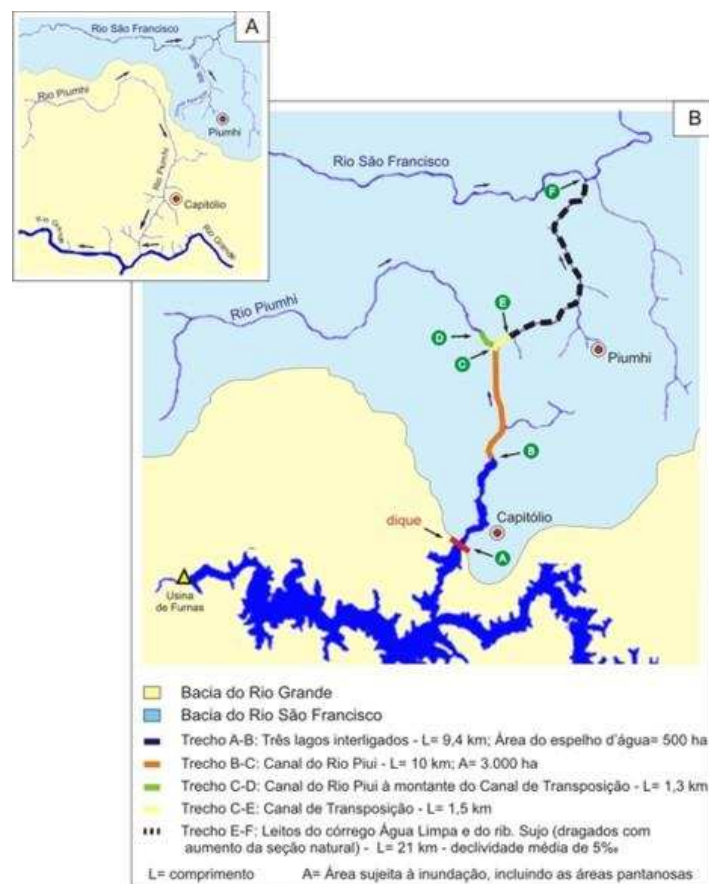
Na região havia um grande pântano por onde corria o leito do rio Piumhi e assim, um sistema de drenagem foi realizado no local. Construiu-se um canal que alterou o curso do rio Piumhi, desviando as suas águas e as do pântano para o córrego Água Limpa, que deságua na margem esquerda do Ribeirão Sujo, um dos afluentes da margem direita do rio São Francisco.

Para a realização do desvio, fez-se a dragagem e o alargamento do leito do córrego Água Limpa de modo que sua capacidade fosse aumentada, permitindo comportar todo o volume de águas vindas do rio Piumhi e da drenagem do pântano. Estas alterações foram também realizadas em parte do leito do Ribeirão Sujo.

Na Figura 7 apresenta-se detalhes da transposição, podendo-se observar a localização do Dique de Capitólio e os três lagos interligados, conseqüentes da construção do dique com 9,4 km de extensão. O Canal do Rio Piumhi possui 10

km e o trecho à montante do canal de transposição possui 1,3 km; o canal de transposição das águas entre as duas bacias tem 1,5 km de extensão; e os leitos do córrego Água Limpa e ribeirão Sujo que foram dragados, 21 km de comprimento. A distância do dique à confluência com o Rio São Francisco corresponde a 43,2 km.

Figura 7: Limites das áreas de drenagem das bacias do rio Grande e do São Francisco: A) antes da transposição das águas; B) após a transposição das águas e ilustração do percurso das obras de dragagem.



Fonte: ATLAS Digital das Águas de Minas.

Assim, a transposição do rio Piumhi, que pertencia à bacia do rio Grande, para a bacia do rio São Francisco, provocou muitas mudanças ambientais, como a construção de pequenas represas no antigo leito do rio Piumhi na região de Capitólio; a construção de um canal por onde atualmente corre o rio Piumhi; a drenagem do pântano e alteração dos leitos dos córregos e ribeirões.

Grande parte da mata ciliar do rio Piumhi foi desmatada e substituída por pastagem. Além disso, esse processo de transposição de águas colocou em contato peixes de distintas bacias hidrográficas, que estavam separados há milhões de anos.

O descaso dos órgãos governamentais responsáveis pela Usina Hidrelétrica de Furnas e a falta de estudos agravaram ainda mais a degradação ambiental observada na região.

### 5.3 Clima

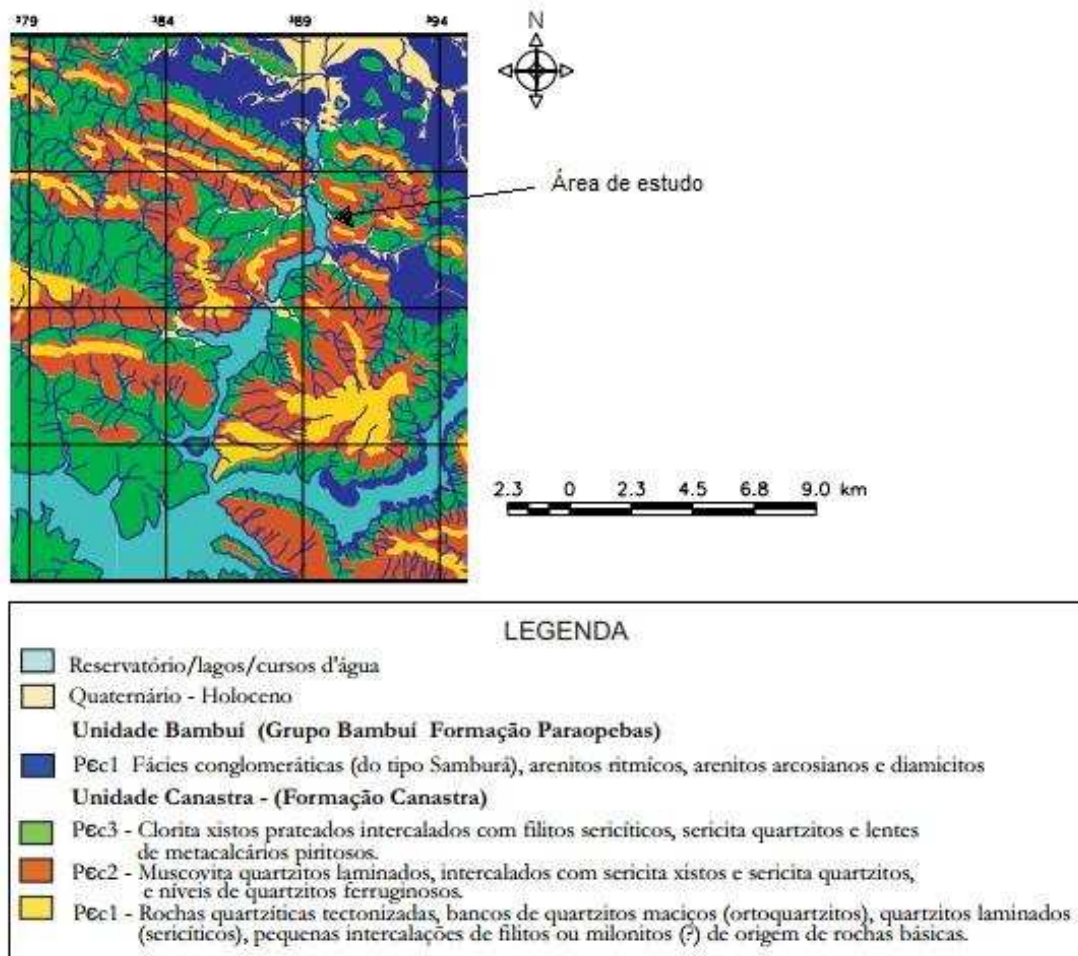
O clima na região do Lago de Furnas, segundo a classificação de Köppen é Cwa, subtropical úmido, com invernos secos e verões quentes. A temperatura média no mês mais frio é abaixo de 18°C e a do mês mais quente é acima de 22°C e a precipitação no mês mais seco é abaixo de 40 mm e no mês mais chuvoso é maior ou igual a dez vezes o precipitado no mês com menor pluviosidade (ALVARES *et al.*, 2013).

Capitólio apresenta uma temperatura média de 20.7°C e pluviosidade média anual de 1533 mm. A diferença do total precipitado entre o mês mais seco e o mês mais chuvoso é de 286 mm, agosto com 17 mm e janeiro com 303 mm respectivamente. As temperaturas médias variam 6.3°C ao longo do ano, sendo que em janeiro, o mês mais quente do ano, a temperatura média é de 23.2°C e junho apresenta a menor temperatura média, com 16.9°C.

### 5.4 Geologia

A Figura 8 apresenta o mapa geológico do entorno do segundo lago, no qual observa-se a presença das unidades cronoestratigráficas Bambuí e Canastra.

Figura 8: Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Barbosa (2004).

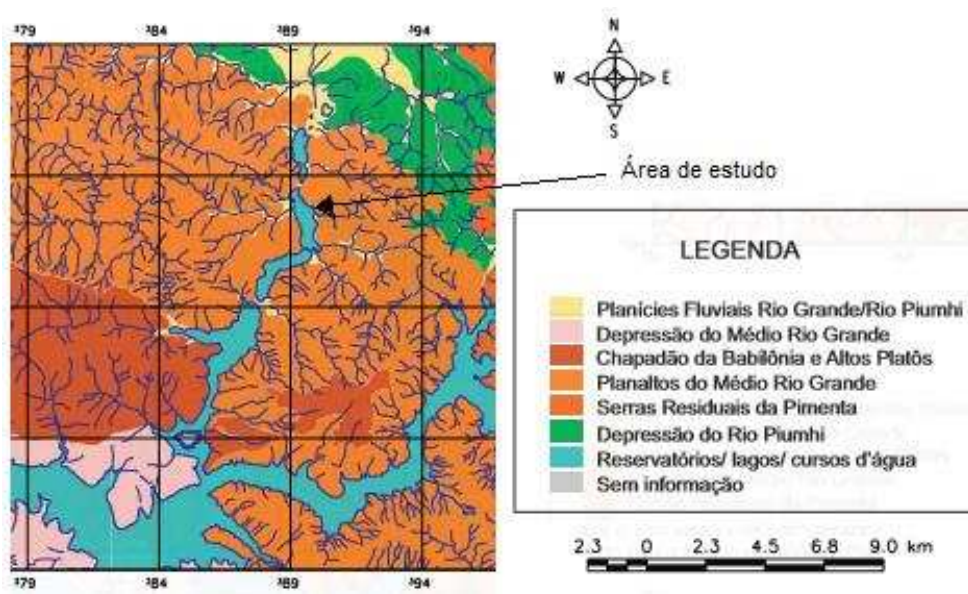
Segundo Schobbenhaus *et al.* (1984) apud Barbosa (2004), o grupo Bambuí apresenta rochas dos tipos calcários, dolomitos, ardósias, metassiltitos, margas, metarcóseos, folhelhos e brechas calcárias do período Proterozóico Superior (0,9 a 1,0 Ga). Já a Formação Canastra apresenta rochas dos tipos quartzitos, filitos, xistos, clorita-xistos, metarcóseos, metagrauvacas, metaconglomerados, calcixistos, mármore, filitos grafitosos e hematíticos, metavulcânicas ácidas, intermediárias e básicas; rochas metamáficas e metaultramáficas, que datam do período Proterozóico Médio (1,3 a 1,5 Ga).

## 5.5 Geomorfologia

Pelo mapa da Figura 9, no entorno do lago nota-se principalmente os Planaltos do Médio Rio Grande e poucas áreas de Planícies Fluviais Rio Grande/Rio Piumhi.

Os Planaltos do Médio Rio Grande apresentam morfologia de morros em formas de cristas alongadas e descontínuas de direção noroeste-sudeste, com uma alta densidade de drenagem; canais estreitos e profundos, vertentes muito inclinadas e, no contexto geral, forte rugosidade topográfica. Já as Planícies Fluviais Rio Grande/Rio Piumhi apresentam formas sem vertentes (BARBOSA, 2004).

Figura 9: Mapa geomorfológico da área de estudo.

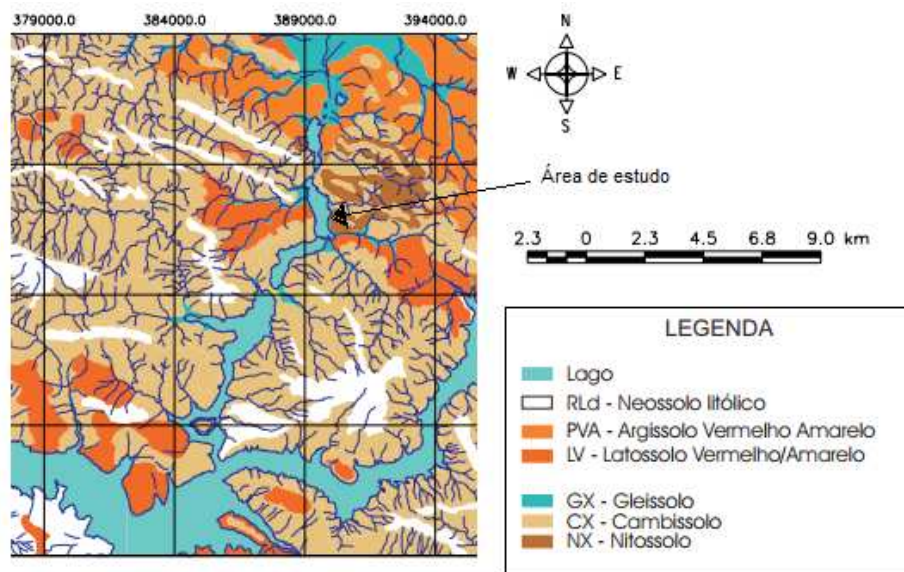


Fonte: Adaptado de Barbosa (2004).

## 5.6 Pedologia

A Figura 10 apresenta a pedologia da região no entorno da área de estudo, em que se observa principalmente a presença de Cambissolo, Latossolo Vermelho/Amarelo e Nitossolo.

Figura 10: Mapa pedológico da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Barbosa (2004).

As principais características dos solos presentes na região do Lago de Capitólio, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (2014): o Neossolo lítólico, Argissolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho / Amarelo, Gleissolo, Cambissolo e Nitossolo.

O Neossolo lítólico apresenta um solo com horizonte A diretamente sobre rocha, ou sobre um horizonte C ou Cr, ou sobre material com no mínimo 90% de sua massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2 mm. Pode apresentar um horizonte B em início de formação que não pode ser classificado como horizonte B diagnóstico (EMBRAPA, 2014).

O Argissolo é um solo constituído por material mineral, apresentando horizonte B textural com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação alta por alumínio. O Argissolo Vermelho Amarelo apresenta solos de cores vermelho-amareladas e amarelo avermelhadas que não se enquadram nas classes do Argissolo Vermelho e Amarelo. Sendo que o Argissolo Vermelho apresenta solos com matiz 2,5YR ou mais vermelho ou com matiz 5YR e valores e cromas iguais ou

menores que 4, no horizonte B, e o Argissolo Amarelo apresenta solos com matiz 7,5YR ou mais amarelos no horizonte B (EMBRAPA, 2014).

Latossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte Blatossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura. O Latossolo vermelho amarelo apresenta solos de cores vermelho-amareladas e amarelo avermelhadas que não se enquadram nas classes do Latossolo Vermelho e Amarelo. Sendo que o Latossolo Vermelho possui solos com matiz 2,5YR ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) e o Latossolo Amarelo possui solos com matiz 7,5YR ou mais amarelo na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA, 2014).

Gleissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte glei, do russo gley “massa do solo pastosa” que indica excesso de água. Este horizonte glei inicia-se nos primeiros 150 cm abaixo de horizonte A ou E ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Não apresenta qualquer tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte glei ou textura exclusivamente areia em todos os horizontes até a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico (EMBRAPA, 2014).

Cambissolos são solos com poucas características diagnósticas constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial (exceto hístico com 40 cm ou mais de espessura) ou horizonte A chernozêmico quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta. O perfil ainda não deve satisfazer os requisitos definidos para Plintossolos, Gleissolos e Vertissolos (EMBRAPA, 2014).

Nitossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B nítico abaixo do horizonte A. Este horizonte B nítico possui argila de atividade baixa ou caráter alítico (atividade alta com elevada saturação por alumínio). Apresentam fraca diferenciação de horizontes, praticamente não apresentam acentuada policromia (variação de cor em profundidade no perfil de solo) no perfil (EMBRAPA, 2014).

## **6 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **6.1 ANÁLISE DE SEDIMENTOS**

A seguir são listados os equipamentos utilizados na coleta dos sedimentos e a metodologia utilizada para a análise da granulometria e massa específica deles. Foram realizadas duas campanhas de coleta de sedimentos em Capitólio, uma em fevereiro de 2018 e outra em agosto de 2019.

#### **6.1.1 Equipamentos utilizados na coleta de sedimentos**

Na coleta de sedimentos do leito do lago do rio Piumhi foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Draga tipo Petersen, para coleta de sedimentos no primeiro levantamento;
- Draga tipo Van Veen, para coleta de sedimentos no segundo levantamento;
- Sacos plásticos identificados, para armazenamentos dos sedimentos;
- GPS Garmin etrex 30, para coleta das coordenadas em campo;

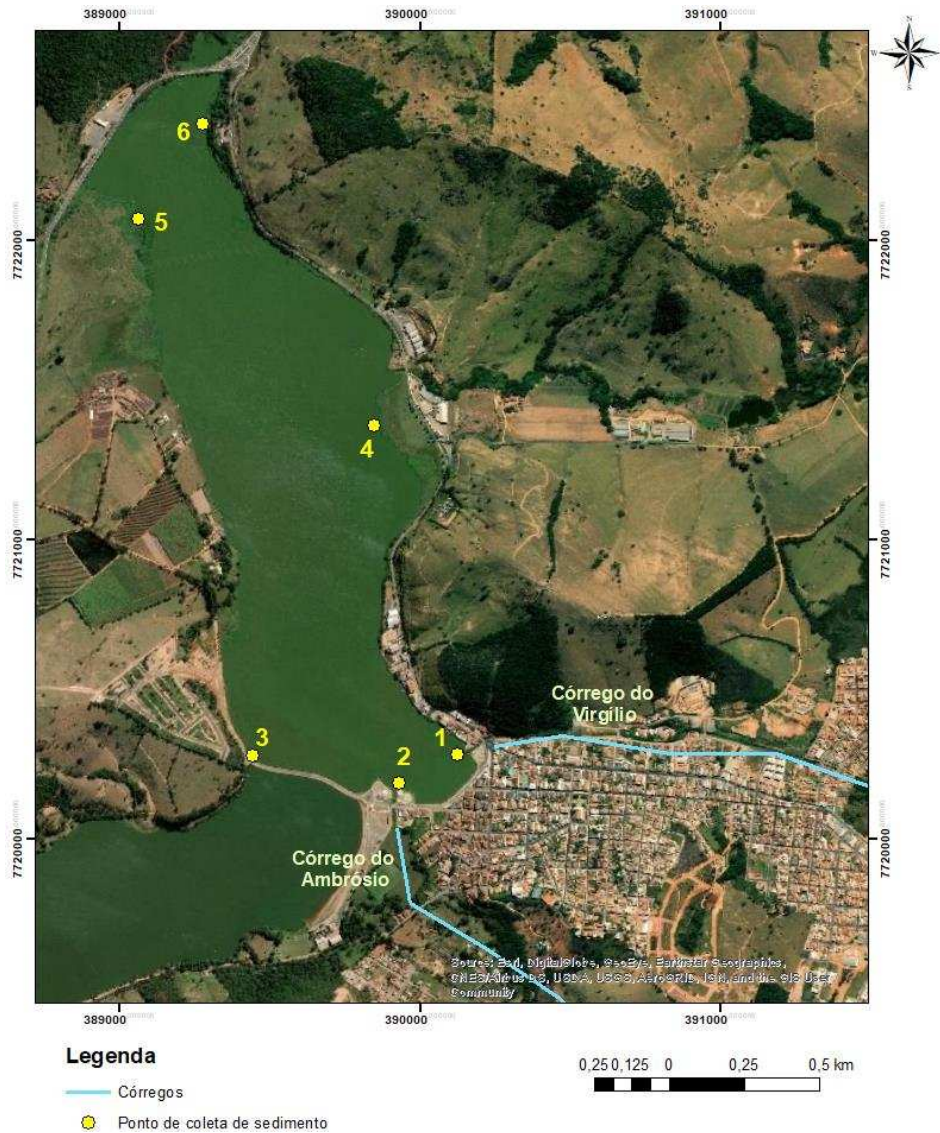
Ambos os amostradores foram eficientes na coleta de sedimentos.

#### **6.1.2 Amostragem e caracterização dos sedimentos**

As amostras de sedimento foram coletadas em seis pontos do reservatório (Figura 11), sendo que, em cada um desses pontos, procurou-se coletar três amostras para obter um resultado mais representativo da granulometria. Estes pontos foram selecionados de forma que representassem os principais pontos de entrada de sedimento do lago. Os pontos 1 e 2 foram determinados devido à presença dos córregos do Virgílio e Ambrósio, respectivamente, que alimentam o lago; o ponto 3 está localizado próximo a um loteamento em construção; o ponto 4 apresentava grande quantidade de plantas aquáticas na margem, o que indica um aumento do

assoreamento; no ponto 5 havia um córrego que também abastecia o reservatório mas foi totalmente assoreado e apresenta grande quantidade de vegetação; e o ponto 6 está localizado na margem urbanizada mais a jusante do lago.

Figura 11 – Localização das coletas das amostras de sedimento.



Fonte: Digital Globe (2020)

As análises das amostras de sedimento coletadas foram realizadas no Laboratório de Engenharia Civil da UFV, durante os meses de março e abril de 2018 e setembro de 2019. As amostras coletadas foram secas à sombra, em temperatura ambiente por cerca de 10 dias, e posteriormente destorroadas utilizando-se almofariz

de porcelana e pistilo de madeira com ponta de borracha. O material desagregado foi peneirado em peneira #10 ( $\Phi = 2\text{mm}$ ).

Foram realizadas análises para determinação da massa específica dos grãos, segundo metodologia definida na norma NBR 6508/1984 da ABNT, utilizando picnômetros calibrados. A distribuição granulométrica dos sedimentos foi obtida segundo metodologia definida na norma NBR 7181/1984 da ABNT, por sedimentação e peneiramento.

## 6.2 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA

A seguir são listados os equipamentos utilizados na coleta das amostras de água e a metodologia utilizada para a análise da qualidade delas. Foram realizadas duas campanhas de coleta de água em Capitólio, uma em fevereiro de 2018 e outra em agosto de 2019.

### 6.2.1 Equipamentos utilizados na coleta de água

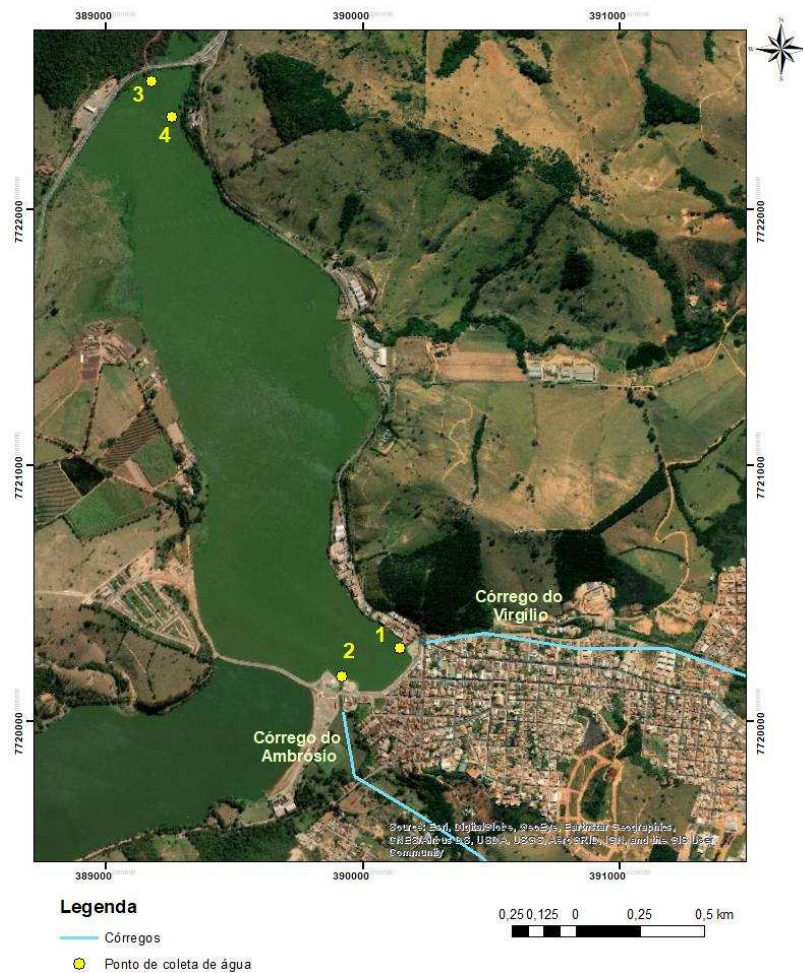
Na coleta de água do lago do rio Piumhi foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Medidor multiparâmetro AK88, para realizar as análises de temperatura, condutividade, pH e Oxigênio Dissolvido *in situ*;
- Vinte garrafas plásticas de 1 litro identificadas e esterilizadas, para armazenamento da água em estudo;
- Frascos de vidros de 100 ml com tampa esterilizados, para coleta da água em que foi feita a análise de E. Coli;
- Caixa térmica, para armazenamento das amostras após a coleta;
- GPS Garmin etrex 30, para coleta das coordenadas em campo;

## 6.2.2 Amostragem e análises de parâmetros físico-químicos da água

As amostras de água superficial foram coletadas em quatro pontos do reservatório (Figura 12) que foram selecionados de forma que representassem o início e final do reservatório e o uso do lago. Os pontos 1 e 2 foram determinados devido à presença dos córregos do Virgílio e Ambrósio, respectivamente, que alimentam o lago; o ponto 4 apresenta um criadouro de peixe para comércio; e o ponto 3 apresenta uma manilha que conecta o lago em estudo com outro lago a jusante.

Figura 12 – Localização das coletas de amostras de água.



Fonte: Digital Globe (2020)

As coletas foram realizadas manualmente utilizando recipientes apropriados com volume de um litro. Após a coleta, as garrafas foram refrigeradas em caixas térmicas com gelo.

As análises físicas e químicas da água foram realizadas conforme descrito pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* da *American Public Health Association* (APHA *et al.*, 2012) no LESA (Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFV). Para estas amostras foram realizadas análises dos seguintes parâmetros:

- Temperatura, pH, Oxigênio Dissolvido (OD) e Condutividade Elétrica (CE), determinados *in situ* por meio de sonda multiparâmetro;
- Turbidez, determinada pelo método da Nefelometria;
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), determinada pelo método de *Winkler*;
- Demanda Química de Oxigênio (DQO), determinada pelo *Standard Methods*;
- Coliformes totais, determinados pelo teste *Colilert*;
- Sólidos totais (ST), determinados pelo *Standard Methods*;
- Sólidos suspensos (SS), determinado pelo *Standard Methods*;
- Nitrogênio Kjeldahl Total, determinado pelo *Standard Methods*;
- Nitrogênio Amoniacal, determinado pelo *Standard Methods*;
- Fósforo, determinado pelo *Standard Methods*.

Estas análises foram realizadas para as amostras da primeira e segunda campanhas, com exceção da análise de coliformes totais, que ocorreu somente na primeira coleta.

### 6.3 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

A seguir são listados os equipamentos utilizados no levantamento batimétrico e a metodologia utilizada no planejamento, execução e processamento para a análise da qualidade delas. Este levantamento ocorreu em agosto de 2019.

#### 6.3.1 Equipamentos utilizados no levantamento batimétrico

Na batimetria do lago do rio Piumhi foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Ecobatímetro de dupla frequência modelo Hydrobox da Syqwest Inc., frequências de 33 e 210 kHz e precisão de 2,5 centímetros para profundidades entre 0 e 40 metros;
- Receptor GNSS Triumph 1 - JAVAD;
- Receptor GNSS T10;
- Chapa metálica para calibração da velocidade do som na água no *software* de aquisição de dados (método bar check);
- Sensor de velocidade de som Digibar-S Odom Hydrographic CY2001 da Teledyne, para calibração da velocidade do som na água no *software* de aquisição de dados;
- *Software* Hydrobox Acquisition da Syqwest Inc, usado para a configuração do ecobatímetro, monitoramento das profundidades e realização da comunicação com o *software* Hypack;
- *Software* Hypack, usado na criação das linhas de sondagem, coleta dos dados batimétricos, auxílio na navegação em tempo real, edição e processamento dos dados batimétricos;
- Trena;

### 6.3.2 Metodologia do Levantamento Batimétrico

O levantamento batimétrico consistiu em três etapas: planejamento, execução e processamento dos dados. Estes processos são descritos a seguir.

#### 6.3.2.1 Planejamento

Antes da realização do levantamento batimétrico, deve-se primeiramente foi realizado o seu planejamento. Nesse sentido, obteve-se o dado do contorno do represamento a partir de uma imagem de satélite proveniente do Google Earth, e a partir disso, determinou-se que a escala utilizada seria 1:2000, visando um erro máximo de 10 cm, adotando-se um erro máximo de 0,2 mm na planta final (erro de graficismo). Assim, projetaram-se as linhas de sondagem com distância de 20 metros entre elas e perpendiculares ao talvegue do reservatório e as linhas de verificação distando 50 metros entre si no *software* Hypack. Optou-se por uma distância menor do que o recomendado entre as linhas de verificação pois pretendia-se obter uma maior quantidade de dados para comparação. O timoneiro deveria seguir estes alinhamentos de maneira mais precisa possível, a fim de se evitar “feriados”.

#### 6.3.2.2 Execução

A primeira etapa consistiu no transporte da embarcação para a área de estudo e depois a montagem da base móvel e da base fixa. Foram configurados os equipamentos para se obter as correções RTK (Real Time Kinematic) e de frequência do ecobatímetro. Além desses ajustes, foi medida a altura de imersão do transdutor, conhecido como *draft*, com toda equipe de levantamento a bordo e em seus devidos lugares. Isso é de extrema importância uma vez que o valor do *draft* está diretamente relacionado ao peso da embarcação e é somado aos valores de sondagem. Qualquer incerteza ou erro grosseiro nesta estimativa se propagará de forma direta para as sondagens.

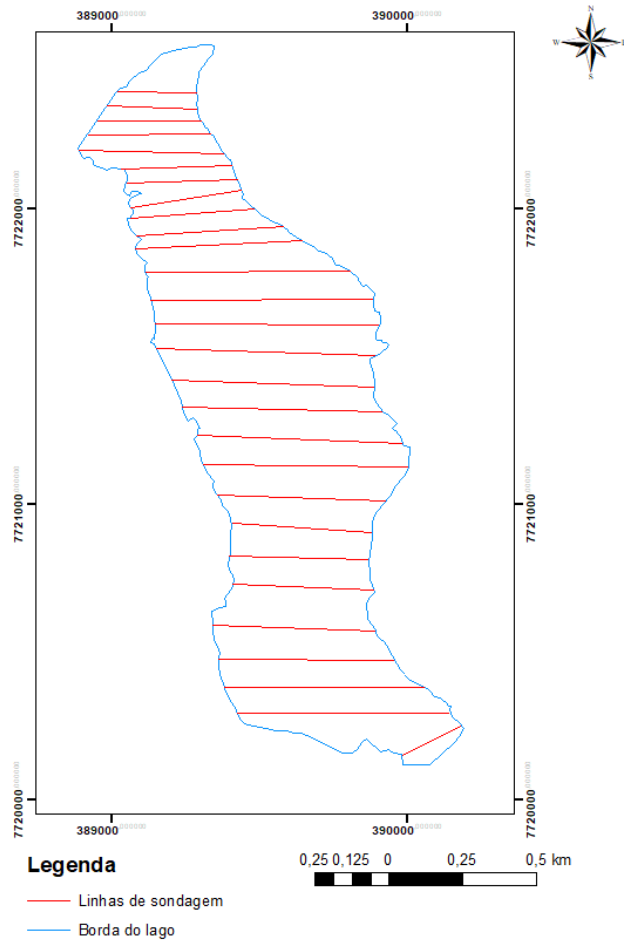
Antes de se iniciar o levantamento foi muito importante a verificação do nível da água a fim de se identificar variações significativas que influenciarão diretamente no cálculo do volume do reservatório. A determinação do nível d'água foi realizado com o GNSS Triumph 1 – JAVAD pelo método RTK, assim como sugerido por Nugraha *et al.* (2019).

A velocidade média do som foi calibrada usando o sensor de velocidade de som da Teledyne e conferiu-se este valor através do método bar check, descrito com detalhes em IHO (2005) e Ferreira *et al.* (2015). Além disso, manteve-se uma velocidade reduzida da embarcação para se evitar qualquer dano ao equipamento.

Contudo, durante o levantamento não foi possível configurar os dados do GPS e do ecobatímetro juntamente e por isso foi necessário unir estes dados posteriormente na etapa de processamento de dados. Houve algumas mudanças durante o trajeto planejado devido a problemas mecânicos com equipamentos utilizados e com a embarcação.

Findada a campanha batimétrica, obtendo-se os dados de profundidade das linhas de sondagem realizadas conforme a Figura 13, conferiu-se novamente o nível da água. Não foi observada diferença considerável entre as leituras, pelo que adotou-se o nível da água obtido no começo do levantamento.

Figura 13 - Representação gráfica das linhas de sondagem realizadas em campo



Fonte: A autora

### 6.3.2.3 Processamento dos dados batimétricos de 2019

A primeira etapa do processamento dos dados batimétricos coletados consistiu na união dos dados de profundidade com as coordenadas planimétricas, uma vez que ocorreram problemas nesta etapa com os equipamentos em campo. Para resolver isso, foi criado um programa em linguagem Python, apresentado no Apêndice A.

Como o produto deste tipo de levantamento é uma nuvem de pontos que não representa o relevo submerso de forma espacialmente contínua, deve-se realizar uma

interpolação dos dados levantados. Para a geração deste MDE, utilizou-se o interpolador *Topo to Raster* do *software ArcGIS* descrito em Nogueira e Amaral (2009) e Carmo (2014) que, segundo estes autores, apresentou resultados com mais informações na elaboração de superfícies batimétricas e resultados satisfatórios na análise estatística, mostrando ser melhor para espaçamento entre linhas regulares de sondagem maiores.

O método *Topo to Raster* cria MDEs hidrológicamente corretos a partir de dados vetoriais. O método se utiliza da eficiência computacional da interpolação local, como ponderação do inverso da distância, sem perder a continuidade superficial dos métodos globais de interpolação, como krigagem e spline (NOGUEIRA e AMARAL, 2009). Após obtenção do MDE gerado ao final do processo do *Topo to Raster*, considerou-se um espaçamento de 0,5 m para as curvas de nível geradas.

Para o cálculo de volumes utilizou-se o *software ArcGIS* devido a uma maior facilidade de cálculo considerando diferentes planos, os quais correspondem a diferentes níveis de linha de água. Gerou-se um *Triangular Irregular Network* (TIN) e a partir deste, calcularam-se os volumes utilizando a ferramenta *Surface Volume*. Neste procedimento deve-se considerar um plano de cota constante que passe pelo TIN. O algoritmo do *software* então calcula o volume acumulado entre o plano adotado e o TIN calculado fornecendo os valores de Volume e Área Superficial. No caso do presente estudo, consideraram-se diferentes planos de cotas constantes desde a superfície do represamento até uma cota próxima ao fundo, com espaçamentos de 0,5 metro. Desta forma, obtiveram-se valores de volume e área, em m<sup>3</sup> e m<sup>2</sup> respectivamente, para cada cota. Vale ressaltar que se considerou o mesmo nível de água para todos os levantamentos, reduzindo-se os níveis de linha d'água maiores ao menor observado.

Com todos estes valores foi possível a geração de um diagrama Cota x Área x Volume para cada levantamento, gráfico Cota x Volume Acumulado, gráfico Cota x Volume de Sedimentos Acumulado, dentre outros objetos necessários para a análise dos resultados.

## 6.4 ESTIMATIVA DE ASSOREAMENTO

A estimativa de assoreamento ocorreu a partir da comparação entre os dados de 2013 e os obtidos em campo em 2019. Para isso, a priori processaram-se os dados de 2013 e posteriormente analisaram-se estes dados em relação aos dados de 2019, como é explicado a seguir.

### 6.4.1 Análise e Processamento de Dados Batimétricos de 2013

Os dados referentes ao ano de 2013 foram coletados e processados por Carmo (2014) em setembro de 2013 para a elaboração da dissertação apresentada para a conclusão do programa de Pós-Graduação *Strictu Sensu* em Engenharia Civil, área de concentração em Informações Espaciais, da Universidade Federal de Viçosa.

No levantamento batimétrico foi utilizado um ecobatímetro monofeixe para as coletas das profundidades e um receptor GPS RTK com receptor de dupla frequência (L1/L2) para a coleta das coordenadas planimétricas. Foram planejadas linhas de sondagem com espaçamento de 20 metros entre si e linhas de verificação com espaçamento de 100 metros. Para a calibração do ecobatímetro utilizou-se uma chapa metálica (Bar check) fixada a um cabo de aço de 5 m, graduado de 0,5 em 0,5 m, e com a velocidade de propagação do som na água obtida, inseriu-se o valor no *software* Hydrobox Acquisition.

O processamento dos dados brutos consistiu no uso do *software* Hypack, gerando um arquivo denominado GRID total contendo as coordenadas planimétricas de cada ponto das linhas e as suas respectivas profundidades medidas com a frequência 210 kHz. Nesta alta frequência, o sinal acústico não penetra nos estratos sedimentares e retorna ao transdutor com informações detalhadas e precisas da superfície estudada.

Utilizou-se o *software* ArcGIS para a interpolação, cálculos do volume e espelho d'água e geração do MDE do lago seguindo o mesmo procedimento adotado para o processamento dos dados de 2019.

#### 6.4.2 Cálculo do Assoreamento

A estimativa do assoreamento se deu pela análise dos dados de volumes calculados pelo *software* ArcGIS. Obtiveram-se os valores de volume de água por valor de altitude para cada ano considerado. Fixando um valor de altitude e analisando-se as variações de volume de água de um levantamento para o outro, pode-se estimar o volume de sedimentos depositados para a respectiva altitude. Esta afirmação é possível pois somente o topo da camada de lama fluida foi considerada para a realização dos levantamentos. Ou seja, supondo que, para determinado valor de altitude, obtém-se um valor de volume de água menor do que o valor para o levantamento realizado anteriormente para o mesmo valor de altitude, pode-se inferir então, que houve uma “perda” de volume útil no reservatório para este valor de altitude correspondente. Consequentemente, houve uma deposição de sedimentos quantitativamente igual ao valor da variação de volume acumulado.

Com os valores de variação de volumes de água de um levantamento para o outro por valor de altitude, gerou-se um gráfico de volume de sedimentos acumulados para cada período entre os dois levantamentos considerados. Obtiveram-se então, importantes informações como estimativa do valor de sedimentos total acumulado entre os levantamentos e estimativa da taxa de assoreamento anual para o represamento em questão.

De posse dessas informações, foi possível realizar uma correlação com outras variáveis como precipitação total acumulada e alteração no uso do solo na área de drenagem do lago de Capitólio.

#### 6.5 Análise de uso e ocupação do solo na área de contribuição do reservatório

Modificações na ocupação do solo, alterando a permeabilidade deste, impedem que grandes áreas de terra cumpram com seu papel de absorvedor de águas, aumentando, com isso, o potencial do transporte de materiais, devido ao escoamento superficial, que contribui para o assoreamento de corpos d’água. Assim, mapeou-se o uso e cobertura da terra na área de contribuição do reservatório em estudo nas épocas dos levantamentos batimétricos.

A primeira etapa foi a delimitação da área de contribuição do reservatório seguindo a metodologia esquematizada na Figura 14.

A imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) apresenta o modelo digital do terreno da região com resolução espacial de 30 m e foi adquirida através do site *Earth Explorer da United States Geological Survey (USGS)*.

Utilizou-se o *software* ArcGIS 10.3 para visualizar e processar as imagens. Como a região pesquisada está localizada em duas imagens orbitais, necessitou-se fazer um mosaico delas. Para realizar este passo, criou-se inicialmente um arquivo do tipo raster no qual o mosaico da imagem foi exportado. Com a imagem raster unificada, preencheram-se as depressões espúrias com a ferramenta *Fill*.

Determinou-se a direção do fluxo de cada célula com base nos oito pixels vizinhos utilizando-se a ferramenta *Flow Direction*.

A partir do arquivo criado anteriormente, determinou-se a acumulação do fluxo com a ferramenta *Flow Accumulation*.

Para atribuir uma ordem numérica aos córregos em uma rede de fluxo aplicou-se a ferramenta *Stream Order*.

Utilizou-se a ferramenta condicional *Con* para criar a rede de fluxo de córregos no formato *raster*. Para transformar este arquivo raster em vetorial, utilizou-se a ferramenta *Stream to Feature*.

Por fim, como desejava-se obter somente a área de contribuição do reservatório em estudo, criou-se um ponto de estuário no final deste lago e aplicou-se a ferramenta *Watershed* para delimitar a região.



Para a análise em 2013, utilizou-se uma imagem RapidEye com resolução espacial de 5 m, ortoretificada, 16-bit e multispectral (*Red, Green, Blue, Red Edge e Near Infrared*). Para a análise em 2019, utilizou-se uma imagem Planet com resolução espacial de 3 m, ortoretificada, 16-bit e multispectral (*Red, Green, Blue e Near Infrared*). Ambas imagens foram adquiridas no site Planet Explorer e foram processadas no *software* ArcGIS 10.3.

Como a região estudada está localizada em duas imagens orbitais, necessitou-se fazer os mosaicos das mesmas. Para realizar este passo, criou-se inicialmente um arquivo do tipo raster onde o mosaico da imagem foi exportado. Com a imagem unificada, recortou-se a imagem no formato da área de contribuição utilizando a ferramenta *Extract by Mask*.

Utilizando a ferramenta *Interactive Supervised Classification*, realizou-se a classificação multiespectral "pixel a pixel" Máxima Verossimilhança (MAXVER) usando os parâmetros padrões.

Para avaliar a precisão temática destas classificações foram utilizados o índice Kappa e a exatidão global.

O índice Kappa ( $k$ ) é uma técnica multivariada discreta, que utiliza todos os elementos da matriz de confusão no seu cálculo e cujo grau de concordância é dados segundo a Tabela 4. Pode ser calculado através da seguinte Equação 4 (COHEN, 1960):

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^c (x_{i+} * x_{+i})} \quad (4)$$

Em que:

$x_{ii}$  é o valor na linha  $i$  e coluna  $i$ ;

$x_{i+}$  é a soma da linha  $i$ ;

$x_{+i}$  é a soma da coluna  $i$  da matriz de confusão;

$n$  é o número total de amostras;

$c$  o número total de classes.

Tabela 4 - Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa.

Índice Kappa	Grau de concordância
0,00	Péssimo
0,01 – 0,20	Ruim
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Bom
0,61 – 0,80	Muito Bom
0,81 – 1,00	Excelente

Fonte: LANDIS e KOCH (1977), citado por SILVA *et al.*, (2011).

A exatidão global (G), ao contrário do índice Kappa (K), utiliza somente os elementos diagonais da matriz confusão (concordância real) e foi calculado através da seguinte equação (STORY & CONGALTON, 1986):

$$G = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii}}{n} \quad (5)$$

Em que:

$x_{ii}$  é o valor na linha i e coluna i;

n é o número total de amostras;

c o número total de classes.

Para obter estes valores, a priori, foram selecionadas 60 amostras de cada classe, uma vez que Laddusaw (2019) indica que o número de amostras em cada classe deve ser igual a dez vezes o número de classes em que foi dividido o mapa temático, neste caso, seis classes. Todas as 360 amostras foram identificadas e convertidas em formato raster. Por fim, as matrizes de confusão foram obtidas utilizando-se a ferramenta *Combine* do *ArcGIS* 10.3, sendo os parâmetros de entrada a classificação do uso e ocupação do solo e o arquivo *raster* das amostras. Este processo foi realizado para as imagens de 2013 e 2019.

## 6.6 Análise do assoreamento utilizando o HEC-RAS

### 6.6.1 Software HEC-RAS

O software HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, executa cálculos do transporte de sedimentos do leito móvel de um corpo d'água a partir de dados de séries de fluxo (BRUNNER, 2016). Podem ser realizadas análises envolvendo escoamento permanente e não permanente, análise da qualidade da água e transporte de sedimentos, de modo a obter informações precisas em cada tipo de simulação. Neste trabalho, utilizou-se o HEC-RAS versão 5.0.3.

Este programa trabalha com a equação de *Saint Venant* simplificada, proporcionando um alto grau de precisão e confiabilidade. Isso permite considerar os resultados como significativos ao se tomar decisões relacionadas aos impactos causados por uma determinada inundação (ANA, 2018).

Nos trabalhos de Silva et al. (2019), Campana (2018), Nicklow e Mays (2000), Roman (2004), Chaves et al. (2008), Cortez (2013), Vale (2014) e Decina (2012) foi utilizado o HEC-RAS na análise do transporte de sedimentos em corpos d'água.

### 6.6.2 Modelagem no HEC-RAS

Para a realização da modelagem do assoreamento futuro no lago, no software HEC-RAS, primeiramente fez-se a análise do assoreamento de 2013 para 2019 e depois projetou-se o resultado para 2025. Para isso, inseriram-se os dados de geometria, de escoamento - que neste caso é quase não permanente, e de granulometria do sedimento assoreado que serão descritos a seguir.

### 6.6.2.1 Dados de Geometria

Nesta etapa, devem ser inseridos os dados referentes à batimetria de cada uma das seções transversais, o coeficiente de *Manning* e informações sobre os bueiros de entrada e saída do reservatório.

Os dados de batimetria foram obtidos a partir do MDE de 2013 processado no *ArcGIS* para análise da profundidade do quantitativa do assoreamento. Traçou-se uma linha do início do reservatório até o final deste e projetaram-se 65 linhas perpendiculares a esta linha (seções transversais), distando 38,8 m entre cada uma delas. A contagem das linhas segue em direção a montante, como mostra a Figura 16. Em cada uma dessas linhas perpendiculares, foram criados pontos distando 10 m entre eles. Foram obtidas as coordenadas *Easting* (UTM) e altitude de cada um destes pontos.

Para a determinação do coeficiente de *Manning*, foram calculados os valores para cada um dos seis pontos onde houve a coleta de sedimentos utilizando a equação de Strickler (1923) *apud* Lang, Ladson & Anderson (2004):

$$n = 0,039 * \sqrt[6]{\frac{d_{50}}{0,3048}} \quad (2)$$

Em que  $n$  é o Coeficiente de Manning; e  $d_{50}$  é o diâmetro médio das partículas do solo.

A equação 2 é muito utilizada quando os sedimentos possuem tamanho de cascalho ou menor (LANG, LADSON & ANDERSON, 2004).

Devido à falta de dados precisos sobre os bueiros de entrada e saída, utilizaram-se valores aproximados para a análise.



Foi analisado o histórico das medições de vazão coletadas da Estação Fluviométrica número 1695, referente ao manancial Córrego do Ambrósio fornecido pela COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais) (2019) (Anexo 1). Os dados são de fevereiro de 2011 a agosto de 2019, totalizando 30 leituras. Por estes valores de vazão, é possível observar a redução da vazão de água nos mananciais hídricos nos últimos anos, como Silva *et al.* (2018) reportou em seu trabalho o período crítico da seca que afetou a região sudeste entre 2014 a 2017.

Contudo, estes dados não foram suficientes para realizar a curva-chave de sedimentos e, por isso, precisou-se analisar os dados de outra estação fluviométrica próxima da área de estudo e com uso e ocupação da área de drenagem similar. Estes dados estão disponibilizados no Portal HidroWeb, uma ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos e que oferece acesso ao banco de dados da Rede Hidrometeorológica Nacional de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA).

Dentre as estações analisadas, a que melhor atendeu aos requisitos de proximidade com os córregos em estudo, similaridade do uso e ocupação da área de contribuição e com tamanho da área de contribuição aproximada foi a estação fluviométrica Fazenda Carvalhais pertencente ao ribeirão do Pinheirinho na bacia do Rio Paraná, no município e Monte Santo de Minas - Minas Gerais, localizada nas coordenadas 21° 08' 14,00" S e 47° 00' 36,00" W, distante aproximadamente 110 km da área de estudo e com área de drenagem igual a 226 km<sup>2</sup>.

A partir do valor da área de drenagem da estação fluviométrica, calcularam-se as proporções entre a área de drenagem da estação e a dos córregos e com estes valores calculou-se as vazões diárias dos corpos d'água. A área de contribuição do Córrego do Ambrósio é de 9,162 km<sup>2</sup>, do Córrego do Virgílio é 7,204 km<sup>2</sup> e do Córrego do Engenho é 13,262 km<sup>2</sup>, sendo assim, suas respectivas proporções são: 24,67; 31,37; e 17,04.

Contudo, a proporção entre vazões pode ser realizada somente quando a proporção entre as áreas de drenagem for menor que três (UFRGS-IPH, 1992). Portanto, este método não poderia ser realizado desta maneira. Procedeu-se então analisar estatisticamente se as vazões do Córrego do Ambrósio calculadas a partir das vazões da estação fluviométrica poderiam ser utilizadas, mesmo apresentando uma proporção maior que a indicada, e caso as vazões fossem aceitáveis, a partir

deste córrego seriam obtidas as vazões dos outros. Para isso, calcularam-se as vazões do Córrego Ambrósio a partir dos dados da estação fluviométrica Fazenda Carvalhais, comparando-as com os dados fornecidos pela COPASA e analisou-se o *root mean square* dos erros das vazões medidas ( $v$ ) (RMS $v$ ) por:

$$RMSv = \sqrt{\frac{\sum(\delta x^2)}{n}} \quad (3)$$

Em que  $\delta x$  é a diferença entre o valor observado da vazão na estação fluviométrica Fazenda Carvalhais e o valor medido pela COPASA no córrego Ambrósio; e  $n$  é o número de observações.

O valor obtido de RMS $v$  foi 0,06 m<sup>3</sup>/s, e sabe-se que quanto menor o valor do RMS $v$ , melhor o ajuste do modelo (MATHER, 1999). Por isso, resolveu-se utilizar os dados de vazão obtidos a partir deste método. Para os dados de vazão dos outros dois córregos, fez-se a proporção dividindo-se a área de contribuição do córrego do Ambrósio pela área de contribuição do córrego desejado. A proporção feita com o Córrego do Virgílio foi de 1,27 e com o Córrego do Engenho foi de 0,69. Assim, não houve restrições entre as razões das áreas de drenagem e pode-se fazer a proporção das vazões.

#### 6.6.2.3 Dados de Sedimento

Os dados de granulometria foram inseridos conforme a Tabela 5, em tabelas denominadas de *Bed Gradation*. Foram inseridas as porcentagens de quanto passa em cada classe, assim, sabe-se que na última classe o valor será de 100%.

Foram criados seis modelos de *Bed Gradations*, um para cada ponto coletado em campo. Posteriormente, determinou-se um tipo de *Bed Gradation* para cada sessão.

Tabela 5 - Classificação dos sedimentos no HEC-RAS

Classe	Diâmetro (mm)
<i>Clay</i>	0,004
VFM ( <i>Very Fine Silt</i> )	0,008
FM ( <i>Fine Silt</i> )	0,016
MM ( <i>Medium Silt</i> )	0,032
CM ( <i>Coarse Silt</i> )	0,0625
VFS ( <i>Very Fine Sand</i> )	0,125
FS ( <i>Fine Sand</i> )	0,25
MS ( <i>Medium Sand</i> )	0,5
CS ( <i>Coarse Sand</i> )	1
VCS ( <i>Very Coarse</i> )	2
VFG ( <i>Very Fine Gravel</i> )	4
FG ( <i>Fine Gravel</i> )	8
MG ( <i>Medium Gravel</i> )	16

Fonte: Brunner (2016)

Para se determinar qual equação de transporte de sedimentos deve ser utilizada, buscou-se a Tabela 6 contendo informações sobre cada tipo de função no *Hydraulic Reference Manual version 5.0* do HEC-RAS (BRUNNER, 2016).

Tabela 6 - Faixa de valores de entrada para funções de transporte de sedimento

<i>Function</i>	d (mm)	$d_m$ (mm)	s	V (pés/s)	D (pés)	S	W (pés)	T (° F)
<i>Ackers-White (flume)</i>	0.04 - 7.0	NA	1.0-2.7	0.07- 7.1	0.01- 1.4	0.00006- 0.037	0.23 - 4.0	46 - 89
<i>England- Hansen (flume)</i>	NA	0.19 - 0.93	NA	0.65 - 6.34	0.19 - 1.33	0.000055 - 0.019	NA	45 - 93
<i>Laursen (field)</i>	NA	0.08 - 0.7	NA	0.068 - 7.8	0.67 - 54	0.00000021 - 0.0018	63 - 3640	32 - 93
<i>Laursen (flume)</i>	NA	0.011 - 29	NA	0.7 - 9.4	0.03 - 3.6	0.00025 - 0.025	0.25 - 6.6	46 - 83
<i>Meyer-Peter Muller (flume)</i>	0.4 - 29	NA	1.25 - 4.0	1.2 - 9.4	0.03 - 3.9	0.0004 - 0.02	0.5 - 6.6	NA
<i>Tofaletti (field)</i>	0.062 - 4.0	0.095 - 0.76	NA	0.7 - 7.8	0.07 - 56.7 (R)	0.000002 - 0.0011	63 - 3640	32 - 93
<i>Tofaletti (flume)</i>	0.062 - 4.0	0.45 - 0.91	NA	0.7 - 6.3	0.07 - 1.1 (R)	0.00014 - 0.019	0.8 - 8	40 - 93
<i>Yang (field-sand)</i>	0.15 - 1.7	NA	NA	0.8 - 6.4	0.04 - 50	0.000043 - 0.028	0.44 - 1750	32 - 94
<i>Yang (field-gravel)</i>	2.5 - 7.0	NA	NA	1.4 - 5.1	0.08 - 0.72	0.0012 - 0.029	0.44 - 1750	32 - 94

Fonte: Adaptado de USACE, 1998 apud BRUNNER, 2016

Em que:

d = diâmetro total das partículas, em mm;

$d_m$  = diâmetro médio das partículas, em mm

s = gravidade específica do sedimento, adimensional;

$v$  = velocidade média do canal, em  $\text{pés}/\text{segundo}$ ;

$D$  = profundidade do canal, em pés;

$S$  = gradiente de energia, adimensional;

$w$  = largura do canal, em pés;

$T$  = temperatura da água, em ° F;

$(R)$  = raio hidráulico, em pés;

NA = dado não disponível.

Calculou-se o diâmetro médio das partículas encontradas no reservatório, obtendo-se o valor de 0,091 mm, e observou-se que há partículas cujo diâmetro é menor que 0,04 e maior que 7 mm. A temperatura considerada para análise foi de 21 °C, que corresponde a 69,8 °F. A profundidade máxima é cerca de 6 m, que corresponde a 19,685 pés. Portanto, a partir destas informações e dos dados da Tabela 5, definiu-se que a função que melhor se adequa a este cenário é a de Laursen.

O método de classificação escolhido foi *Thomas Mixing Method*, que é o método padrão do HEC-RAS. O algoritmo considera a influência da blindagem estática e separa o leito em três camadas: a de cobertura, a de subsuperfície e a inativa (BRUNNER, 2016).

O método de velocidade de queda escolhido foi o *Report 12*, que é uma solução iterativa que utiliza as curvas de Van Rijn, mas utiliza a velocidade de queda calculada para obter um novo número de Reynolds e continua a iterar até que a velocidade de queda assumida corresponda à calculada dentro de uma tolerância aceitável (BRUNNER, 2016).

Inseriram-se também informações sobre a localização dos limites dos sedimentos. Nas sessões 1 e 65 inseriram-se curvas de classificação, e nas intermediárias séries temporais de sedimento. Nas curvas de classificação foram adicionados dois pontos de fluxo, contendo os mesmos dados de vazão, carga total de entrada e classificação dos sedimentos. Nas sessões temporais de sedimento inseriu-se somente um ponto de fluxo, contendo os mesmos valores de vazão, carga total de entrada e classificação dos sedimentos.

#### 6.6.2.4 *Projeção do Assoreamento*

Para a realização da projeção do assoreamento, baseou-se na sedimentação ocorrida entre 2013 a 2019. Com o resultado obtido, projetou-se este assoreamento para o mesmo período de duração a partir de 2019, ou seja, de 2019 até 2025. Para isso, criou-se um novo projeto no HEC-RAS e inseriram-se os mesmos dados de número de Manning, informações dos bueiros de entrada e saída do reservatório, escoamento quasi-não permanente e sedimento inseridos anteriormente, trocando-se apenas os dados de batimetria para os coletados em 2019 e os dados de granulometria dos sedimentos coletados em 2019.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Levantamento Batimétrico

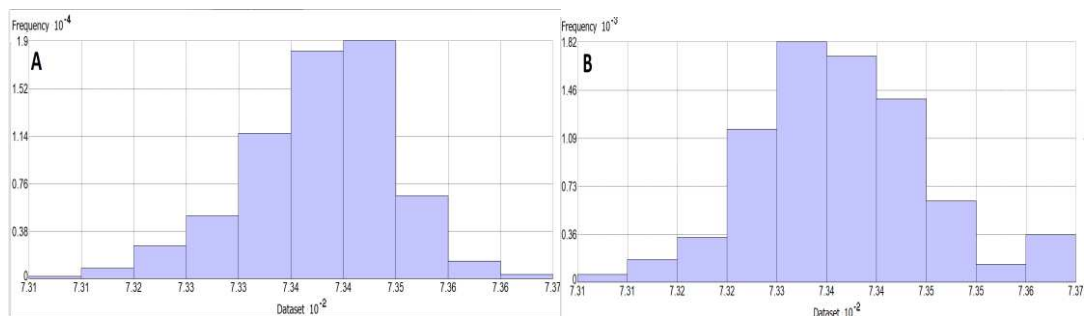
A seguir serão apresentados alguns parâmetros e os resultados gerados pela análise exploratória dos dados para todos os levantamentos.

Tabela 7 - Parâmetros estatísticos das altitudes do leito do lago, coletadas nos levantamentos batimétricos

Ano	2013	2019
Média (m)	734,20	733,81
Mediana (m)	734,32	733,72
Desvio P. (m)	0,89	1.88
Máximo (m)	736,41	736,64
Mínimo (m)	730,93	730,67
Assimetria	-0,4623	0,4462
Curtose	3,6644	3,7660

Fonte: A autora

Figura 17 - Histogramas referentes à variável altitude dos levantamentos batimétricos de A) 2013; e B) 2019.



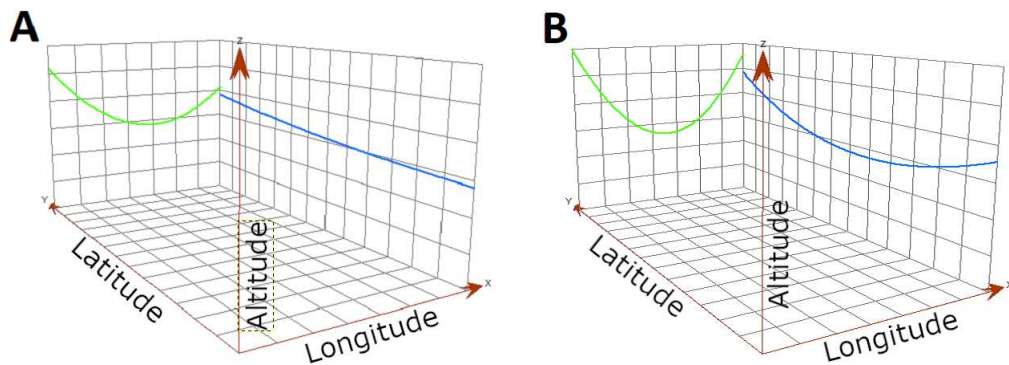
Fonte: A autora

Vale ressaltar que os valores máximos mostrados na Tabela 7 se referem também aos valores de altitudes das linhas d'água para os levantamentos.

Nota-se pelos histogramas que existem alguns valores distantes da média que são representados pelas barras mais à direita no segundo histograma. Porém estes valores representam a borda do lago não sendo, portanto, *outliers*. Com relação à simetria, nota-se que os dados de 2019 possuem leve assimetria à direita (positiva); já os dados de 2013, possuem leve assimetria à esquerda (negativa). Isso significa que no levantamento de 2013 a maioria dos dados obtidos tinham profundidade menor que a média, enquanto que no levantamento de 2019 a maioria dos dados apresentaram valores maiores que a média. Com relação à curtose, que mede o 'achatamento' de uma distribuição de frequências, ou seja, mede o grau de proximidade dos valores da distribuição em torno do centro da mesma, pode-se perceber, observando a Figura 17, que ambos os levantamentos possuem a curva da função de distribuição mais afunilada com um pico mais alto do que a distribuição normal. Outro aspecto interessante a se considerar é a profundidade mínima para cada levantamento. Percebe-se que o valor de altitude mínima decresce levemente ao longo dos anos, contudo, devido à incerteza dos dados ser de 1 m para o primeiro levantamento e 2 m para o segundo, ou seja, maior que a diferença entre as profundidades mínimas que foi de 26 cm, não se pode afirmar que isto esteja efetivamente ocorrendo.

Além de dados referentes aos histogramas, outra importante informação a se observar é a presença de tendência nas observações. Na Figura 18, tem-se os gráficos de tendência para os levantamentos, onde os eixos x, y e z representam a longitude, latitude e altitude respectivamente. Nota-se que há tendências de segunda ordem tanto no plano xz (curvas em verde) quanto para o plano yz (curvas em azul) para o levantamento de 2019, contudo no levantamento de 2013 isso só ocorreu no plano xz, a tendência no plano yz apresentou-se como uma linha decrescente devido à coleta de uma quantidade muito maior de dados em locais de maior latitude.

Figura 18 - Gráficos de Tendência dos levantamentos de A) 2013; e B) 2019.

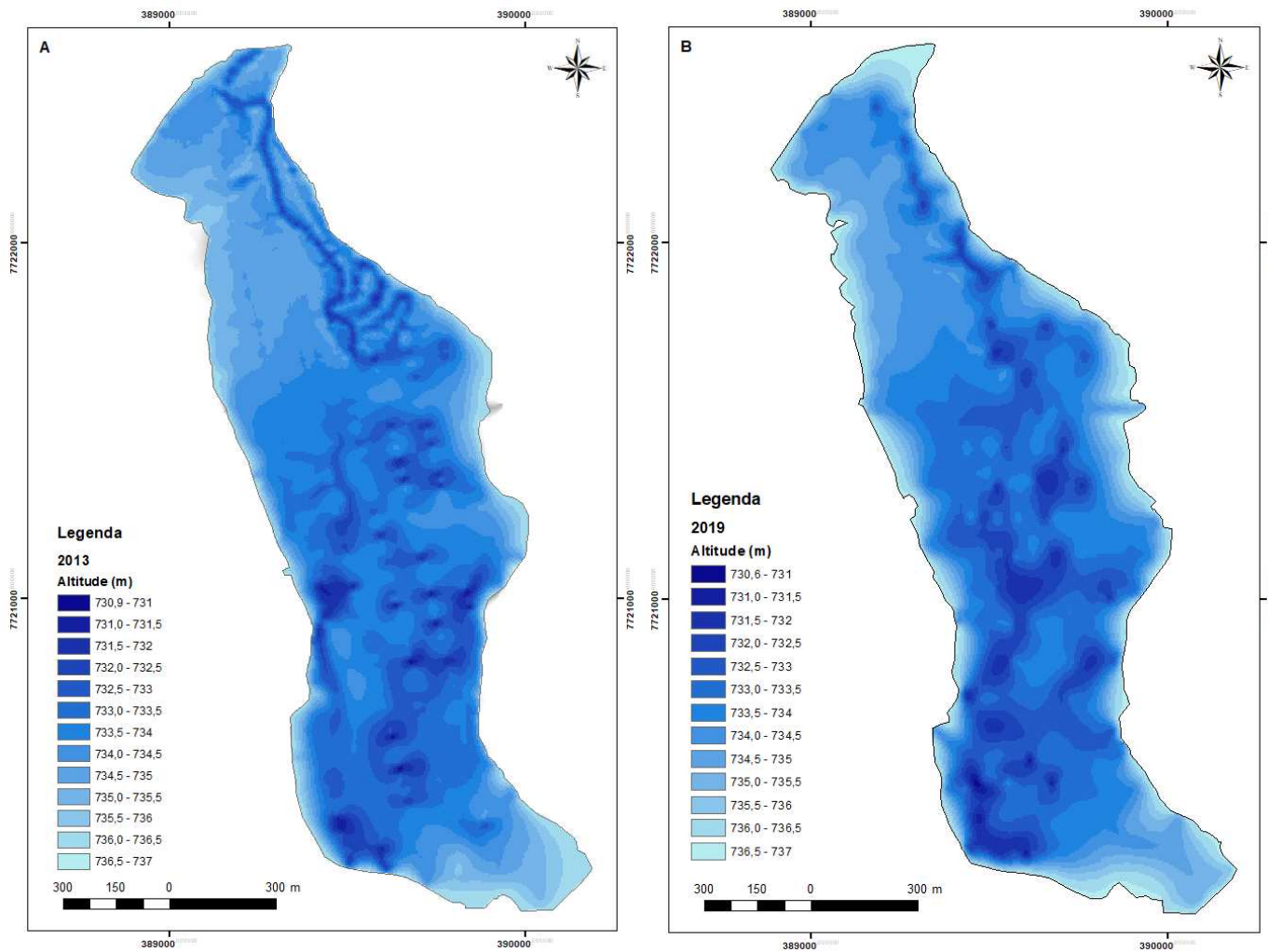


Fonte: A autora

Depois de verificada a consistência dos resultados da predição, geraram-se MDE's para cada ano a partir do modelo da *Topo to Raster*, apresentados a seguir, nas Figuras 19 e 20.

Pela Figura 19 nota-se que o leito do antigo rio, visível na parte superior do modelo de 2013, não está visível mais no de 2019. Isto sugere um assoreamento desse leito. Porém, devido à incerteza de 2m não é possível confirmar esta afirmação. Observa-se também que houve um aumento das áreas mais rasas próximas às margens, indicando um possível assoreamento nestas regiões.

Figura 19 - MDE A) Dados de 2013. B) Dados de 2019

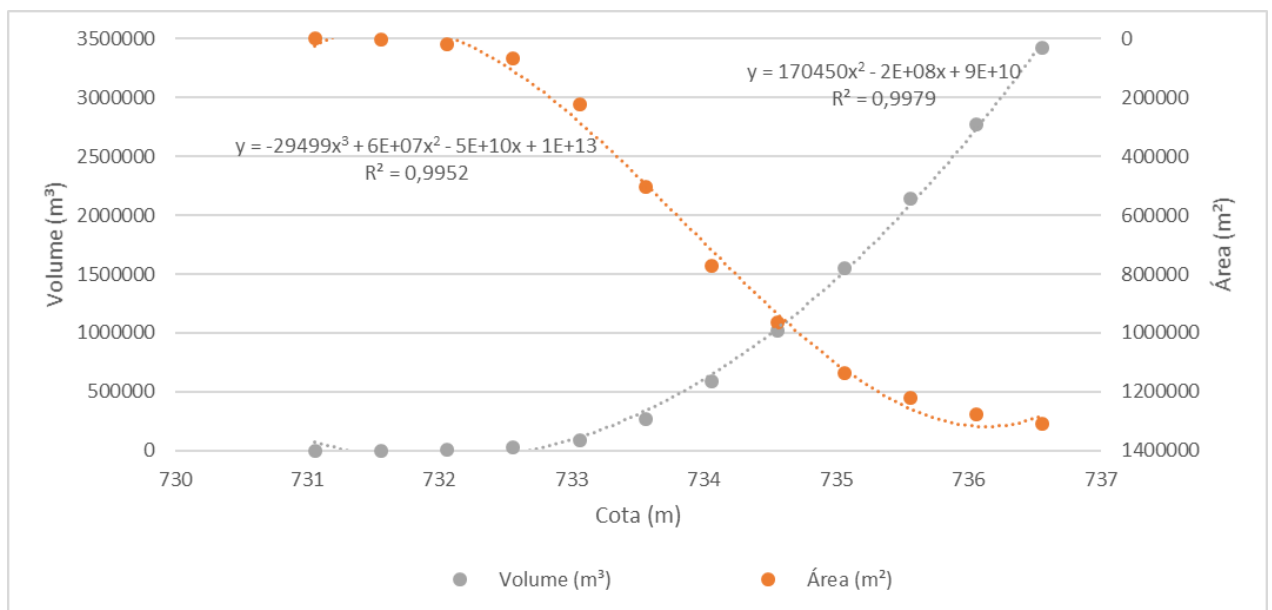


Fonte: A autora

### 7.1.1 Quantificação do Assoreamento

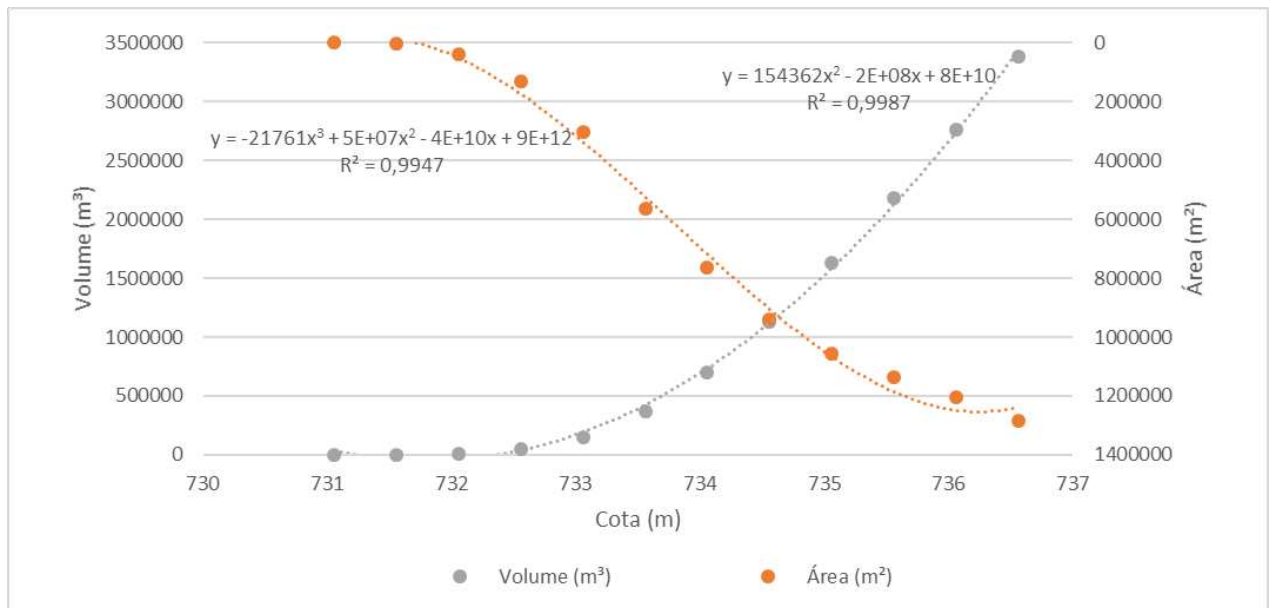
Com o cálculo dos volumes acumulados por cota como foi descrito na metodologia, gerou-se um diagrama de Cota x Área x Volume Acumulado para cada levantamento com as respectivas linhas de tendência e as equações de ajuste (Figuras 20 e 21). Os dados que geraram os gráficos podem ser visualizados na Tabela 8.

Figura 20 - Diagrama Cota x Área x Volume Acumulado - Levantamento de 2013



Fonte: A autora

Figura 21 - Diagrama Cota x Área x Volume Acumulado - Levantamento de 2019



Fonte: A autora

Tabela 8: Dados para a construção dos diagramas Cota x Área x Volume Acumulado

Altitude (m)	2013		2019	
	Área (m²)	Volume (m³)	Área (m²)	Volume
736,56	1310935	3420502	1283052	3383482
736,06	1278307	2769954	1203862	2762250
735,56	1222679	2144275	1135309	2177429
735,058	1134915	1552108	1057983	1628133
734,558	963421	1022841	940645	1126323
734,058	770567	588835	762701	700662
733,558	502063	265709	561277	364404
733,058	224332	88370	304832	151884
732,558	67422	23122	129284	47642
732,058	18006	4877	38966	8427
731,558	2934	332	2623	567
731,058	18	1	316	41

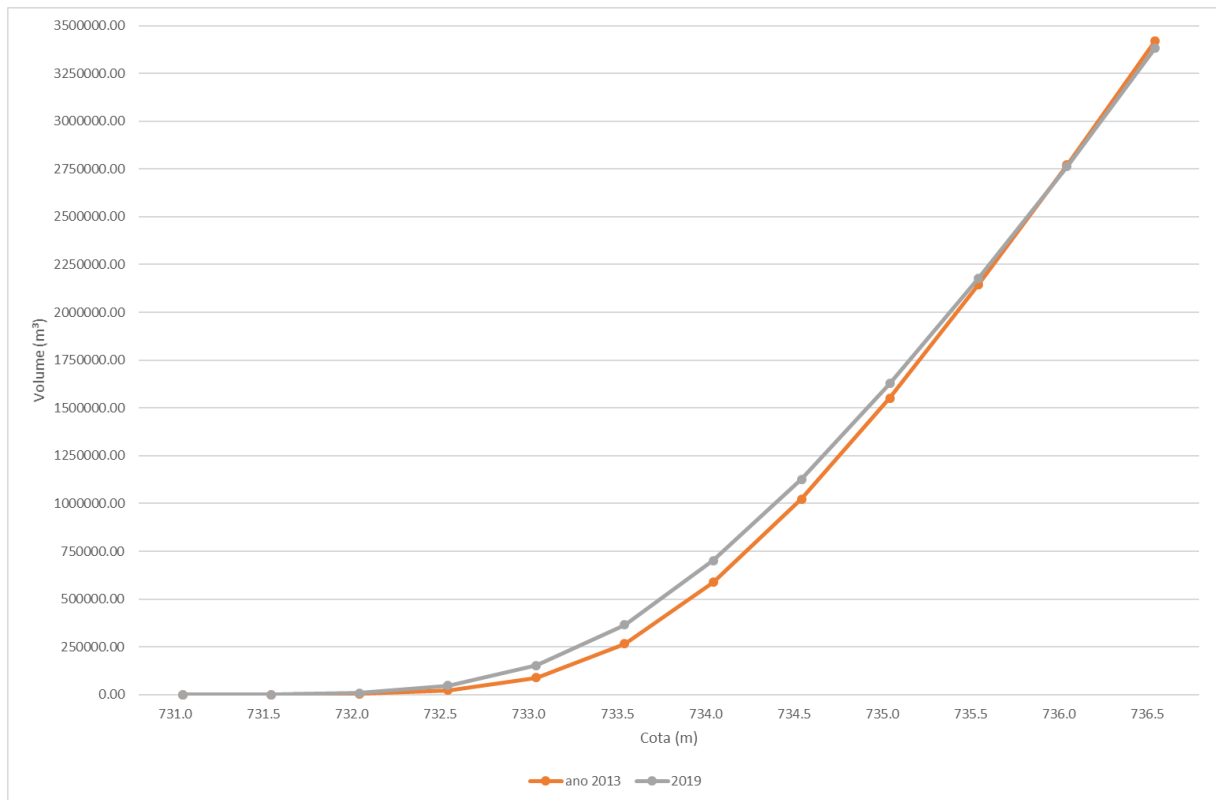
Fonte: A autora

Da observação conjunta da Figura 20, da Figura 21 e da Tabela 8, percebe-se que ocorreu um aumento do volume acumulado na parte inferior do reservatório, entre

as cotas 731,06 m e 735,56 m. Entretanto, observou-se que houve uma diminuição do volume acumulado total: em 2013, o volume total do reservatório até a cota de 736,56 m foi de 3420501,5 m<sup>3</sup>; e em 2019, 3383481,8 m<sup>3</sup>. Portanto foi assoreado 37.019,7 m<sup>3</sup>, correspondente à 1% do volume inicial, e que apresenta uma média de 6.1169,95 m<sup>3</sup> de sedimentos assoreados por ano. Apesar deste volume assoreado não ter sido muito comparado ao volume total do reservatório, esta situação está ocorrendo perto das margens principalmente na região perto da área urbana, o que a torna preocupante. Logo, há indícios que no leito do reservatório ocorreu um desassoreamento, e nas regiões de média e baixa profundidade, houve um assoreamento. Este fato é também evidenciado pelo gráfico da Figura 22 e o mapa mostrando a subtração do MDE de 2013 para o de 2019, ilustrado na Figura 23, sendo as regiões em tons mais claros as que passaram por um desassoreamento e as regiões mais escuras as que assorearam.

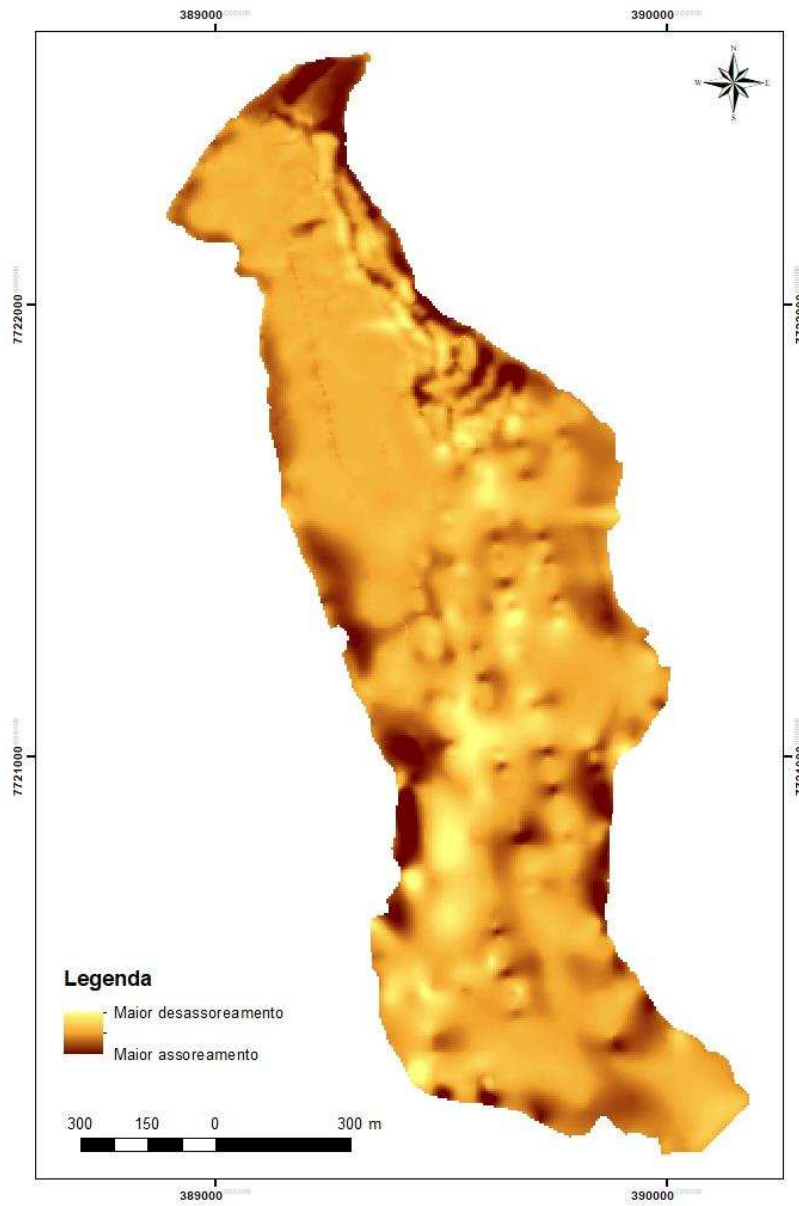
Plotando as curvas de Cota x Volume Acumulado dos dois levantamentos em um mesmo gráfico, pode-se compará-las para tirar conclusões acerca da magnitude e da espacialização do assoreamento ao longo do tempo entre os levantamentos (Figura 22). Os valores de variação dos volumes acumulados versus a cota correspondente de um levantamento para o seguinte são apresentados na Tabela 9.

Figura 22 - Gráfico Cota x Volume Acumulado para os levantamentos realizados



Fonte: A autora

Figura 23 - MDE da distribuição do volume assoreado



Fonte: A autora

Tabela 9 - Variação do Volume Acumulado do represamento entre os levantamentos

Altitude (m)	Variação do volume entre os levantamentos de 2013 e 2019 (m <sup>3</sup> )	Diferença (%)
736,56	37020	1,1
736,06	7705	0,3
735,56	-33153	-1,5
735,06	-76025	-4,7
734,56	-103482	-9,2
734,06	-111827	-16,0
733,56	-98694	-27,1
733,06	-63514	-41,8
732,56	-24520	-51,5
732,06	-3550	-42,1
731,56	-235	-41,5
731,06	-40	-98,5

Fonte: A autora

A partir dos resultados exibidos, nota-se que de 2013 para 2019 houve uma variação negativa de acúmulo de sedimentos na parte mais profunda do represamento (Cotas 731,06 m e 735,56 m). A partir destas, passa a haver um acúmulo de sedimentos acentuado até o nível de água considerado. Portanto, nota-se que ocorreu um fenômeno interessante no local de estudo: houve um desassoreamento na parte mais profunda do lago e um assoreamento concentrado na parte mais rasa. Este processo foi observado nos trabalhos de Coelho (2008), Vale *et al.* (2013) e Viana & Saito (2016).

Grãos maiores sedimentam-se mais rapidamente que os menores. Portanto, como a área de estudo localiza-se a jusante do represamento, infere-se que as partículas presentes nesta região são mais finas que as depositadas a montante. Segundo Reineck & Singh (1980), a deposição nas regiões de cotas intermediárias e mais elevadas ocorre devido aos sedimentos em suspensão. Como descrito no tópico 4.2, o depósito de sedimentos finos propicia o desenvolvimento de plantas aquáticas. Essa vegetação flutuante, caso não seja retirada, poderá provocar problemas diversos em alguns anos. Com seu apodrecimento, ela se depositará no fundo do lago e se transformará em matéria orgânica, contribuindo ainda mais para o assoreamento do reservatório.

Desse modo, devido o desvio padrão, sugere-se que o aumento do volume de água na região mais profunda do represamento se deve ao entalhamento do seu leito, já que se observa um alargamento e aprofundamento dessa região. A diminuição do volume total acumulado do reservatório se deve ao assoreamento por sedimentos finos flutuantes e os sedimentos trazidos pelo escoamento superficial da área de contribuição do reservatório para as regiões mais rasas, com cota acima de 735,56 metros. Esta sedimentação também sofre influência do vento por ser um reservatório de baixas profundidades, assim como Håkanson (1977). Assim, nota-se a necessidade de realizar uma dragagem nestas áreas mais assoreadas, uma vez que o processo de assoreamento em pequenos reservatórios é rápido.

## 7.2 Caracterização dos Sedimentos

A partir da coleta e posteriores análises laboratoriais dos sedimentos de fundo do reservatório, foi possível analisar a variação granulométrica das amostras, e os valores de massa específica das partículas. Os resultados das análises de todos os materiais da primeira e segunda coletas podem ser visualizados no Apêndice B e suas curvas granulométricas no Apêndice C. Os resultados médios de cada ponto da primeira e segunda coletas podem ser visualizados nas Tabelas 10 e 11 respectivamente.

Tabela 10 – Resultados médios das análises laboratoriais da primeira coleta  
(Fevereiro 2018)

Ponto	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Distribuição Granulométrica (%)			
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho
1	2,682	18,3	19,3	52,3	10,0
2	2,611	21,7	42,7	31,0	4,7
3	2,736	24,5	34,5	31,5	9,5
4	2,500	7,7	25,3	62,0	5,0
5	2,545	37,0	45,0	18,0	0,0
6	2,445	24,7	35,3	40,0	0,0

Fonte: A autora

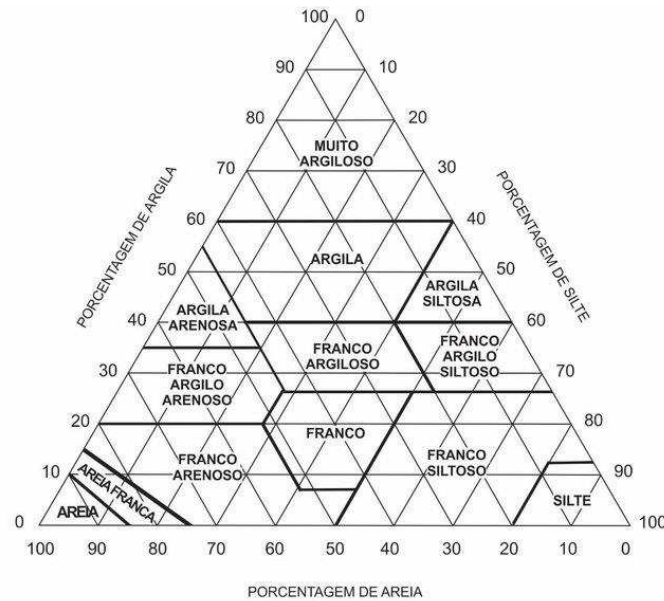
Tabela 11 – Resultados médios das análises laboratoriais da segunda coleta (Agosto 2019)

Ponto	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Distribuição Granulométrica (%)			
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho
1	2,728	10,0	31,0	58,0	1,0
2	2,739	12,3	52,0	35,7	0,0
3	2,798	3,0	31,0	56,0	10,0
4	2,585	36,0	48,0	16,0	0,0
5	2,667	12,0	32,0	56,0	0,0
6	2,768	30,0	43,0	27,0	0,0

Fonte: A autora

Estas amostras apresentam misturas com frações consideráveis de partículas de areia, silte e argila. Conforme o Triângulo textural utilizado para determinação da textura do solo (Figura 24), estes solos são compreendidos em solos do tipo franco, franco arenoso, franco argilo siltoso e franco siltoso. A média das frações granulométricas dos sedimentos na primeira coleta foi de aproximadamente 22% de argila, 34% de silte, 39% de areia e 5% de pedregulho; e na segunda coleta foi de aproximadamente 17% de argila, 40% de silte, 41% de areia e 2% de pedregulho.

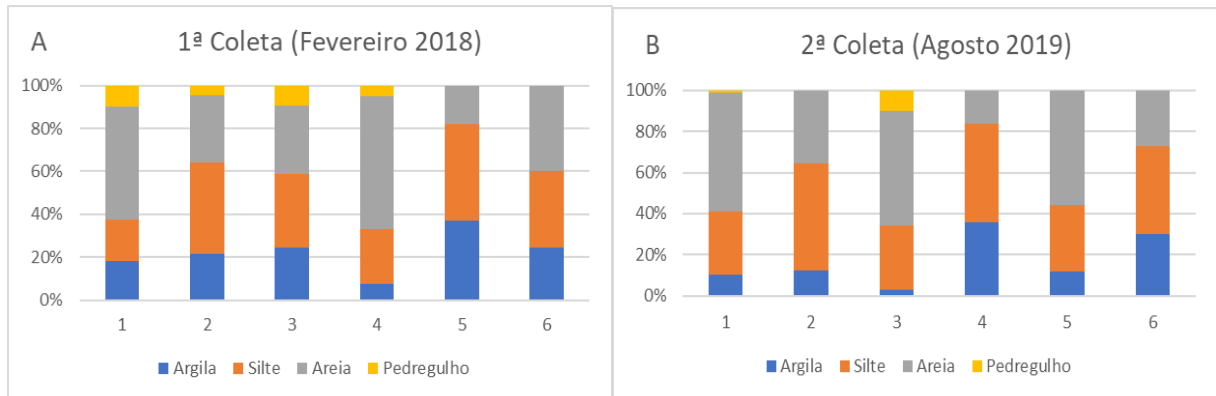
Figura 24 - Triângulo textural utilizado para determinar a textura do solo



Fonte: Lemos & Santos (1984).

O comportamento da variação das frações granulométricas pode ser visualizado na Figura 25. Nota-se que os sedimentos coletados apresentaram predominância de silte e areia, e sua classificação geotécnica varia entre areia siltosa argilosa e silte arenoso com argila. Isso indica o fato de que o elevado assoreamento das margens é causado principalmente pelo escoamento superficial, uma vez que mesmo os pontos mais a jusante apresentaram partículas com diâmetro maior e não somente nos pontos de entrada dos córregos. A considerável fração de pedregulhos nos pontos 1 (Córrego do Virgílio), 2 (Córrego do Ambrósio) e 3 (loteamento) na primeira coleta pode ser explicada pela precipitação no dia anterior a coleta. Pela coleta ocorrida em agosto de 2019 nota-se que somente há pedregulhos no ponto 3, onde há o loteamento. Os pontos 1 e 2 representam os pontos de entrada dos córregos que abastecem o reservatório, com a precipitação houve um maior carreamento de partículas mais grossas até esses locais; já no ponto 3, a precipitação possivelmente elevou o escoamento superficial de sedimentos vindos do loteamento em construção.

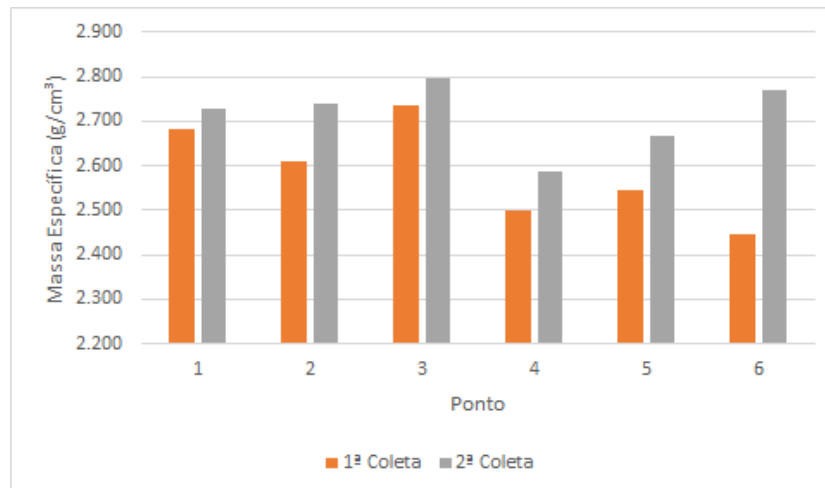
Figura 25 – Distribuição Granulométrica - A) Primeira coleta B) Segunda coleta



Fonte: A autora

Com os dados de massa específica, nota-se que as amostras da primeira coleta apresentaram menor valor que as da segunda. O valor médio encontrado para os sedimentos na primeira coleta foi de  $2,59 \text{ g/cm}^3$  e para os da segunda coleta foi de  $2,71 \text{ g/cm}^3$ . Na Figura 26 nota-se a variação das massas específicas das amostras entre a primeira e segunda coleta para os seis pontos analisados.

Figura 26 – Variação da massa específica das partículas nas amostras coletadas.



Fonte: A autora

As amostras localizadas mais próximas aos córregos (pontos 1 e 2) e do loteamento em construção (ponto 3) tem massa específica maior do que os pontos mais distantes, o que parece mostrar que os grãos formados por minerais mais densos

se depositam nas proximidades das saídas dos córregos. A densidade das amostras coletadas em agosto de 2019 (período seco) foi maior que as coletadas em fevereiro de 2018 (período chuvoso), isso sugere que o material analisado na primeira coleta aparenta ser mais intemperizado que o da época seca, uma vez que minerais mais intemperizados tem menor densidade específica que os menos intemperizados.

### 7.3 Análise da Qualidade da Água

Os resultados das análises das amostras dos quatro pontos de coleta são apresentados na Tabela 12, para as campanhas realizadas em fevereiro de 2018 e agosto de 2019. Vale destacar que o período seco na região ocorre entre abril e setembro, e o período chuvoso ocorre entre outubro e março.

Tabela 12 – Resultados das análises de qualidade de água

		Legislação	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
Data e Horário das Coletas			20/2/18	17/8/19	20/2/18	16/8/19	20/2/18	17/8/19	20/2/18	17/8/19
			9h19	10h	9h48	17h20	11h40	10h30	12h15	11h
Temperatura (°C)			26	21,9	26,9	24,1	27,8	21,3	27,8	21,3
pH	6 ≤ pH ≤ 9		5,5	8,2	6,1	8,7	5,6	8,0	5,7	8,1
Condutividade Elétrica (µS/cm)			80	2,2	100,1	63,2	85,9	88	74	59,2
Oxigênio Dissolvido (%)			79,5	45,5	85	20,4	70,1	12,8	55,2	37,2
Oxigênio Dissolvido (mg/L)		> 5	5,93	3,64	6,19	1,57	5,06	1,04	4,65	3,02
Coliformes Totais (NMP/100mL)		< 1000	2,98* 10 <sup>3</sup>	NO	1,55* 10 <sup>4</sup>	NO	2,09*10 <sup>2</sup>	NO	1,53*10 <sup>3</sup>	NO
Turbidez (ntu)		< 100	30,28	19,87	24,68	18,91	16,7	17,77	16,82	17,98
Sólidos (mg/L)	Totais		104,33	102,50	222,50	81,50	91,67	79,00	184,50	69,00
	Voláteis		33,67	49,50	158,00	35,50	46,67	36,00	141,50	31,00
	Fixos		70,67	53,00	64,50	46,00	45,00	43,00	43,00	38,00
Sólidos Suspensos (mg/L)	Totais	< 100	33,50	25,00	26,00	23,50	10,00	19,50	8,50	21,00
	Fixos		19,50	12,50	10,50	10,00	-1,50	4,00	-0,50	3,00
Kjeldahl Total			3,18	2,90	2,85	1,50	2,44	1,00	2,31	1,50
Nitrogênio (mg/L)	Amoniacal	3.7: pH ≤ 7.5 2.0: 7.5 < pH ≤ 8 1.0 :8.0 < pH ≤ 8.5 0.5: pH > 8.5	0,00	0,39	0,52	0,00	0,00	0,00	1,17	0,00
	Orgânico		3,18	2,51	2,34	1,50	2,44	1,00	1,14	1,50
Fósforo (mg/L)		< 0.030	0,16	0,22	0,12	0,27	0,13	0,04	0,10	0,06
DBO (mg/L)		< 5	ND	ND	8,00	ND	4,00	ND	4,00	ND
DQO (mg/L)			38,54	30,00	49,54	27,00	41,92	20,00	34,31	8,00

\*A sigla NO se refere aos resultados não observados devido à inviabilização da análise.

\*A sigla ND se refere às análises em que não foi detectado um resultado, por este estar abaixo do limite mínimo de detecção do método empregado.

\*A coleta de fevereiro de 2018 ocorreu no período chuvoso e a coleta de agosto de 2019 no período seco.

Fonte: A autora

Comparam-se os resultados encontrados para os parâmetros analisados com os limites máximos e mínimos permitidos pela Resolução CONAMA 357 de 2005 e a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01 de 2008, aplicada em nível nacional para águas doces de Classe II - águas destinadas para o consumo humano após tratamento convencional que contempla as etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Estas legislações dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelecem as condições e padrões de lançamento de efluentes. Tanto a Resolução CONAMA, quando a Deliberação Normativa do COPAM determinam os mesmos limites para os parâmetros analisados neste estudo.

Notou-se uma diferença considerável entre a faixa de temperatura medida para o mês de fevereiro (27°C) e o mês de agosto (21°C). Destaca-se que a temperatura do ponto 2, localizado na entrada do córrego do Ambrósio, no mês de agosto apresentou um valor mais elevado devido à época da coleta e à diferença do horário da coleta. A discrepância entre os meses analisados se deve ao fato da primeira coleta ter sido realizada no verão e a segunda no inverno, de modo que a temperatura do ar exerceu influência na temperatura da água.

Os valores de pH para os quatro pontos, tanto no período chuvoso quanto na estiagem, se mantiveram dentro do limite estabelecido pela Legislação, entre 6 e 9. Na primeira análise, em fevereiro, os resultados variaram entre 5,5 e 6,1, já na segunda análise, em agosto, a variação ocorreu entre 8,0 e 8,7. O fato de na primeira coleta ter-se obtido valores de pH mais baixos pode ser explicado pela chuva que ocorreu na noite do dia anterior à coleta, uma vez que normalmente a água da chuva é ácida, com pH variando entre 5 - 6, e a influência da chuva sobre o pH das águas continentais é mais evidente quando estas possuem baixa capacidade de tamponamento (ESTEVEZ, 2011).

Os valores de oxigênio dissolvido obtidos nos pontos 1, 2 e 3 na primeira coleta foram superiores ao limite mínimo de 5 mg/L, já no ponto 4 não se obteve um valor superior. Este limite mínimo também não foi superado em nenhum resultado das amostras obtidas na segunda coleta. Os níveis de concentração do oxigênio dissolvido foram consideravelmente maiores na primeira coleta e esta diferença pode ser explicada segundo Pereira *et al.* (2010) por dois motivos: a primeira devido à turbulência na água causada pela precipitação que gera maior troca de oxigênio do ar e da água; e segundo devido à temperatura, com o aumento da temperatura, a quantidade de oxigênio dissolvido diminui.

Quanto aos resultados de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), na primeira campanha a amostra do ponto 1 não foi detectado valor mínimo, as amostras dos pontos 3 e 4 apresentaram valores abaixo do limite de 5 mg/L  $O_2$  e a amostra do ponto 2 apresentou valor acima de 5 mg/L  $O_2$ . Já na segunda campanha não foi detectado valor mínimo para as amostras analisadas. Os resultados de DBO mais elevados no período chuvoso devem-se à precipitação, que intensifica o escoamento

superficial e a infiltração no solo, aumentando a quantidade de matéria orgânica na água (RIBEIRO; SANDRI; BOËNO, 2013).

Observando-se os resultados de coliformes totais, notou-se que somente a amostra do ponto 3, com resultado  $2,09 \cdot 10^2$ , não excedeu o limite de 1000 coliformes termotolerantes (CF) por 100 mL de água. Os pontos 1 e 2 apresentaram os valores mais elevados por estarem perto do córrego onde se despeja o esgoto doméstico do município. O ideal seria que esta análise fosse realizada também na época da estiagem para que pudesse comparar estes dados, uma vez que a precipitação aumenta o escoamento superficial que pode carregar uma quantidade ainda maior de coliformes para o lago.

Observa-se que a quantificação dos sólidos foi maior no período chuvoso, visto que os resultados variaram entre 51 e 84 mg/L ST (Sólidos Totais) e no período de estiagem entre 3 e 7 mg/L ST. Apesar dos resultados no período chuvoso terem sido mais elevados, eles ainda são considerados baixos. O comportamento dos sólidos em suspensão é semelhante ao da turbidez, variável com a qual se relaciona. Os valores refletem a condição local, com aumento em locais de maior poluição (Almeida e Schwarzbald, 2003). Segundo ANA (2009) e CETESB (2009), o aumento de sólidos em suspensão na água pode alterar as condições de luminosidade, dificultando a realização da fotossíntese de organismos autotróficos submersos, prejudicando assim os organismos heterotróficos dependentes do oxigênio dissolvido produzido na fotossíntese para respiração. Além disso, intensifica o processo de assoreamento.

O valor máximo de fósforo total permitido em ambientes lênticos é de no máximo 0,030 mg P/L para a Classe 2. Contudo, o valor médio encontrado para o período de estiagem foi 0,128 mg P/L e para o período de chuvas foi 0,147 mg P/L. Este nutriente pode ser proveniente de fontes naturais como composição de rochas, levado pelo escoamento superficial da água pluvial, material presente na atmosfera e resultante da decomposição de organismos; e artificiais como dejetos de esgotos domésticos e industriais, fertilizantes agrícolas e material de origem industrial contido na atmosfera (Wetzel, 2001). É o principal responsável pela eutrofização artificial de reservatórios, acarretando mudanças físico-químicas do meio aquático. No caso da área de estudo, como não ocorrem rochas em que esses teores são elevados, os resultados elevados encontrados, variando entre 0,04 e 0,27, devem estar ligados à descarga de esgotos

#### 7.4 Distribuição de Chuvas

Os dados de precipitação foram obtidos a partir da estação meteorológica da Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé (Cooxupé) na cidade de Carmo do Rio Claro, distante aproximadamente 40 km de Capitólio.

Pelos dados obtidos (Tabela 13), tem-se que no período entre o primeiro e o segundo levantamento, de setembro 2013 a agosto de 2019, o total precipitado foi de 8808,8 mm, que corresponde a uma precipitação média mensal de 122,3 mm.

Tabela 13 – Precipitação mensal em Carmo do Rio Claro

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Janeiro	313,9	67	139,8	274	200	173	86,8
Fevereiro	204	68,8	308,8	146,4	95,4	188,6	235
Março	245	105,4	232,0	250,6	150,8	133,4	262,8
Abril	104,6	66,2	44,0	33,4	46,6	70,8	265,4
Mai	114,4	22,6	99,4	37,8	83,8	20,8	90,6
Junho	102,6	11,6	46,8	84,8	49,2	25,2	5,2
Julho	30,6	67,2	20,0	1,4	1,2	0	12,4
Agosto	10,8	0	2,2	22,2	4,8	51,4	24,6
Setembro	89,2	45,6	198,6	6,8	48	92,4	-
Outubro	150,2	107,6	36,4	201	122,6	359,8	-
Novembro	275	224,8	218,0	329,8	184	419,2	-
Dezembro	192,8	132,8	218,0	100,6	263,8	361,6	-
Total	1833,1	919,6	1564	1488,8	1250,2	1896,2	982,8*

\* valor observado até agosto de 2019

Fonte: Cooxupé (2019)

Nota-se que o total precipitado por ano apresentou uma significativa redução entre os anos de 2013 a 2017, o que ocasiona a redução do aporte de sedimentos do reservatório.

Durante os períodos de verão de 2013/2014 e 2014/2015, a região sudeste do Brasil sofreu uma queda significativa na precipitação. O período de 2013/2014 teve uma redução mais considerável na precipitação, sendo classificado como

extremamente seco, com um final precoce da estação chuvosa devido à ausência da Zona de Convergência do Atlântico Sul. Esse fenômeno foi resultado de uma fonte de calor tropical anômala observada no hemisfério sul da Terra, do norte da Austrália ao sudeste do Brasil. As temperaturas foram muito mais altas do que o normal na região sudeste do Brasil durante a primavera e o verão de 2015, causadas pelo fenômeno El Niño, que também produziu secas na porção oeste do estado de Minas Gerais em 2015 e durante parte de 2016 (Coelho *et al.*, 2016).

As chuvas foram concentradas e mais intensas no período de outubro a março de cada ano, o que intensifica os processos de erosão. A ocorrência de chuvas mais intensas pode estar ligada às mudanças climáticas que foram observadas em escala global. Provavelmente, isso está relacionado à intensificação do ciclo da água causada pelo aumento da temperatura global, impactando diretamente as propriedades físicas, químicas e biológicas dos reservatórios, que são muito suscetíveis às mudanças climáticas (Laura *et al.*, 2017). Além disso, de acordo com o IPCC (2014), as Américas Central e do Sul vivem sob o risco potencial de redução da disponibilidade de água e aumento de inundações e deslizamentos de terra, que também estão relacionados às mudanças climáticas globais. Portanto, esse cenário de chuvas mais intensas associadas a invernos mais secos e longos pode estar relacionado aos efeitos das mudanças climáticas globais que aumentaram nos últimos anos, conforme discutido por Sanches *et al.* (2017).

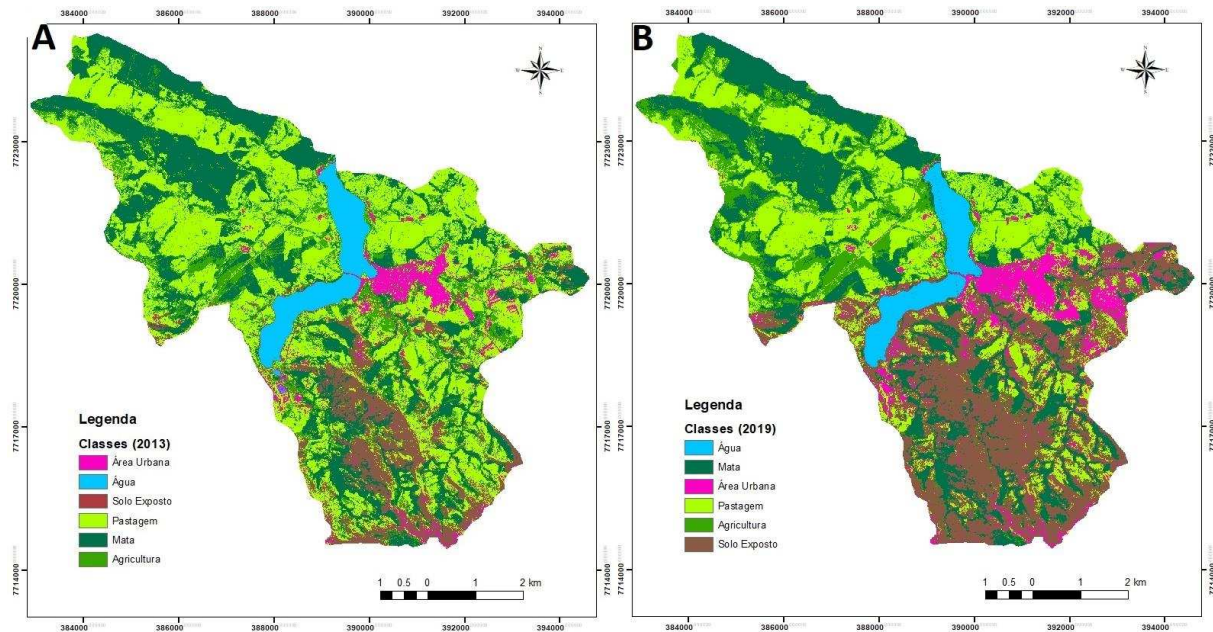
As chuvas mais intensas aumentam os processos de erosão, aumentando também a quantidade de sedimentos que fluem ao longo dos leitos dos rios e se depositam em áreas mais amplas, como reservatórios (TUCCI & MENDES, 2006).

Logo, pode-se estabelecer uma relação entre a distribuição de chuvas com o assoreamento na área estudada. As áreas próximas às margens do reservatório foram as regiões mais afetadas pelo assoreamento, o que é causado em grande parte pelo transporte de sedimentos vindo da região entorno do reservatório, e este processo é agravado quando ocorrem chuvas mais intensas.

## 7.5 Uso e ocupação do solo na área de contribuição do reservatório

A partir das classificações de uso e ocupação do solo realizadas no ArcGIS para a área de contribuição do reservatório, obtiveram-se os resultados mostrados nas Figuras 27 e Tabela 14.

Figura 27 – Mapas de uso e ocupação da área de contribuição do reservatório A) em 2013 B) em 2019



Fonte: A autora

Tabela 14 – Resultado das classificações de uso e ocupação do solo

Uso e Ocupação	2013	2019
Agricultura	12,1%	13,3%
Água	4,6%	4,5%
Área Urbana	7,0%	7,5%
Mata	25,4%	24,1%
Pastagem	34,5%	26,1%
Solo Exposto	16,4%	24,5%

Fonte: A autora

A avaliação da precisão temática destas classificações foi realizada a partir do índice Kappa e a exatidão global. Para isso, determinaram-se as matrizes de confusão

(localizadas no Apêndice D), e a partir delas, realizaram-se os cálculos do índice Kappa e da exatidão global no Excel. Obtiveram-se os valores de avaliação para as classificações das imagens de uso e ocupação do solo em 2013 e 2019 na área de contribuição do reservatório mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados das avaliações para as classificações

	Índice Kappa	Exatidão Global
2013	0,81	0,84
2019	0,86	0,88

Fonte: A autora

A partir destes valores, é possível inferir que as classificações apresentaram um grau de concordância excelente e, por isso, pode-se tirar conclusões a partir delas.

Pelos valores em porcentagem de cada classe em 2013 e em 2019, pode-se observar mudanças discretas no uso e ocupação do solo das classes Agricultura, Água, Mata e Área Urbana. Esta última, apresentou uma redução possivelmente ocasionada devido à confusão com regiões de pastagem e agricultura. As classes Pastagem e Solo Exposto apresentaram diferenças expressivas nas porcentagens, com mais de 8%, sendo que a Pastagem teve sua área reduzida e o Solo Exposto ampliada.

Analisando-se as mudanças de uso e ocupação do solo com a imagem referente aos córregos que abastecem o lago, notou-se o aumento da classe Solo Exposto principalmente nas margens desses corpos d'água que são Áreas de Preservação Permanente (APP). Estas APP's, quando desmatadas, degradadas ou indevidamente ocupadas, ficam suscetíveis aos efeitos de desbarrancamentos e deslizamentos de solo ou rochas e o conseqüente carreamento de sedimentos para o leito dos corpos d'água, promovendo seu assoreamento (Ministério do Meio Ambiente, 2011).

Estas mudanças na área de contribuição do reservatório resultaram em uma maior taxa de desprendimento de sedimentos do solo ao longo do tempo e conseqüente transporte desses sedimentos pelos córregos que contribuem para o processo de assoreamento da área em estudo.

## 7.6 Modelagem com o HEC-RAS

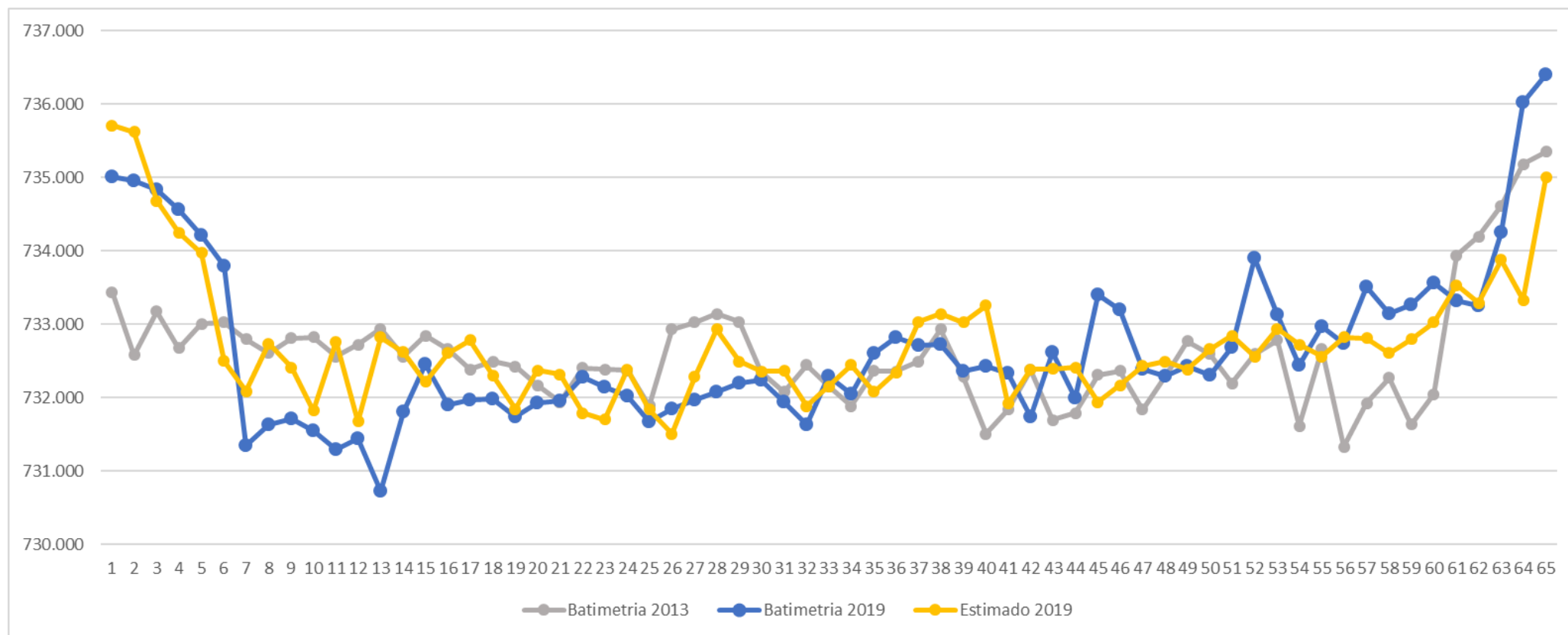
Pela Figura 28, observam-se os perfis longitudinais, ligando os pontos mais profundos das 65 sessões transversais, dos levantamentos batimétricos realizados de 2013 e 2019 e o perfil estimado para 2019 resultante do HEC-RAS. Já a Figura 29 apresenta os perfis longitudinais do levantamento batimétrico de 2019 e o resultado simulado para 2025. A tabela com os valores de altitude mínima de cada sessão transversal utilizado na construção do gráfico encontra-se no Apêndice E.

Analisando-se as os perfis da batimetria de 2013 com o estimado de 2019, nota-se que houve um assoreamento principalmente nos pontos mais profundos das sessões mais próximas ao início (entre as linhas 43 a 65) e ao final (entre as linhas 1 a 6) do reservatório; já nos pontos mais profundos das sessões intermediárias, houve um desassoreamento em alguns locais e em outros um assoreamento menos significativo que nas sessões iniciais e finais, assim como observado na quantificação do assoreamento realizada no ArcGIS.

Ao se comparar o perfil da batimetria de 2019 e o estimado para 2025 nota-se que eles apresentaram um comportamento um pouco parecido, com um assoreamento mais intenso nas sessões iniciais e finais e processos de sedimentação e desassoreamento de menor intensidade nas sessões intermediárias. Porém estes perfis não são plenamente similares, o que pode ser explicado pela falta de dados de vazão dos córregos que abastecem o lago em estudo e de vazão de sedimentos que são transportados para o lago, e as dimensões específicas dos bueiros de entrada e saída do reservatório e das estradas que passam sobre estes bueiros. Devido a esta ausência de informações, inseriram-se no programa dados que fossem próximos à realidade, o que podem ter ocasionado estas diferenças.

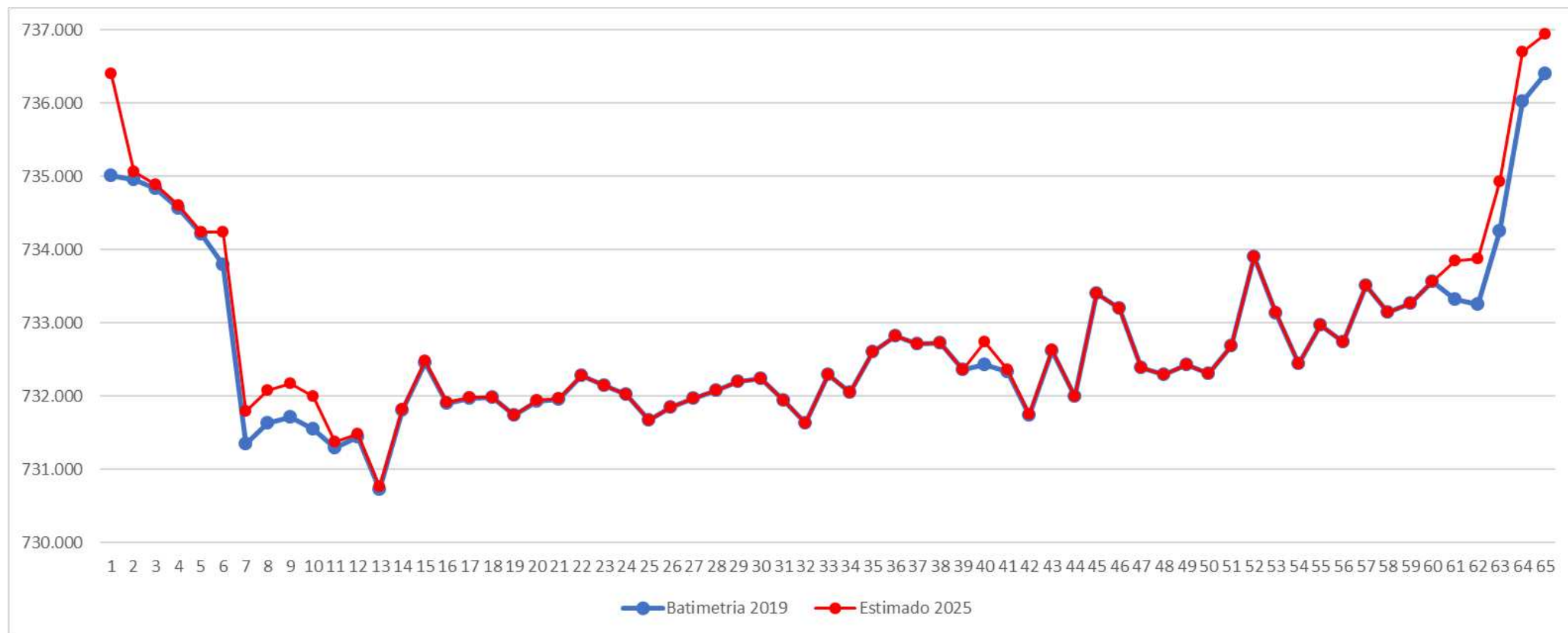
Observando-se o perfil estimado para 2025, percebe-se que ele apresentou resultados muito próximos à batimetria realizada em 2019, principalmente entre as sessões 13 a 60. Esta previsão manteve o padrão de assoreamento nas sessões iniciais e finais do reservatório e em poucas sessões intermediárias, contudo não apresentou processos de desassoreamento.

Figura 28 – Comparação entre as batimetrias de 2013 e 2019 e o resultado estimado para 2019



Fonte: A autora

Figura 29 – Comparação entre a batimetria de 2019 e o resultado estimado para 2025



Fonte: A autora

## 8 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos dos levantamentos batimétricos realizados em 2013 e 2019, percebe-se que ao longo desses últimos anos a segunda dos três lagos do rio Piumhi vem sofrendo um processo de entalhamento no seu leito e um assoreamento nas suas margens laterais. Este cenário torna-se mais crítico quando observada a projeção do assoreamento obtida no HEC-RAS, em que notou-se uma sedimentação principalmente nas primeiras e últimas sessões transversais do reservatório.

As plantas aquáticas, observadas principalmente nos pontos 4 e 5 de coleta de sedimento, podem causar um aumento de minerais depositados ao longo do leito quando apodrecerem, e conseqüentemente um aumento do assoreamento, além de alterarem as propriedades químicas da água dificultando e elevando os custos de tratamento.

Analisando-se os resultados granulométricos das amostras de sedimento coletadas e o mapa de uso e ocupação de solo da área de contribuição do lago, concluiu-se que o escoamento superficial exerce grande influência no assoreamento das margens da área de estudo, já que a quantidade de solos exposto aumentou consideravelmente no período, demonstrando a degradação ambiental do entorno da área de estudo. Assim, pôde-se inferir também que existe correlação entre a deposição de sedimentos ao longo do tempo e a distribuição de chuvas na região. A área de contribuição do reservatório estudado sofreu diversas mudanças ao longo dos anos que expuseram o solo à ação das chuvas e com isso, houve um aumento da quantidade de sedimentos transportados, o que explicaria o assoreamento na área. Este fato se intensifica ainda mais no período de chuvas mais intensas, já que a ocorrência de chuvas mais intensas em curtos períodos de tempo tem sido mais frequente, provavelmente às mudanças climáticas observadas em escala global. A persistir essa tendência, a situação de assoreamento pode se agravar no futuro.

Desta forma, vê-se a necessidade de se realizar uma dragagem no reservatório, principalmente entre as sessões 1 a 6 e 43 a 65, que foram os locais mais assoreados, visto que pequenos lagos apresentam um processo de assoreamento rápido e os elevados investimentos nestas obras seriam perdidos caso o lago fosse assoreado. Como a área urbana de Capitólio encontra-se entre as

sessões 43 a 65, este fato torna-se ainda mais agravante pois afeta além do volume acumulado, o paisagismo local. Contudo, para a realização da dragagem deve-se seguir as condições exigidas pela CONAMA 454. Visto que o sedimento do leito é uma mistura de pedregulho, areia, silte e argila, um bom beneficiamento para o material após ser dragado permitiria a sua utilização em parques e em áreas de recreação, já que Capitólio é uma cidade turística.

Pelas poucas amostras coletadas, pela ausência de análise de alguns parâmetros e por terem sido somente duas análises em anos distintos, não se pode afirmar sobre a classificação da qualidade da água neste lago. Contudo, pelos resultados obtidos nas análises, notou-se que o lago do rio Piumhi apresentou alguns índices que não seriam classificados como classe 2 de água doce como o fósforo, oxigênio dissolvido e Coliformes Totais. Estas determinações indicam que o dejetos sanitário sem tratamento no lago pode ter grande influência neste resultado. Para resultados mais confiáveis, recomenda-se a realização frequente destas análises em mais pontos do reservatório e que as mesmas sejam realizadas logo após a coleta.

Além disso, sugere-se a criação de um banco de dados contendo informações referentes à batimetria; às vazões de entrada e saída dos córregos que abastecem o reservatório; à vazão de entrada de sedimentos; à precipitação no município (volume total e como é distribuído ao longo do dia); ao uso e ocupação do solo na área de contribuição do reservatório, atentando-se principalmente às APPs; e aos dados de granulometria dos sedimentos assoreados. A atualização deste banco de dados é de extrema importância, uma vez que esta é uma medida preventiva que visa analisar a taxa anual de deposição de sedimentos, de maneira a subsidiar a adoção de medidas preventivas quanto à erosão e assoreamento, evitando assim gastos futuros com a sua remoção. É aconselhada também a instalação de uma régua limnimétrica e um marco de referência de nível para tornar os levantamentos batimétricos mais precisos e padronizados.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ALMEIDA, M. A. B.; SCHWARZBOLD, A. Avaliação sazonal da qualidade das águas do Arroio da Cria Montenegro, RS com aplicação de um índice de qualidade de água (IQA). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.1, p.81-97, jan./mar. 2003. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/155e/6124b0ceba6975e488a23ae230a2106d47c1.pdf>. Acesso em: 5 set. 2019.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no Brasil**. Brasília, DF: ANA, 2005. 175p.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Índice de qualidades das águas**. Portal da qualidade das águas. Brasília, DF: ANA, 2009. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/IndicadoresQA/IndiceQA.aspx> Acesso em: 25 nov. 2019.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Manual Básico HEC-RAS 5.0.3.**: Ruptura de Barragem. Brasília, DF: ANA, 2018. 129p.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Brasília, DF: ANA, SGH, 2013. 40 p.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em: (<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>). Acesso em: 15 out. 2017.
- ALVARES, C. A. *et al.* **Koppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, jan. 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507. Disponível em: [http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/Alvares\\_etal\\_2014.pdf](http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/Alvares_etal_2014.pdf). Acesso em: 6 out. 2017.
- APHA - American Public Health Association, AWWA - American Water Works Association, WEF- Water Environment Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington: APHA, AWWA, WEF, 2012.
- Assessing the Accuracy of Image Classification in ArcMap. Produção de Sierra Laddusaw. College Station, Texas: Texas A&M University Libraries. 19 min. Disponível em: <http://tamu.libguides.com/gis/tutorials>. Acesso em: 06 nov. 2019

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. **Consulta Informativa - Impactos ambientais relevantes nas bacias dos rios Grande e São Francisco em Minas Gerais Transposição do rio Piumhi da bacia do rio Grande para a bacia do São Francisco.** Disponível em:

[http://www.atlasdasaguas.ufv.br/grande/impactos\\_ambientais\\_relevantes\\_nas\\_bacias\\_dos\\_rios\\_grande\\_e\\_sao\\_francisco\\_em\\_minas\\_gerais.html](http://www.atlasdasaguas.ufv.br/grande/impactos_ambientais_relevantes_nas_bacias_dos_rios_grande_e_sao_francisco_em_minas_gerais.html). Acessado em: 7 nov. 2017.

BARBOSA, A. M. **Subsídios para o planejamento em ecoturismo na região do médio Rio Grande, Minas Gerais, utilizando geoprocessamento e sensoriamento remoto.** 2004. 249 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2003/12.03.10.46/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2017.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** São Paulo: Ícone, 1995. 355 p.

BIFULCO, C. *et al.* **A engenharia natural no talude do Nó de Malveira na A21 um ano depois da sua renovação. Questões operacionais, resultados e sucessos.** In: CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, 8., 2016, Lisboa, Portugal.

BRANDT, S. A. **Classification of Geomorphological effects downstream of dams.** CATENA, v. 40, Issue 4, 2000. p. 375-401.

BRITO, G. M. **Determinação do Assoreamento do Reservatório da PCH Cachoeirão.** 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3813/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 jul. 2017.

BRUNNER, G. W. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual, U.S. Army Corps of Engineers. Davis-CA, p. 547, 2016.

CAMPANA, K. D. S. Simulação do transporte de sedimentos em trecho do Rio Doce (ES) utilizando modelagem computacional. 2018. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/jspui/handle/10/10991>. Acesso em: 5 mar. 2020.

CARMO, E. J. **Avaliação dos Interpoladores Krigagem e Topo to Raster na Geração de Modelos Digitais de Elevação a Partir de Dados Batimétricos.** 2014. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em:

<https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3813/texto%20completo.pdf?squence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 jul. 2017..

CARVALHO, N. O. *et al.* **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, Brasília – DF, 2000, 107 p.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 2003**. São Paulo: CETESB, 2004. 264p. Disponível em: ([http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao\\_urbanismo\\_e\\_meio\\_ambiente/biblioteca\\_virtual/bv\\_informativos\\_tecnicos/Relat%C3%B3rio%20Anual.pdf](http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/biblioteca_virtual/bv_informativos_tecnicos/Relat%C3%B3rio%20Anual.pdf)). Acessado em: 2 nov. 2017.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Variáveis de qualidade de água. São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/variaveis.asp#transparencia>>. Acesso em: 19 dez. 2019.

CHAVES, P. *et al.* (2008). Modelagem hidrossedimentológica com o modelo HEC-RAS 4.0: Caso de estudo do rio Macaé. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS (ENES), 8., 2008. **Anais** [...] Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2008. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/portal-repositorio/File/labhidromec/Uso%20de%20modelo%20numerico%20para%20simulacao%20de%20assoreamento%20em%20reservatorio.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2020.

CHIEN, N., & WAN, Z. **Mechanics of Sediment Transport**. 1999. doi:10.1061/9780784404003

CMB MINERAÇÃO E MEIO AMBIENTE (2007). Monitoramento Ambiental Ecovillas do Lago. Disponível em: <http://www.cmbconsultoria.com.br/servicos/monitoramento/ecovillas/>. Acesso em: 20 mar. 2020.

COELHO, A. L. N. **Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens**. Caminhos de Geografia Uberlândia, v. 9, n. 26 Jun/2008, 16 p. 32 p.

COELHO, C.A.S., CARDOSO, D.H.F. & FIRPO, M.A.F. (2016). A seca de 2013 a 2015 na região sudeste do Brasil. *Revista Climanalyse*, 55-66.

COHEN, J.A. Coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20:37-46, 1960.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras

providências. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União** n. 053, de 10 de janeiro de 2013, p. 61. Disponível em: (<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>). Acesso em: 30 out. 2017.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n. 454, de 1º de novembro de 2012**. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=693>. Acesso em: 19 dez. 2017.

COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Resposta a solicitação (19/010721). Destinatário: a autora. Belo Horizonte, 7 out. 2019. 1 mensagem eletrônica.

CORTEZ, J. R. **Desempenho de Modelos Numéricos em Estudos de Assoreamento de Reservatórios – Caso UHE Aimorés**. 2013. 110 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/846M.PDF>. Acesso em: 5 mar. 2020.

DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos – SP**. 2012. 176 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-30082012-111216/publico/DissertDecinaThiagoGTCorrig.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2020.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 4 ed. Brasília: Embrapa, 2014.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Parameters of Water Quality (Interpretation and Standars)**. Wexford: Environmental Protection Agency, 2001. 132p. Disponível em: ([https://www.epa.ie/pubs/advice/water/quality/Water\\_Quality.pdf](https://www.epa.ie/pubs/advice/water/quality/Water_Quality.pdf)). Acessado em: 5 nov. 2017.

ESTEVEZ, Francisco de Assis. Fundamentos de limnologia. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 826 p.

ESTIGONI, M. V. **Influência da Quantidade e Disposição de Dados na Modelação de Terrenos Aplicada a Batimetria de Reservatórios. Estudos de Caso: UHE Três Irmãos – SP e UHE Chavantes – SP**. 2012, 124 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-29032012-111131/publico/DissertacaoMarcusViniciusEstigoni.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2019.

FERREIRA, Í. O.; SANTOS, G. R. RODRIGUES, D. D. **Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas**. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, v. 65, n.5, p. 831-842, 2013

FERREIRA, Í. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R. **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos**. 1ª ed. Saarbrucken: Novas Edições Acadêmicas, v. 1, 2015, 100

FUNASA - FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAs**. Brasília: Ministério da Saúde, 2014. 112p.

GIRARDI, R. *et al.* **Water quality change of rivers during rainy events in a watershed with different land uses in Southern Brazil**. RBRH, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 514-524, Sept. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011615179>>. Acesso em: 28 dez 2019.

HÅKANSON, L. **The influence of wind, fetch, and water depth on the distribution of sediments in Lake Vänern, Sweden**. Canadian Journal of Earth Sciences, v. 14, n. 3, p. 397–412, 1977. Disponível em: <http://dx.doi:10.1139/e77-040>. Acesso em: 20 dez 2019.

HERNANI, L.C. *et al.* **A erosão e seu impacto**. p.47-60. In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J.R.R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 174p. 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Downloads Geociências. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 3 ago. 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Perfil dos municípios brasileiros: **Saneamento básico: Aspectos gerais da gestão da política de saneamento básico: 2017 / IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais**. - Rio de Janeiro: IBGE, 2018. E-book (39 p.). ISBN 978-85-240-4467-0. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101610.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.

IHO – International Hydrographic Organization. C-13: **IHO Manual on Hydrography**. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2005, 540 p.

IHO – International Hydrographic Organization. **Standards for Hydrographic Surveys**. 5. ed. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2008, 28 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). **Climate change 2014: Synthesis report**, IPCC, Geneva, Switzerland.

KONDOLF, G.M. *et al.* **Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents**. *Earth's Future*, 2, p. 256–280, 2014.

LANG, S.; LADSON, T.; ANDERSON B. **A Review of Empirical Equations for Estimating Stream Roughness and their Application to Four Streams in Victoria**. *Australian Journal of Water Resources*, 8(1): 69–82, 2004. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/259583857>>. Acesso em: 16 nov. 2019.

LAURA, M., TARTARI, G., SALERNO, F., VALSECCHI, L., BRAVI, C., LORENZI, E., GENONI, P. & GUZZELLA, L. (2017). **Climate change impacts on sediment quality of subalpine reservoirs: implications on management**. *Water*, 9, 680.

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo. 2.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 1984. 46p.**

LIMA, H. M. **Introdução à Modelação Ambiental: Erosão Hídrica**. Funchal (Portugal), 2010.

LÔNDERO, E. *et al.* **Análise da Condutividade Elétrica das Águas dos Rios Bugres e Paraguai**. In: Higienistas. Sovergs. Disponível em: <http://www.sovergs.com.br/site/higienistas/trabalhos/10474.pdf>. Acessado em: 3 nov. 2017.

MAGALHÃES, R. A. **Processos Erosivos e Métodos de Contenção CEEB**. Ouro Preto: CEEB, 1995.

MAHMOOD, K. **Reservoir Sedimentation**. Washington D.C: The World Bank, 1987. 71p.

MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed Images: an introduction**. 2. ed. London: John Wiley & Sons, 292 p., 1999.

MATOS, A. J. S. **Melhorias Qualitativas na Modelagem de Levantamentos Batimétricos em Reservatórios por Meio da Ferramenta Computacional “CAV-NH”**. Universidade de São Paulo, 2012, 125 p. Tese (Doutorado em Ciências da engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-25102012-104425/publico/TeseArturJoseSoaresMatos.pdf>. Acesso em: 15 set. 2019.

MARTINI, L. **Topografia Aplicada aos Levantamentos Hidrográficos**. Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná. 2007. 19p.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano**. Brasília: Ministério da Saúde. 2006.

MMA - Ministério do Meio Ambiente (2011) **Áreas de Preservação Permanente e Unidades de Conservação x Áreas de Risco**, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, Brazil.

MOREIRA FILHO, O; BUCKUP, P. A. **A poorly known case of watershed transposition between the São Francisco and upper Paraná river basins**. Neotropical Ichthyology, 3(3):449-452, 2005.

MORGAN, R. P. C. (1986). **Soil erosion and conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell, 2005. 304 p.

NAKAO, L. T. H. **Análise dos Métodos de Posicionamento e dos Parâmetros Definidores da Qualidade do Levantamento Batimétrico Realizado no Reservatório de Capivari-Cachoeira**. 2015, 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/41124/R%20-%20D%20-%20LAIS%20THIE%20HASUDA%20NAKAO.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Acesso em: 10 jul. 2017.

NICKLOW, J. W.; MAYS, L. W. **Optimization of multiple reservoir networks for sedimentation control**. Journal of Hydraulic Engineering, v.126, n.4, pp 21-33, 2000.

NOGUEIRA, J. D. L.; AMARAL, R. F. Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros – RN. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais** [...] São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2009. Disponível em: <http://martes.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.22/doc/4117-4123.pdf>. Acesso em: 5 out. 2019.

NORMAM-25/DHN de 2011. **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos**. Marinha do Brasil: Diretoria de Hidrografia e Navegação. Revisão 2014.

NUGRAHA, W.; PARAPAT, A. D.; ARUM, D. S.; ISTIGHFARINI, F. **GNSS RTK Application to Determine Coastline Case Study at Northern Area of Sulawesi and Gorontalo**. E3S Web of Conferences 94, 01016 (2019). Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199401016>>. Acesso em: 20 dez 2019.

PEPPER, A.T. and RICKARD, C.E. 2009 **Fluvial Design Guide**. Bristol: Environment Agency. Chapter 8.

PEREIRA LCC, MONTEIRO MC, GUIMARÃES DO, MATOS JB, COSTA RM. **Seasonal effects of wastewater to the water quality of Caeté River estuary, Brazilian, Amazon**. An. Acad. Bras. Ciênc. 2010;82(2):467-478

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. (2003). **Escoamento Superficial**. 2. Ed. Viçosa: UFV, 2011. 87 p.

RAMOS, A. M. **Aplicação, Investigação e Análise da Metodologia de Reduções Batimétricas Através do Método GPS Diferencial Preciso**. 2007. 204 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: [https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/10982/Disserta%  
\\_Alexandre\\_Ramos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/10982/Disserta%c3%a7%c3%a3o_Alexandre_Ramos.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 3 ago. 2017.

REINECK, H. -E.; SINGH, I. B. (1973). **Depositional Sedimentary Environments**. 2. Ed. Berlim: Springer-Verlag, 1980. 549 p.

RIBEIRO E. A.; SANDRI D.; BOÊNO J. A. **Qualidade da água de córrego em função do lançamento de efluente de abate de bovino**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 17(4): 425–433, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v17n4/a11v17n4.pdf>. Acesso em: 5 out. 2019.

ROMAN, V. **Análise do Equilíbrio Morfológico em Rios Regularizados: Modelagem Matemática Unidimensional do Transporte de Sedimentos no Rio São Francisco**. 2004. 108 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: [http://www.smarh.eng.ufmg.br/diss\\_defesas\\_detalhes.php?aluno=146](http://www.smarh.eng.ufmg.br/diss_defesas_detalhes.php?aluno=146). Acesso em: 15 out. 2019.

SANCHES, F.O., FIALHO, E.S. & QUINA, R.R. (2017). **Evidências de mudanças climáticas em Viçosa (MG)**. Revista do Departamento de Geografia USP, 34,122-136. Portuguese.

SILVA, A. R. *et al.* Extração da cobertura vegetal de áreas urbanas utilizando imagens do satélite GeoEye-1. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais** [...] São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2011. Disponível em: <http://martem.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.04.17.50/doc/p1432.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2019.

SILVA, L. T. B. *et al.* Uso de modelo numérico para simulação de assoreamento em reservatório. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais** [...] Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019. Disponível em: [https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/labhidromec/Artigo\\_XXIII%20SBRH\\_UHE%20Aimores.pdf](https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/labhidromec/Artigo_XXIII%20SBRH_UHE%20Aimores.pdf). Acesso em: 4 mar. 2020.

SIMÕES, I. C. V. P. 2007, 122p. **Aplicação da Batimetria Multifeixe para Definição da Morfologia Detalhada do Fundo Marinho ao Largo da Laguna de Araruama e Arraial do Cabo RJ**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

STORY, M. & CONGALTON, R. G. Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 52, No.3, March 1986, pp. 397-399. [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1986journal/mar/1986\\_mar\\_397-399.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1986journal/mar/1986_mar_397-399.pdf)

STROHSCHOEN, A. A. G. *et al.* **Estudo preliminar da qualidade da água dos rios Forqueta e Forquetinha, Rio Grande do Sul**. Revista Brasileira de Biociências, 7(4): 372-375, 2009. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/viewFile/1227/892>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

UFRGS-IPH – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. **Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros**. Rio de Janeiro : ELETROBRÁS, 1992, 99p.

USACE - United States Army Corps of Engineers. **Dredging and Dredged Material Management**. Washington, DC: Department of the Army, 2015. Disponível em: ([http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM\\_1110-2-5025.pdf](http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-5025.pdf)). Acessado em: 30 out. 2017.

U.S. EPA - United States environmental protection agency; USACE - United States Army Corps of Engineers. **Identifying, Planning, and Financing Beneficial Use Projects Using Dredged Material (Beneficial Use Planning Manual)**. Washington, DC: Department of the Army, 2007. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/identifying\\_planning\\_and\\_financing\\_beneficial\\_use\\_projects.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/identifying_planning_and_financing_beneficial_use_projects.pdf). Acessado em: 5 out. 2017.

VALE, V. L. **Reconstituição da calha natural do reservatório da PCH Salto do Paraopeba**. 2014. 66f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-AV3KS2/1/reconstitui\\_o\\_da\\_calha\\_natural\\_do\\_reservat\\_rio\\_da\\_pch\\_salto\\_do\\_paraopeba\\_final\\_\\_\\_\\_revis\\_o\\_2017.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-AV3KS2/1/reconstitui_o_da_calha_natural_do_reservat_rio_da_pch_salto_do_paraopeba_final____revis_o_2017.pdf). Acesso em: 5 mar. 2020.

VALE, V. L. *et al.* Aplicação das equações de equilíbrio morfológico de Julien ao trecho fluvial do reservatório da PCH Salto Paraopeba. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais** [...]. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3171>. Acesso em: 4 mar. 2020.

VALENT, P.; VÝLETA, R.; DANÁČOVÁ, M. **A Joint Sedimentation-Flood Retention Assessment of a Small Water Reservoir in Slovakia: A New Hope for Old Reservoirs?**. *Geosciences*, 9(4), 2019.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; YONG L. **Gully erosion: impacts, factors and control**. *CATENA*, v. 63, 2005. p. 132-153.

VIEIRA, H. B. G.; FLOR, C. D. R. V.; ZALOTI JUNIOR, O. D. Avaliação da qualidade de informações batimétricas recuperadas de sísmica rasa em áreas de assentamento de plataformas autoelevatórias. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 17., 2015, João Pessoa. Anais [...] INPE, 2015. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2015. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0845.pdf>. Acesso em: 7 out. 2017.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de esgoto**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 1998.

VON SPERLING, M. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias**. 3.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 452p

WEBB, B. W., WALLING, D. E. **Long-term variability in the thermal impact of river impoundment and regulation**. *Appl. Geogr.* 1996, 211 p. –223 p.

WETZEL, R. G. **Limnology**. San Diego: Academic Press, 2001. 1006 p.

## APÊNDICE A - PROGRAMA PARA UNIÃO DOS DADOS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS

```
# Data do levantamento
```

```
ano = 2019
```

```
mes = 8
```

```
dia = 17
```

```
# Nome do arquivo .ODC
```

```
odc_filename = '20190817135706.odc'
```

```
# Diretorio dos arquivos .RAW
```

```
raw_dir = 'Raw'
```

```
# Importa bibliotecas necessarias
```

```
from glob import glob
```

```
from datetime import datetime, timedelta
```

```
## Leitura do arquivo .ODC
```

```
print('Leitura do arquivo .ODC')
```

```
odc_data = []
```

```
with open(odc_filename,'rb') as odc_file:
```

```
odc_lines = odc_file.readlines()

odc_iter = iter(odc_lines)

while True:

    line = next(odc_iter,False)

    if line:

        try:

            dataline = line[:35].decode('ascii').split(',')

        except:

            continue

        if dataline[1] == '111':                # verifica as mensagens do tipo 111

            depth = float(dataline[4]) / 100.0    # Transforma para metro considerando
            que no arquivo .odc os valores estao em centimetros

            freq = dataline[3]

            if depth:                            # Verifica se a profundidade é diferente de zero

                line = next(odc_iter,False)
```

```
if line:

    try:

        dataline = line[:35].decode('ascii').split(',')

    except:

        continue

    if dataline[1] == '151':

        time = datetime.strptime(dataline[2]+' '+dataline[3], '%m/%d/%y
%H:%M:%S.%f')

        odc_data.append((time, depth, freq))

    else:

        break

else:

    break

print('Leitura finalizada')

## Leitura dos arquivos .RAW

print('Leitura dos arquivos .RAW')

raw_data = []
```

```
# Busca por todos os arquivos .RAW na pasta indicada
```

```
raw_files = glob('./{}/*.RAW'.format(raw_dir))
```

```
for raw_file_name in raw_files:
```

```
    with open(raw_file_name,'r') as raw_file:
```

```
        raw_lines = raw_file.readlines()
```

```
        raw_iter = iter(raw_lines)
```

```
        while True:
```

```
            line = next(raw_iter,False)
```

```
            dataline = []
```

```
            coord_E = 0
```

```
            coord_N = 0
```

```
            if line:
```

```
                if line[:3] == 'POS':
```

```
                    dataline = line.split()
```

```
timestamp = dataline[2]

coord_E = dataline[3]

coord_N = dataline[4]

line = next(raw_iter,False)

line = next(raw_iter,False)

if line:

    dataline = line.split()

    if dataline[0] == 'RAW' and dataline[2] == timestamp:

        time = dataline[-1]

        hora = int(time[:2]) - 3          # UTC para hora local

        min = int(time[2:4])

        sec = int(time[4:6])

        coord_time =

datetime(year=ano,month=mes,day=dia,hour=hora,minute=min,second=sec)

        raw_data.append((coord_time,coord_E,coord_N))

else:

    break
```

```
print('Leitura finalizada')

# ordena a lista de coordenadas pela data
raw_data.sort(key=lambda x: x[0])

## Uniao dos dados

print('Uniao dos dados')

dados_hf = []
dados_lf = []

# Cria uma lista auxiliar para os indices das datas.
# Finalidade de reduzir o tempo de processamento
auxx = []
d = len(raw_data)
for i in range(0,d):
    auxx.append(raw_data[i][0])

for odc_line in odc_data:

    time_floor = datetime.strptime(odc_line[0].strftime('%m/%d/%y
%H:%M:%S'),'m/%d/%y %H:%M:%S')

    time_ceiling = time_floor + timedelta(seconds=1)
```

```
try:
    i = auxx.index(time_floor)

    if time_floor == raw_data[i][0]:

        try:
            aux = raw_data[i+1][0]
        except:
            print(str(odc_line[0]) + ' LOST DATA')
            break

        if time_ceiling == aux:

            print(str(odc_line[0]))

            #Interpolacao linear proporcional aos microsegundos
            microsec = float(odc_line[0].microsecond) / 1000000.0
            coord_E = float(raw_data[i][1]) + ( float(raw_data[i][1]) -
float(raw_data[i+1][1]) ) * microsec

            coord_N = float(raw_data[i][2]) + ( float(raw_data[i][2]) -
float(raw_data[i+1][2]) ) * microsec

            if odc_line[2] == '1':
                dados_If.append((coord_E,coord_N,odc_line[1]))
```

```
elif odc_line[2] == '2':  
    dados_hf.append((coord_E,coord_N,odc_line[1]))  
  
else:  
    print(str(odc_line[0]) + ' LOST DATA')  
  
else:  
    print(str(odc_line[0]) + ' LOST DATA')  
  
except:  
    print(str(odc_line[0]) + ' LOST DATA')  
  
# Escrita do resultado em arquivo de texto  
# Arquivos separados por alta(HF) e baixa(LF) frequencia  
with open('resultado_lf.txt','w') as wfile:  
    for dado in dados_lf:  
        wfile.write('{:.3f}\t{:.3f}\t{:.3f}\n'.format(*dado))  
  
with open('resultado_hf.txt','w') as wfile:  
    for dado in dados_hf:  
        wfile.write('{:.3f}\t{:.3f}\t{:.3f}\n'.format(*dado))
```

## APÊNDICE B – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTOS

Tabela 16 – Resultado da caracterização das amostras de sedimentos da primeira coleta

1ª Coleta					
Ponto	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Distribuição Granulométrica ( % )			
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho
1A	2.673	17	23	39	21
1B	2.687	17	16	67	0
1C	2.687	21	19	51	9
2A	2.609	30	45	11	14
2B	2.652	15	35	50	0
2C	2.571	20	48	32	0
3A	2.779	28	40	32	0
3B	2.692	21	29	31	19
3C	Não possui dados				
4A	2.288	16	40	31	13
4B	2.61	4	26	70	0
4C	2.603	3	10	85	2
5A	2.545	37	45	18	0
5B	Não possui dados				
5C	Não possui dados				
6A	2.493	21	35	44	0
6B	2.469	25	35	40	0
6C	2.373	28	36	36	0

Fonte: A autora

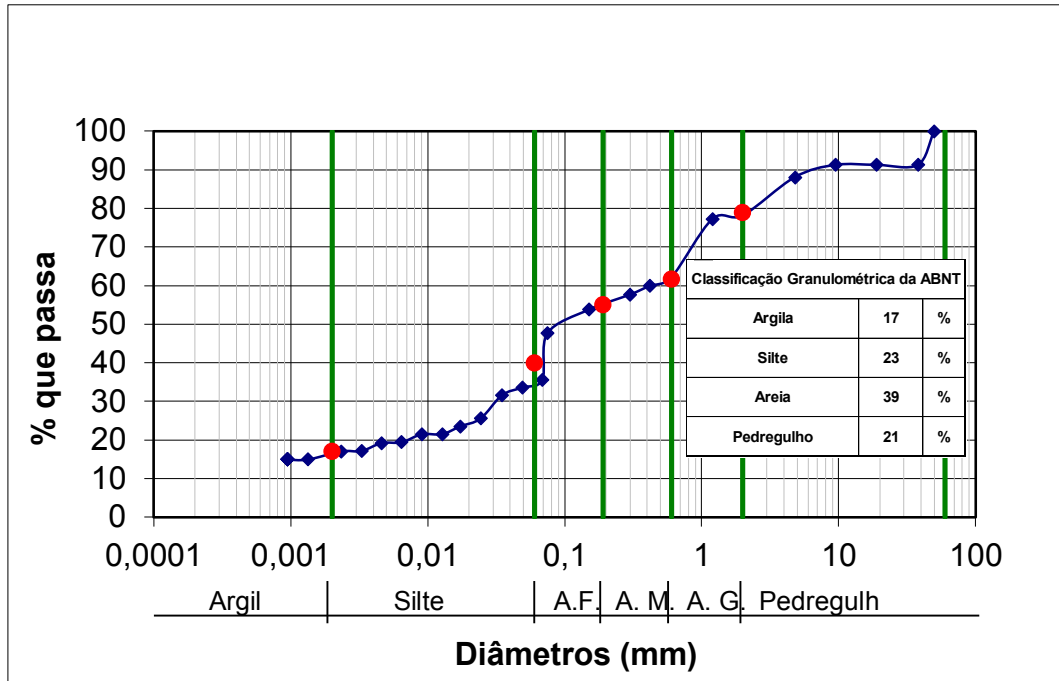
Tabela 17 – Resultado da caracterização das amostras de sedimentos da segunda coleta

2ª Coleta					
Ponto	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Distribuição Granulométrica ( % )			
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho
1A	2.656	9	19	72	0
1B	2.789	11	20	66	3
1C	2.74	10	54	36	0
2A	2.731	10	52	38	0
2B	2.751	16	51	33	0
2C	2.736	11	53	36	0
3	2.798	3	31	56	10
4	2.585	36	48	16	0
5	2.667	12	32	56	0
6	2.768	30	43	27	0

Fonte: A autora

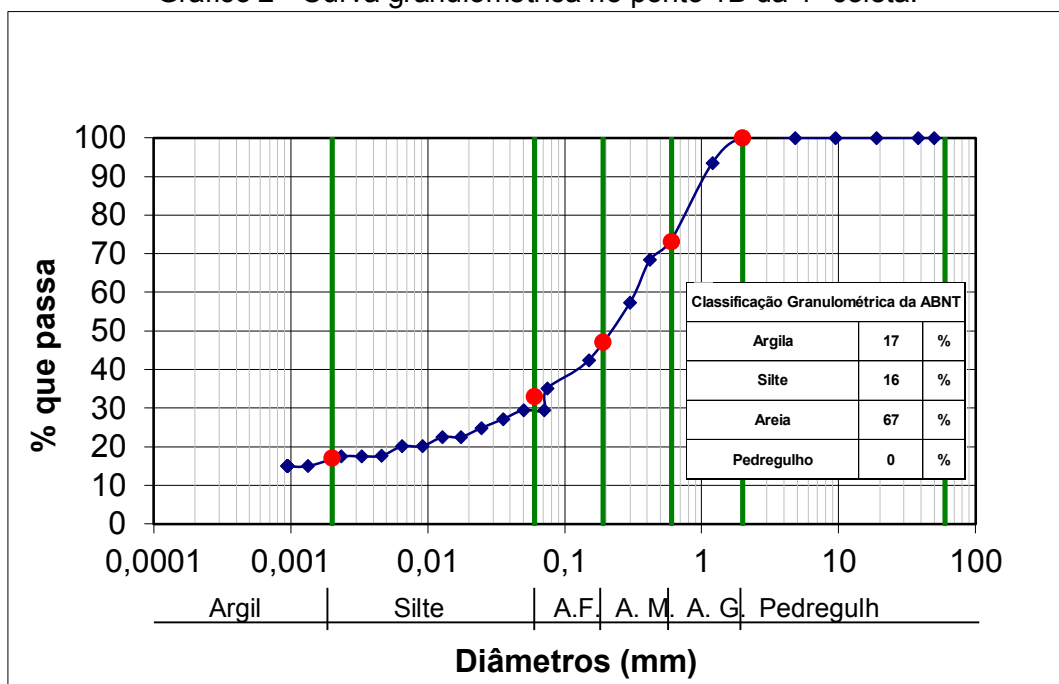
## APÊNDICE C – CURVAS GRANULOMÉTRICAS

Gráfico 1 - Curva granulométrica no ponto 1A da 1ª coleta.



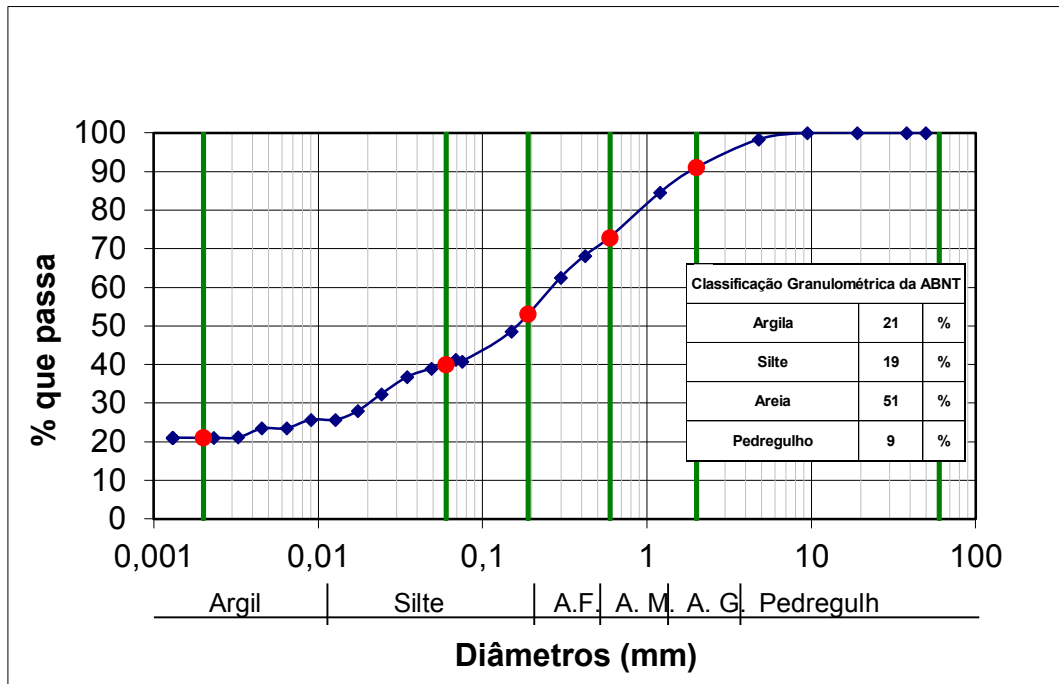
Fonte: A autora

Gráfico 2 - Curva granulométrica no ponto 1B da 1ª coleta.



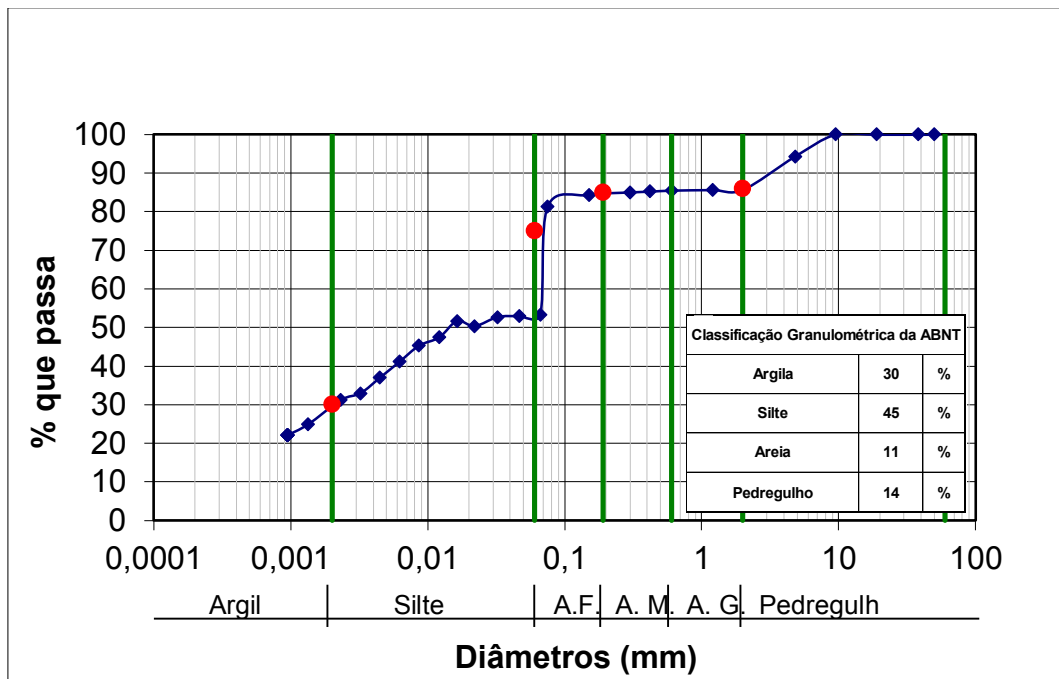
Fonte: A autora

Gráfico 3 - Curva granulométrica no ponto 1C da 1ª coleta.



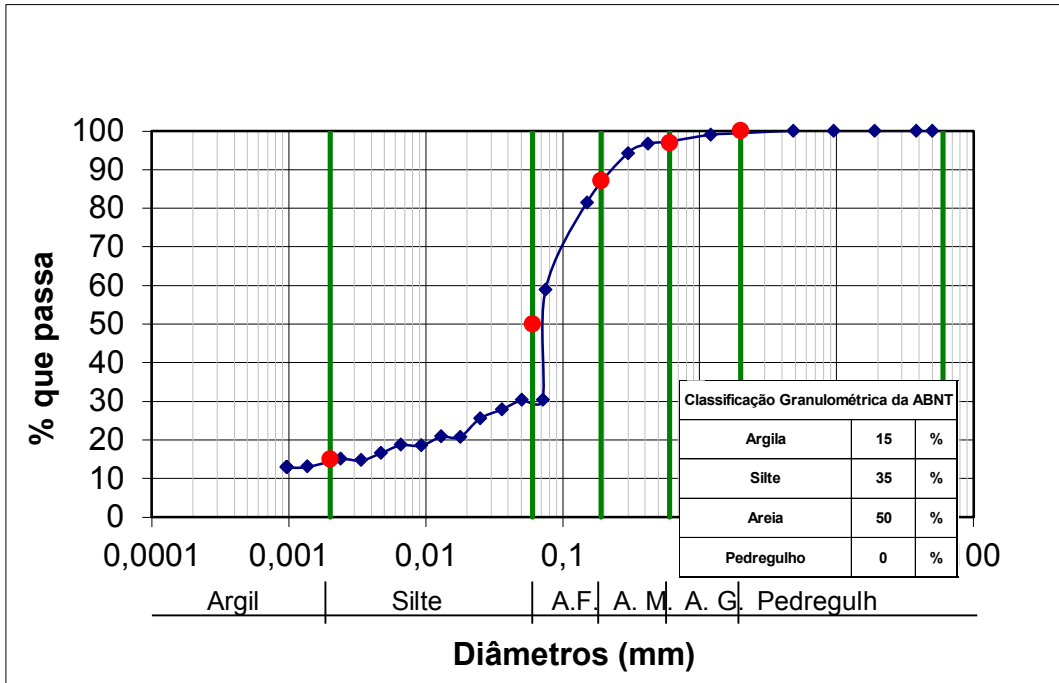
Fonte: A autora

Gráfico 4 - Curva granulométrica no ponto 2A da 1ª coleta.



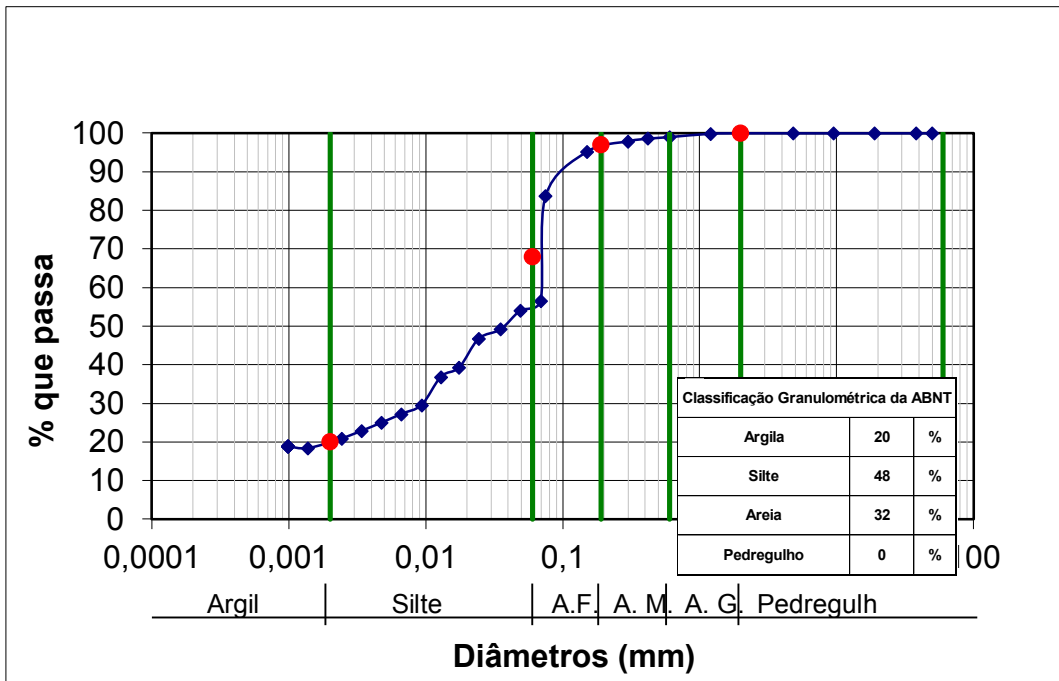
Fonte: A autora

Gráfico 5 - Curva granulométrica no ponto 2B da 1ª coleta.



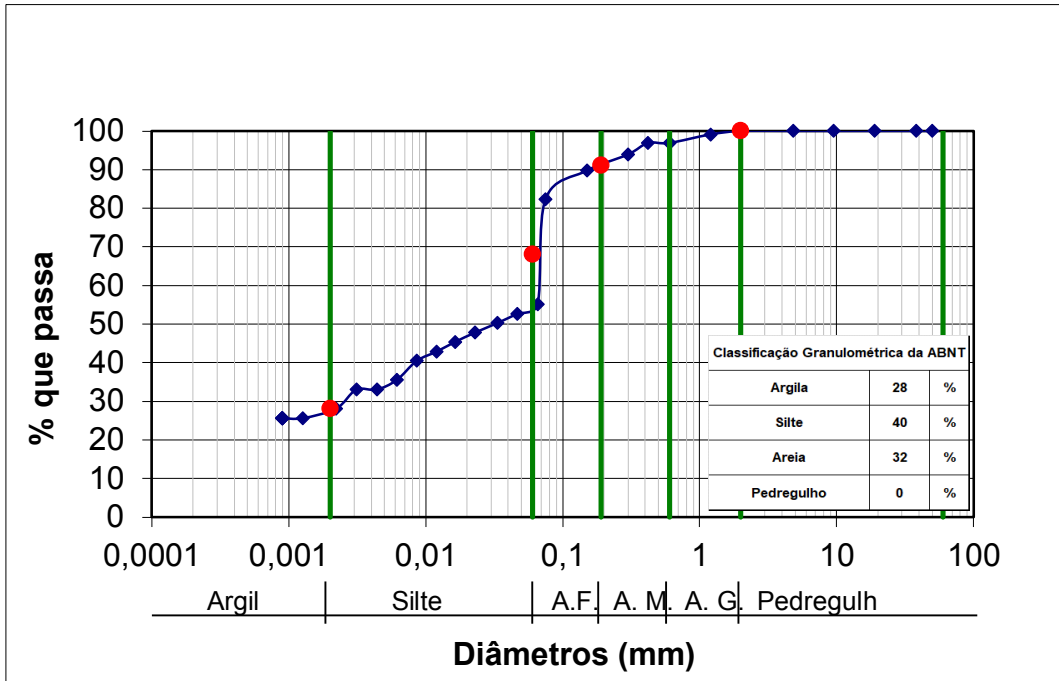
Fonte: A autora

Gráfico 6 - Curva granulométrica no ponto 2C da 1ª coleta.



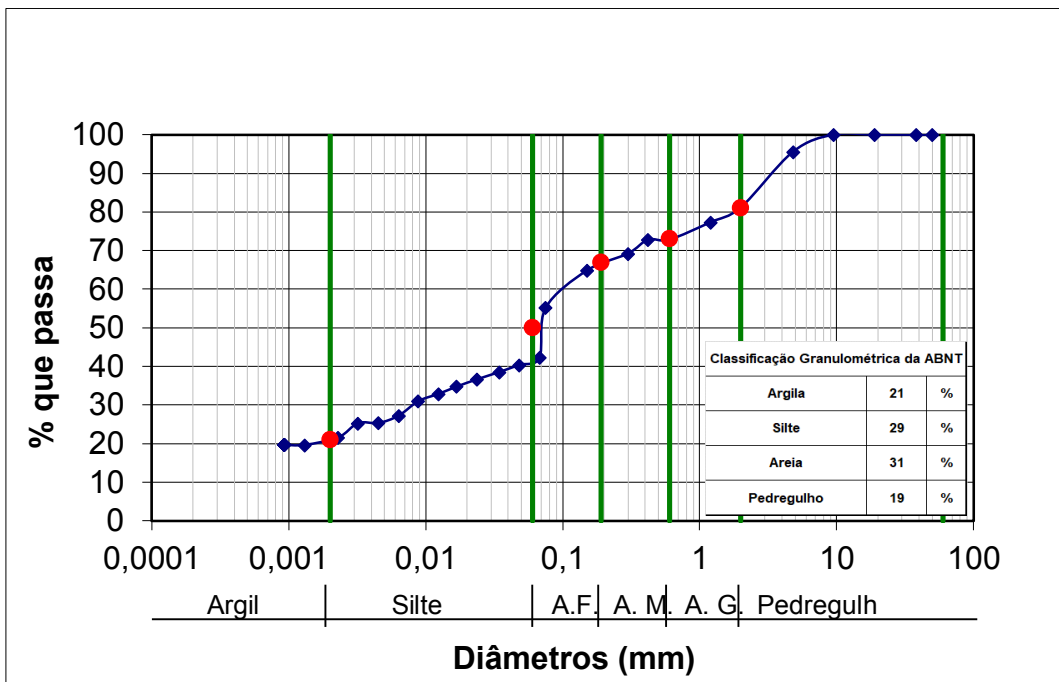
Fonte: A autora

Gráfico 7 - Curva granulométrica no ponto 3A da 1ª coleta.



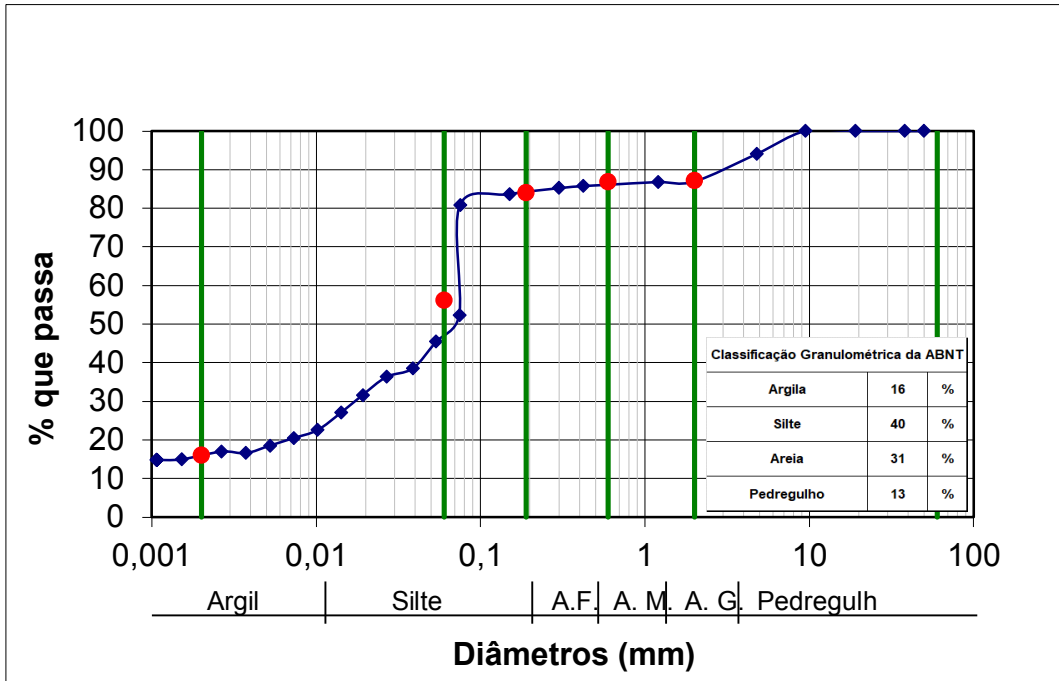
Fonte: A autora

Gráfico 8 - Curva granulométrica no ponto 3B da 1ª coleta.



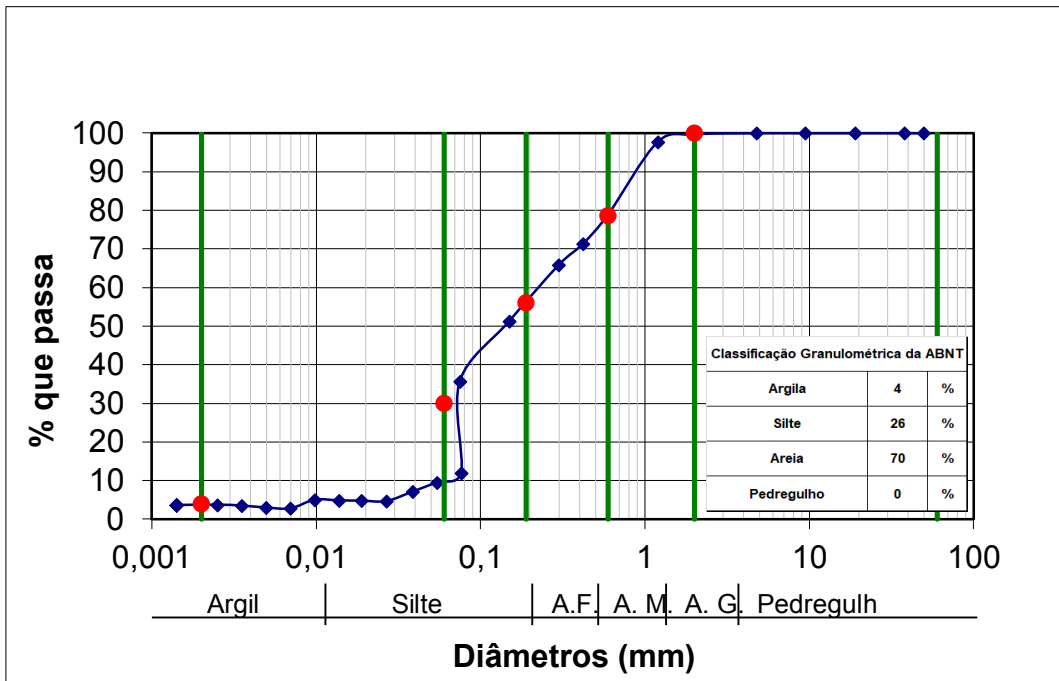
Fonte: A autora

Gráfico 9 - Curva granulométrica no ponto 4A da 1ª coleta.



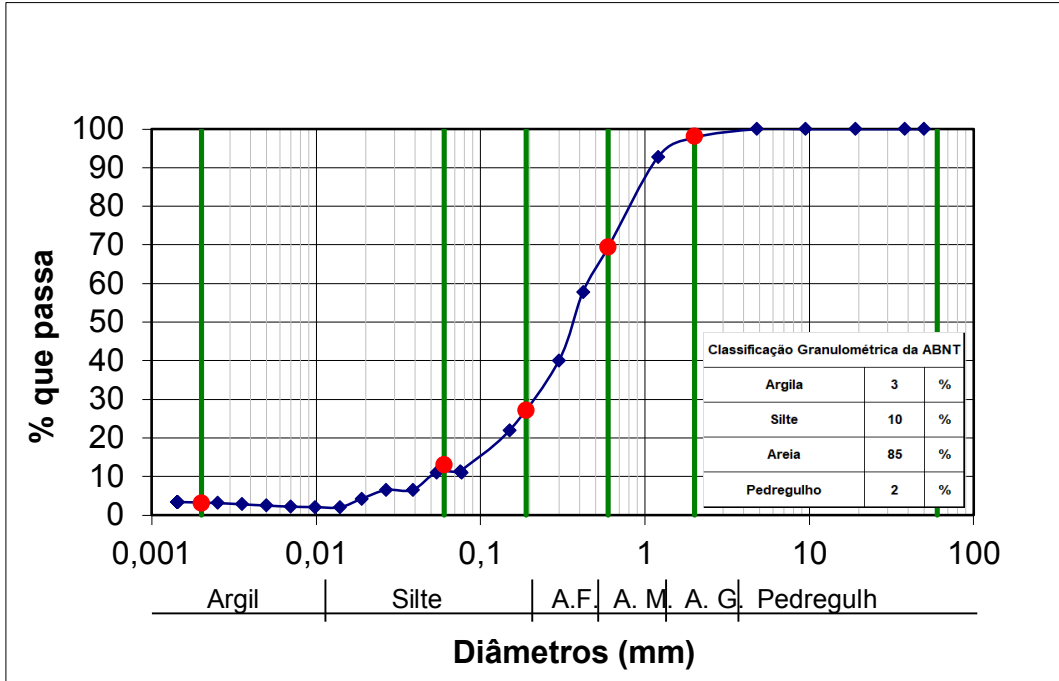
Fonte: A autora

Gráfico 10 - Curva granulométrica no ponto 4B da 1ª coleta.



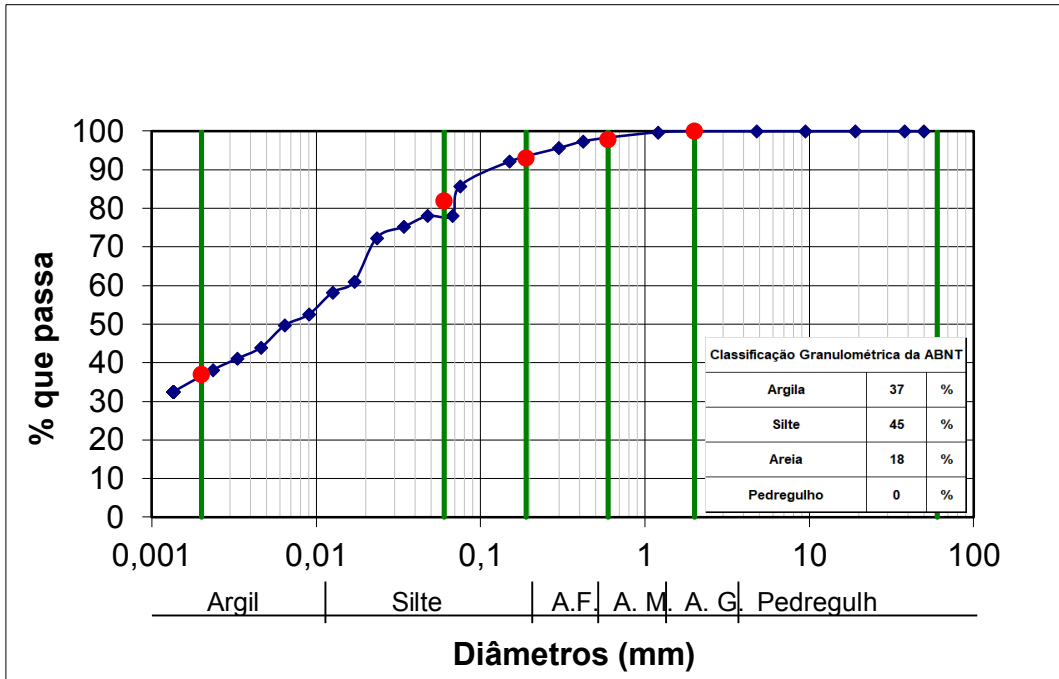
Fonte: A autora

Gráfico 11 - Curva granulométrica no ponto 4C da 1ª coleta.



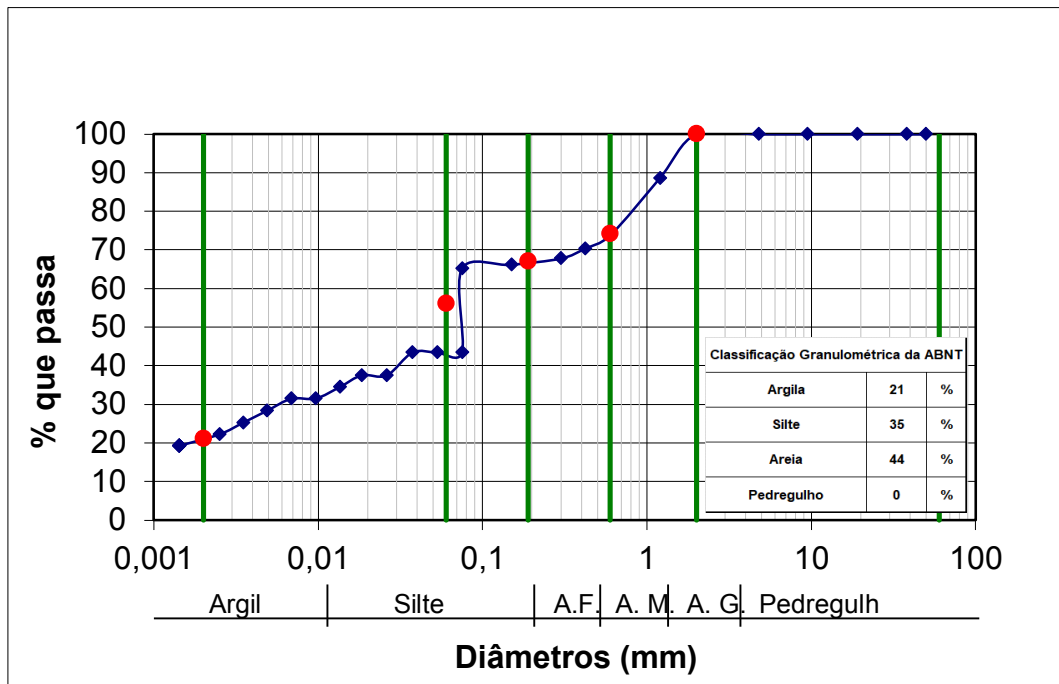
Fonte: A autora

Gráfico 12 - Curva granulométrica no ponto 5A da 1ª coleta.



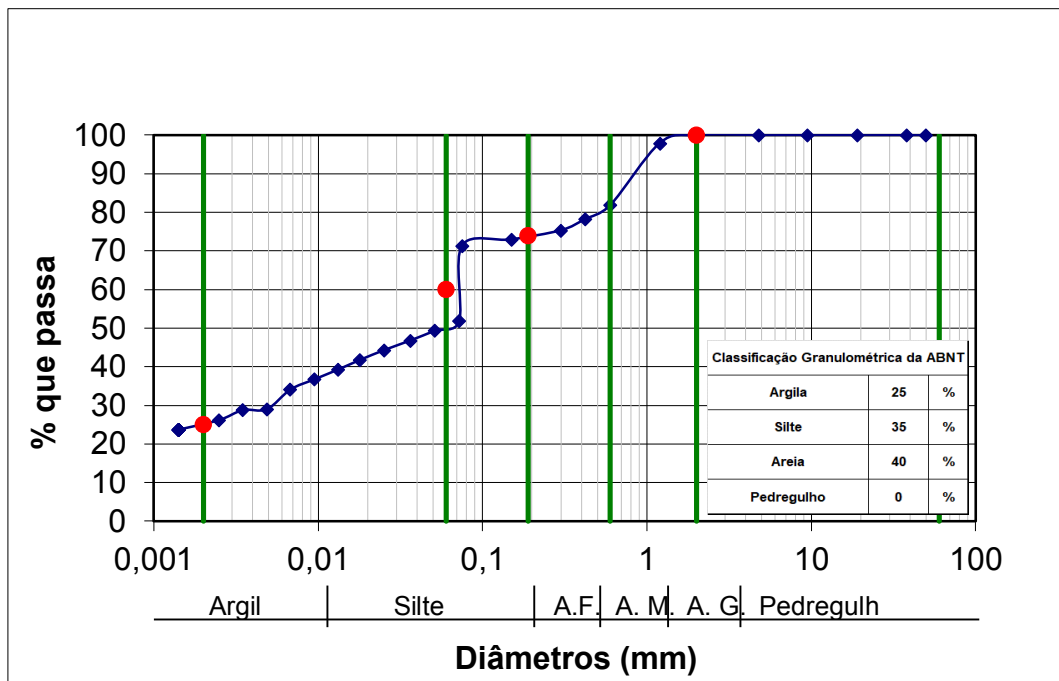
Fonte: A autora

Gráfico 13 - Curva granulométrica no ponto 6A da 1ª coleta.



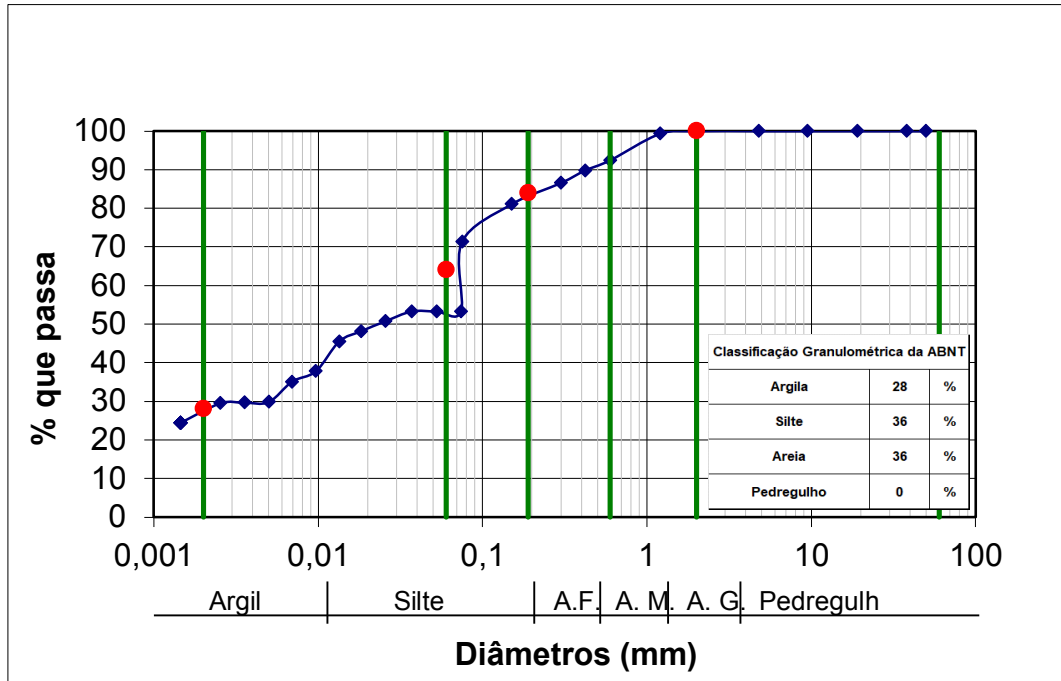
Fonte: A autora

Gráfico 14 - Curva granulométrica no ponto 6B da 1ª coleta.



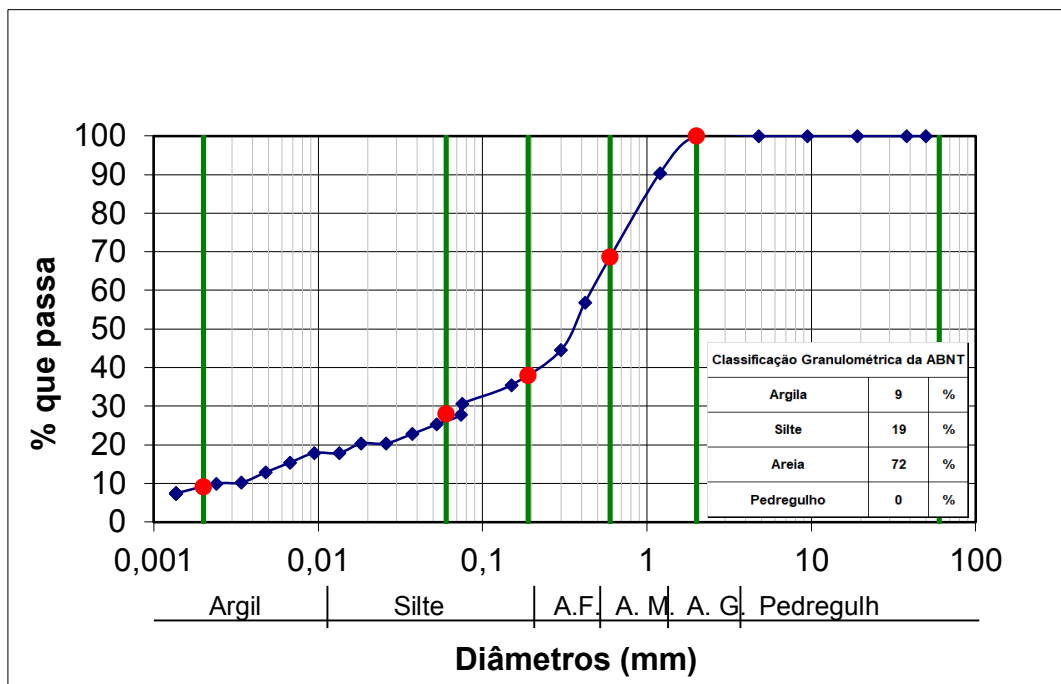
Fonte: A autora

Gráfico 15 - Curva granulométrica no ponto 6C da 1ª coleta.



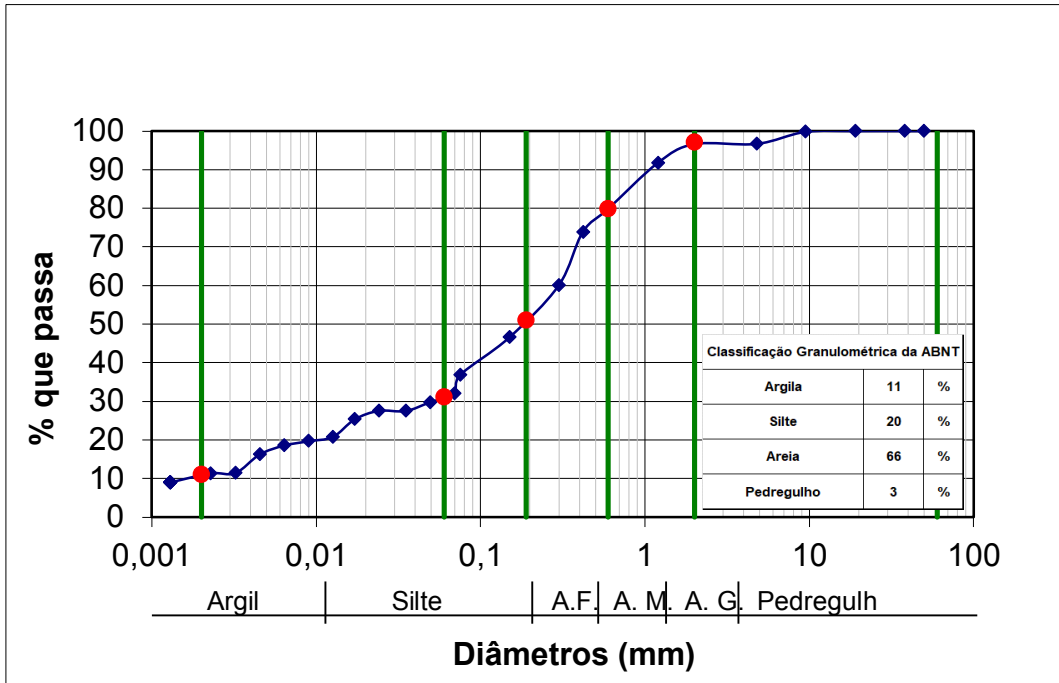
Fonte: A autora

Gráfico 16 - Curva granulométrica no ponto 1A da 2ª coleta.



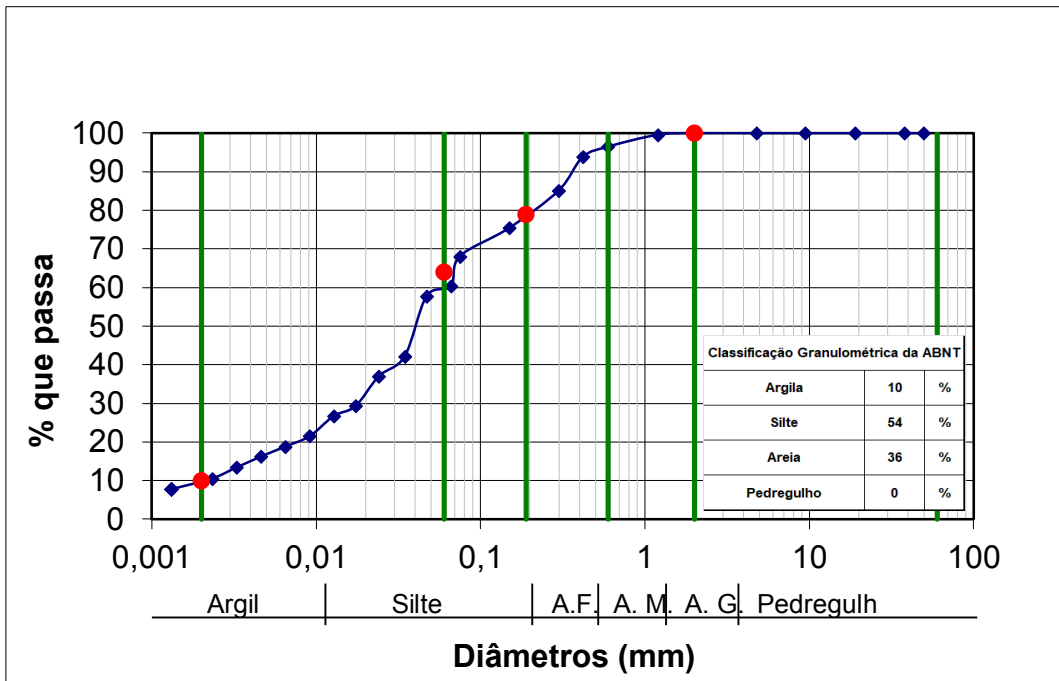
Fonte: A autora

Gráfico 17 - Curva granulométrica no ponto 1B da 2ª coleta.



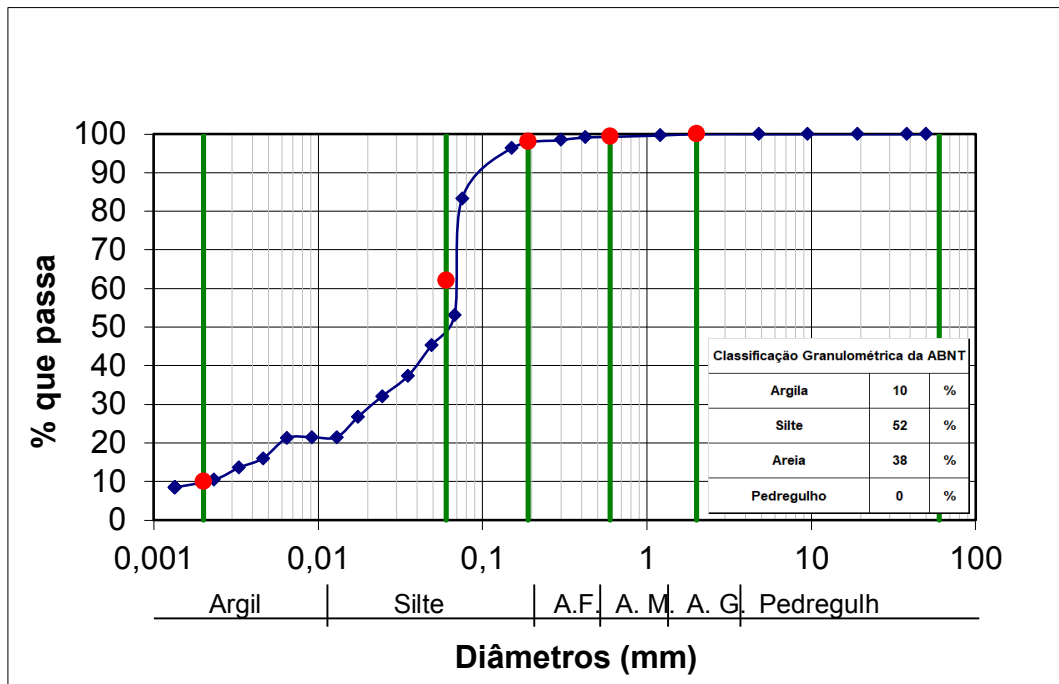
Fonte: A autora

Gráfico 18 - Curva granulométrica no ponto 1C da 2ª coleta.



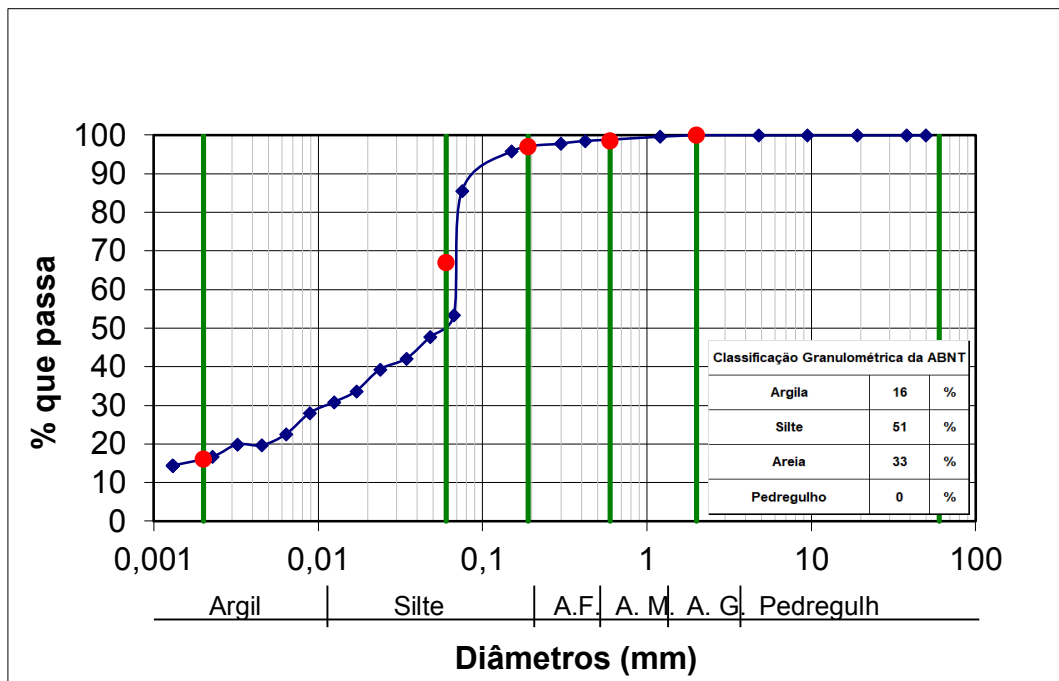
Fonte: A autora

Gráfico 19 - Curva granulométrica no ponto 2A da 2ª coleta.



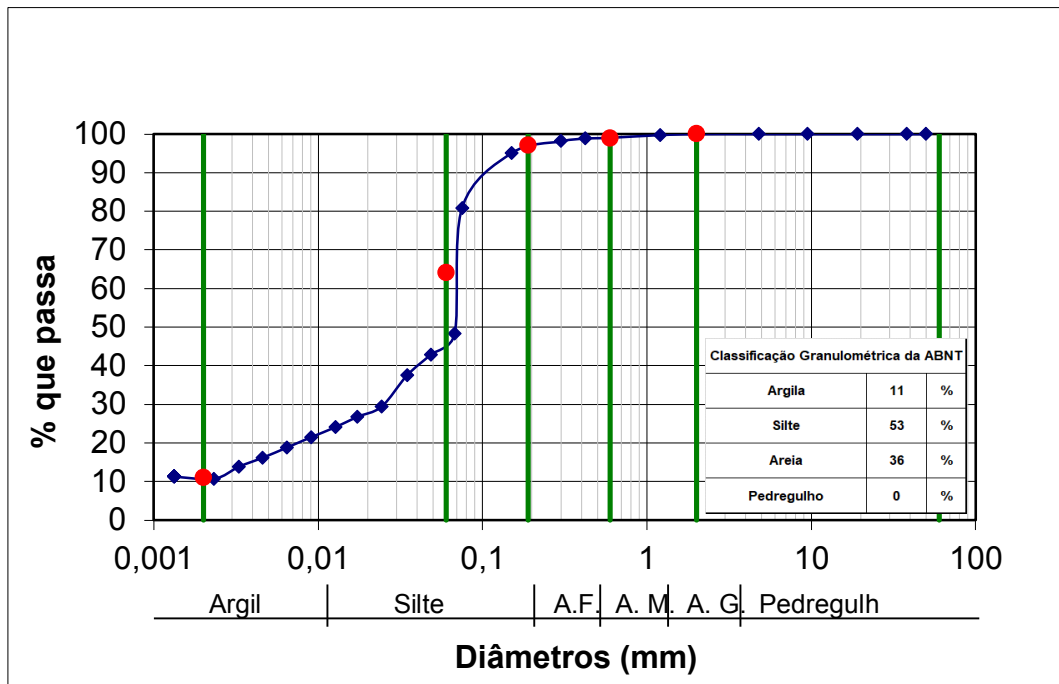
Fonte: A autora

Gráfico 20 - Curva granulométrica no ponto 2B da 2ª coleta.



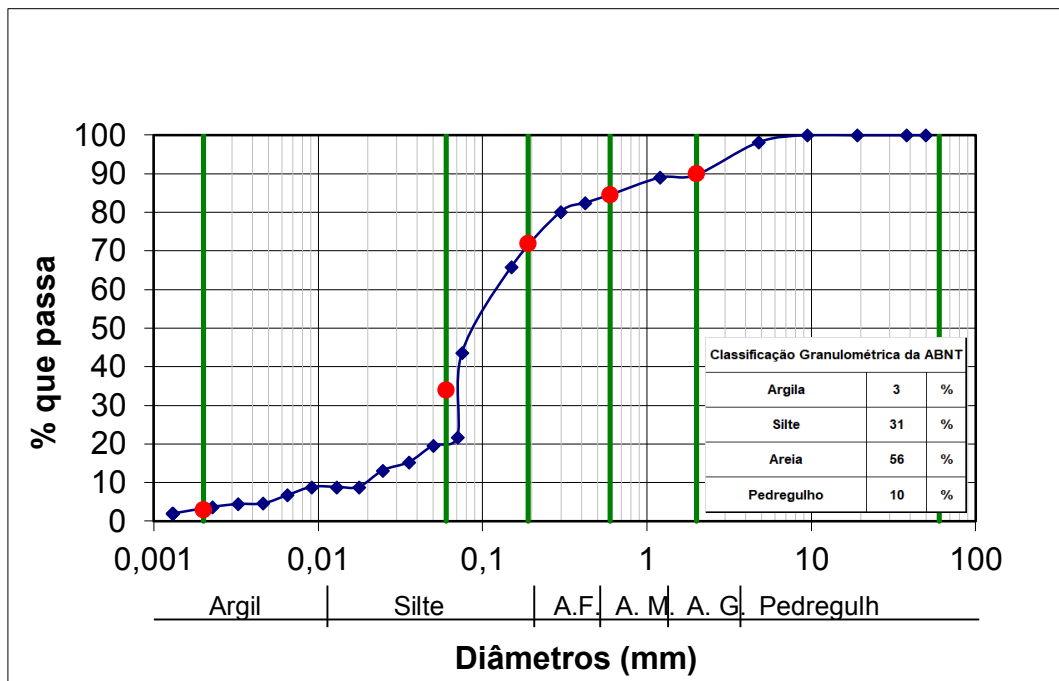
Fonte: A autora

Gráfico 21 - Curva granulométrica no ponto 2C da 2ª coleta.



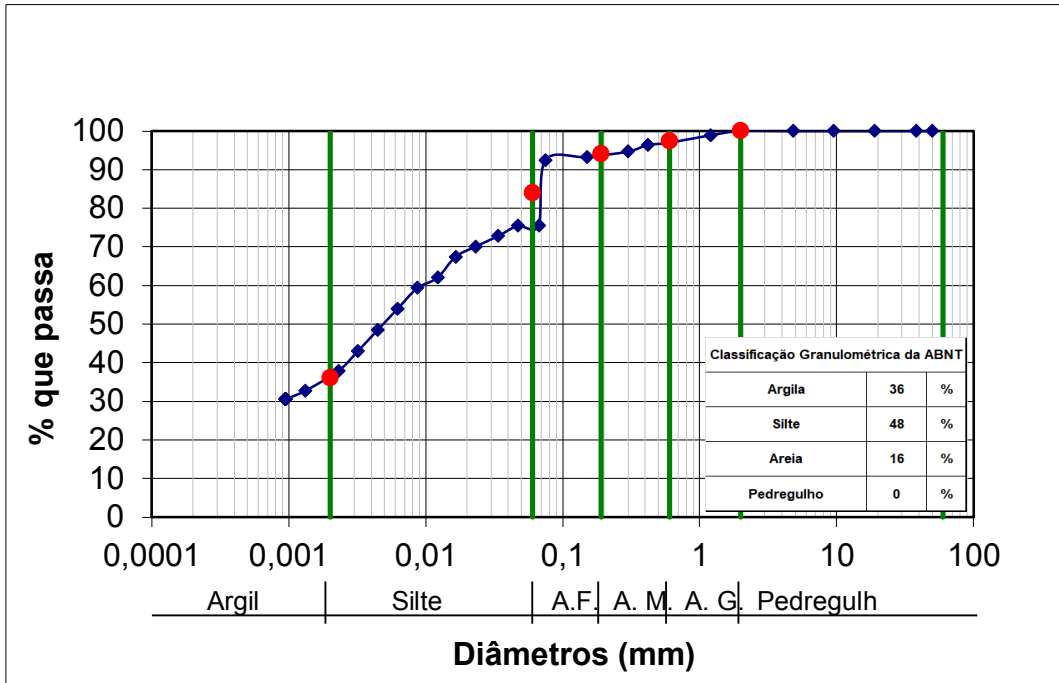
Fonte: A autora

Gráfico 22 - Curva granulométrica no ponto 3 da 2ª coleta.



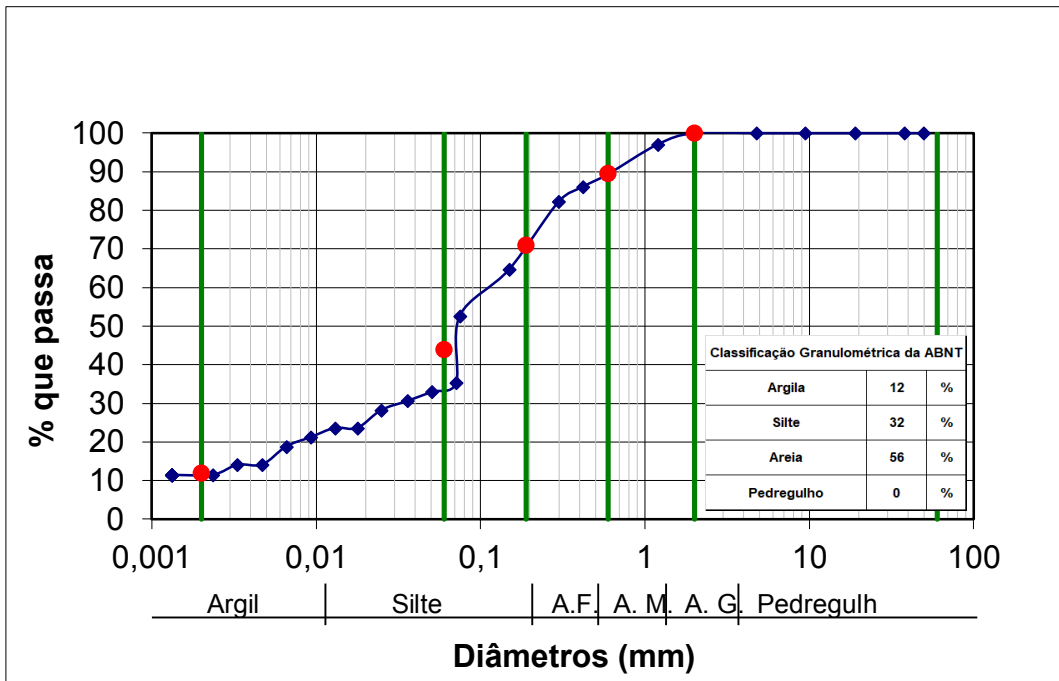
Fonte: A autora

Gráfico 23 - Curva granulométrica no ponto 4 da 2ª coleta.



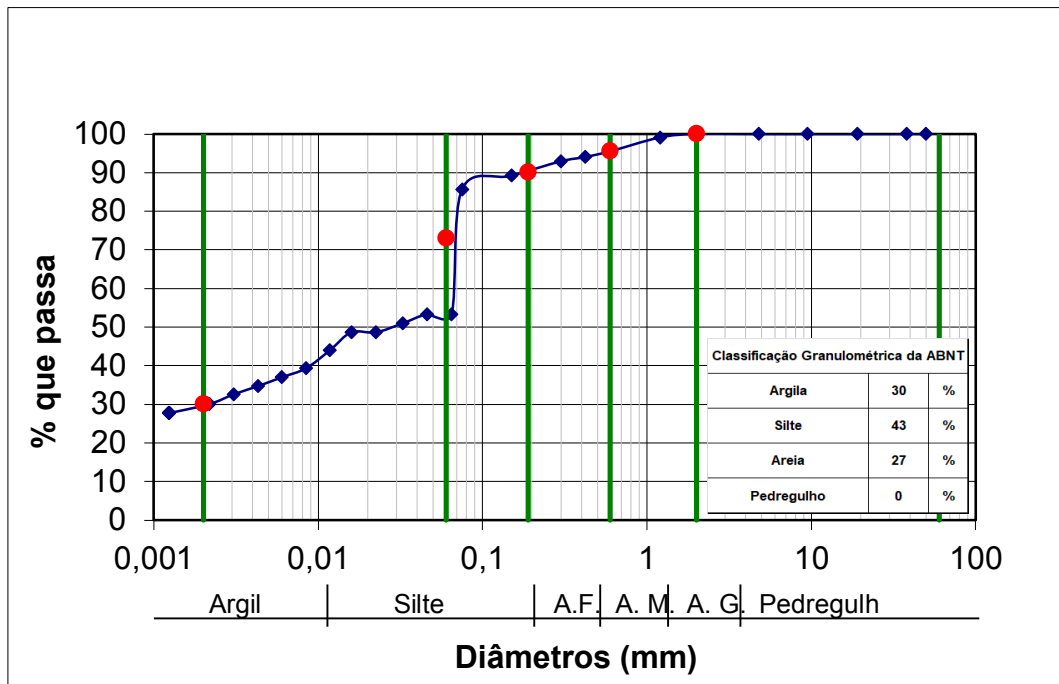
Fonte: A autora

Gráfico 24 - Curva granulométrica no ponto 5 da 2ª coleta.



Fonte: A autora

Gráfico 25 - Curva granulométrica no ponto 6 da 2ª coleta.



Fonte: A autora

## APÊNDICE D – MATRIZES CONFUSÃO DAS CLASSIFICAÇÕES DE 2013 E 2019

Tabela 18 – Matriz confusão da classificação da imagem de 2013

<b>Matriz Confusão - Imagem 2013</b>							
	<b>Água</b>	<b>Mat</b>	<b>Área</b>	<b>Pastage</b>	<b>Agricultur</b>	<b>Solo</b>	<b>Ground</b>
<b>Água</b>	53	0	0	0	0	0	53
<b>Mata</b>	0	57	0	0	23	0	80
<b>Área</b>	7	0	54	1	2	7	71
<b>Pastagem</b>	0	0	2	54	0	3	59
<b>Agricultur</b>	0	0	0	1	34	0	35
<b>Solo</b>	0	3	4	4	1	50	62
<b>Total</b>	60	60	60	60	60	60	360

Fonte: A autora

Tabela 19 – Matriz confusão da classificação da imagem de 2019

<b>Matriz Confusão - Imagem 2019</b>							
	<b>Água</b>	<b>Mat</b>	<b>Área</b>	<b>Pastage</b>	<b>Agricultur</b>	<b>Solo</b>	<b>Ground</b>
<b>Água</b>	60	0	0	0	0	0	60
<b>Mata</b>	0	57	0	0	9	0	66
<b>Área</b>	0	0	43	4	0	3	50
<b>Pastagem</b>	0	0	16	55	5	1	77
<b>Agricultur</b>	0	2	1	0	46	0	49
<b>Solo</b>	0	1	0	1	0	56	58
<b>Total</b>	60	60	60	60	60	60	360

Fonte: A autora

## APÊNDICE E - VALORES DE ALTITUDE MÍNIMA DE CADA SESSÃO TRANSVERSAL

Tabela 20 – Altitudes mínimas das 65 sessões

Sessão transversal	Batimetria realizada		Estimado HEC-RAS	
	2013	2019	2019	2025
1	733,444	735,014	735,710	736,402
2	732,585	734,954	735,625	735,063
3	733,175	734,842	734,688	734,893
4	732,677	734,563	734,251	734,601
5	733,011	734,220	733,972	734,245
6	733,027	733,801	732,504	734,242
7	732,798	731,352	732,090	731,791
8	732,612	731,639	732,736	732,085
9	732,812	731,714	732,417	732,175
10	732,828	731,546	731,829	732,004
11	732,561	731,295	732,766	731,372
12	732,727	731,441	731,678	731,490
13	732,940	730,733	732,830	730,766
14	732,563	731,806	732,627	731,829
15	732,845	732,464	732,220	732,480
16	732,663	731,908	732,613	731,920
17	732,384	731,971	732,785	731,981
18	732,494	731,983	732,308	731,991
19	732,430	731,737	731,846	731,743
20	732,170	731,936	732,371	731,941
21	731,939	731,965	732,318	731,969
22	732,410	732,285	731,795	732,289
23	732,385	732,141	731,702	732,144
24	732,372	732,019	732,385	732,022
25	731,897	731,672	731,840	731,674
26	732,934	731,855	731,508	731,857
27	733,030	731,974	732,288	731,976
28	733,146	732,079	732,937	732,080
29	733,038	732,197	732,494	732,198
30	732,349	732,245	732,362	732,246
31	732,084	731,945	732,365	731,946
32	732,448	731,631	731,889	731,632
33	732,154	732,294	732,155	732,294

34	731,888	732,057	732,449	732,058
35	732,364	732,609	732,084	732,610
36	732,361	732,818	732,350	732,819
37	732,493	732,716	733,038	732,716
38	732,936	732,727	733,147	732,727
39	732,286	732,359	733,030	732,359
40	731,506	732,436	733,261	732,744
41	731,838	732,340	731,921	732,362
42	732,382	731,741	732,385	731,751
43	731,698	732,623	732,393	732,630
44	731,791	731,999	732,415	732,003
45	732,313	733,407	731,943	733,410
46	732,365	733,199	732,173	733,202
47	731,839	732,392	732,433	732,394
48	732,299	732,291	732,496	732,293
49	732,773	732,428	732,386	732,429
50	732,597	732,312	732,665	732,313
51	732,199	732,685	732,846	732,686
52	732,598	733,904	732,564	733,905
53	732,788	733,140	732,941	733,141
54	731,619	732,445	732,728	732,446
55	732,661	732,966	732,562	732,967
56	731,336	732,744	732,829	732,745
57	731,929	733,511	732,813	733,512
58	732,273	733,149	732,613	733,149
59	731,637	733,273	732,799	733,273
60	732,049	733,570	733,028	733,571
61	733,940	733,327	733,539	733,851
62	734,201	733,260	733,296	733,872
63	734,614	734,258	733,883	734,926
64	735,182	736,030	733,332	736,697
65	735,56	736,410	735,001	736,949

Fonte: A autora

## ANEXO A – DADOS DE VAZÃO DA COPASA

Tabela 21 – Dados de vazão do Córrego do Ambrósio

<b>Data da Medição</b>	<b>Valor Medido (L/s)</b>
10/02/2011 00:00	124.8080977
25/03/2011 00:00	173.8390246
19/05/2011 00:00	154.2878047
12/08/2011 00:00	51.73170734
21/09/2011 00:00	54.17560988
16/03/2012 00:00	45.04390269
23/08/2012 00:00	46.44878041
21/06/2013 00:00	81.59468287
29/08/2013 00:00	62.93414618
27/09/2013 00:00	31.78536583
21/11/2013 00:00	33.95121963
17/01/2014 00:00	34.70731706
08/05/2014 00:00	16.72043895
13/02/2015 00:00	41.01624378
22/05/2015 00:00	38.52653663
17/07/2015 00:00	12.31130746
25/09/2015 00:00	33.72305849
20/11/2015 00:00	21.20655736
10/02/2017 00:00	38.45791833
20/07/2017 00:00	4.6642
05/10/2017 00:00	6.1863
02/03/2018 00:00	34.9987
12/04/2018 00:00	17.66675
21/06/2018 00:00	11.6405
27/07/2018 00:00	10.6357
29/08/2018 00:00	12.5618
03/10/2018 00:00	16.8342
27/11/2018 00:00	96.76245
09/04/2019 00:00	144.3956505
05/08/2019 00:00	43.28161

Fonte: COPASA (2019)