

RENATA TEIXEIRA DE ALMEIDA MINHONI

**ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO DA
PCH PIPOCA, MINAS GERAIS**

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*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M664e
2013

Minhoni, Renata Teixeira de Almeida, 1986-
Estimativa do assoreamento do reservatório da PCH Pipoca,
Minas Gerais / Renata Teixeira de Almeida Minhoni. – Viçosa,
MG, 2013.

124 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.113-117.

1. Mecânica do solo. 2. Sedimentos e depósitos.
3. Reservatórios. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.15136

RENATA TEIXEIRA DE ALMEIDA MINHONI

**ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO DA
PCH PIPOCA, MINAS GERAIS**

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: 27 de agosto de 2013

João Paulo Laquini

Izabel Christina d'Almeida
Duarte de Azevedo
(Coorientadora)

Prof. Roberto Francisco de Azevedo
(Orientador)

*Dedico este trabalho à minha querida
mãe, responsável por tudo que sou e
por tudo que construí.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Roberto Francisco de Azevedo, pela oportunidade, orientação e amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da UFV, em especial ao professor Eduardo Antônio Gomes Marques e à professora Izabel Christina d'Almeida Duarte de Azevedo, pelo suporte e amizade.

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

A todos os meus familiares pelo apoio e carinho.

Aos amigos da Engenharia Ambiental, em especial às amigas do cubículo e à minha grande amiga Geanne, que me acompanhou na graduação e na pós-graduação.

Ao João Paulo Laquini, membro da banca, pela presença e contribuições.

À Mariko pelo carinho, força e incentivo.

Ao Ivan Sérgio Carneiro pela disponibilização de dados indispensáveis a esse trabalho, e por todo apoio.

Ao José Rodrigues, bombeiro da UFV, pela grande ajuda nos trabalhos de campo e pelo excelente trabalho prestado.

Ao doutorando Eduardo pela ajuda nas atividades do mestrado.

Ao técnico Paulo Capelão pelo apoio nas análises laboratoriais.

À Universidade Federal de Viçosa, que desde 2006 é a grande responsável por toda a minha formação acadêmica.

RESUMO

MINHONI, Renata Teixeira de Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2013. **Estimativa do assoreamento do reservatório da PCH Pipoca, Minas Gerais.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Coorientadores: Izabel Christina d'Almeida Duarte de Azevedo e Eduardo Antônio Gomes Marques.

As barragens fazem parte da história das civilizações, estando entre as primeiras obras arquitetadas pela humanidade. Os reservatórios, formados pela construção de barragens, atuam como verdadeiras bacias de retenção de sedimentos, promovendo o seu assoreamento gradual. O acúmulo de sedimentos do fundo do reservatório modifica a morfologia do relevo, que deve ser reavaliada periodicamente a partir da atualização das curvas cota x área x volume (CAV), com base em levantamentos batimétricos. O presente estudo visou avaliar o processo de assoreamento no reservatório da PCH Pipoca (MG), por meio da realização de levantamentos batimétricos e pela caracterização dos sedimentos de fundo do reservatório. Foram realizados dois levantamentos batimétricos, o primeiro, em 2012, com ecobatímetro monofeixe e o segundo, em 2013, com ecobatímetro multifeixe. Além da comparação entre as metodologias utilizadas no uso dos ecobatímetros, foram analisados os resultados obtidos antes e depois do enchimento do reservatório, a partir da geração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs). O MDE antes do enchimento do reservatório, em 2006, foi obtido a partir de curvas de nível da região e de algumas seções batimétricas. Estes MDEs permitiram a geração das curvas CAV anterior e posterior ao enchimento do reservatório, possibilitando identificar volumes de sedimento depositado ao longo do período de operação do empreendimento. Na primeira batimetria do reservatório foi obtido um volume de sedimento depositado de $0,404 \text{ hm}^3$, representando uma taxa média de assoreamento anual de 0,80%. Já na segunda batimetria do reservatório foi obtido um volume de sedimento depositado de $0,369 \text{ hm}^3$, representando uma taxa média de assoreamento anual de 0,63%. Esta diferença pode ser justificada pelo fato de o ecobatímetro multifeixe proporcionar uma precisão maior no levantamento, ao ser capaz de mapear 100% da área, demandando pouca interpolação dos dados coletados.

ABSTRACT

MINHONI, Renata Teixeira de Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2013. **Estimation of reservoir sedimentation at PCH Pipoca, Minas Gerais**. Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Co-advisers: Izabel Christina d'Almeida Duarte de Azevedo and Eduardo Antônio Gomes Marques.

Dams are part of the history of civilizations, being among the first works architected by humanity. Reservoirs, formed by dams, act as sediment retention basins, promoting its gradual sedimentation. The accumulation of sediments on reservoir's bottom modifies the morphology of the relief, which should be periodically reviewed by the update of the elevation x area x volume curve (EAV), based on bathymetric surveys. This study aimed to evaluate the process of sedimentation on the Pipoca hydroelectric power plant reservoir, by performing bathymetric surveys and the characterization of the reservoir bottom sediments. Two bathymetric surveys were executed, the first, in 2012, with a single beam echosounder and the second, in 2013, with a multibeam echosounder. In addition to the comparison between the two methodologies used in the echosounders, it was analyzed the results obtained before and after the filling of the reservoir, by the generation of Digital Elevation Models (DEMs). The DEM before reservoir's filling was obtained from contour's lines of the region and some bathymetric sections of the river. These DEM enabled the generation of EAV curves before and after reservoir's filling, enabling the identification of deposited sediment volumes during the current operation period of the hydroelectric power plant. In the first bathymetric survey it was obtained a deposited sediment volume of 0.404 hm^3 , which represents an average annual sedimentation of 0.80%. In the second bathymetric survey was obtained a deposited sediment volume of 0.369 hm^3 , which represents an average annual sedimentation of 0.63%. The difference on the volumes obtained by the two equipments can be explained by the greater accuracy provided by the multibeam echo sounder. This multibeam echo sounder technology is able to provide 100% coverage of the area and requires less interpolation on the collected data than the other technology.

Sumário

1. Introdução	1
1.2. Objetivo	4
1.2.1. Objetivo geral	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Organização	4
2. Revisão bibliográfica	5
2.1. Breve histórico da hidrossedimentologia no Brasil	5
2.2. Processo de produção de sedimento	7
2.2.1. Erosão	7
2.2.2. Transporte	19
2.2.3. Deposição e adensamento	10
2.3. Dinâmica de sedimentos em reservatórios	10
2.4. Assoreamento de reservatórios	12
2.4.1. Características dos sedimentos depositados	12
2.4.2. Eficiência de retenção de sedimentos	13
2.4.3. Métodos e modelos para medição e previsão do assoreamento	19
2.4.3.1. Equações básicas	19
2.4.3.2. Método das curvas batimétricas	20
2.4.3.3. Métodos empíricos e matemáticos para avaliação do assoreamento	21
2.4.3.3.1. Métodos empíricos	21
2.4.3.3.2. Métodos matemáticos	25
2.4.3.4. <i>Softwares</i> SEDIMENT e DPOSIT	26
2.4.3.5. Levantamento batimétrico por sondagem acústica	29
2.4.3.5.1. Ecobatímetro monofeixe	30
2.4.3.5.2. Ecobatímetro multifeixe	33
2.5 Geração de MDE a partir de levantamento batimétrico	36
3. Materiais e métodos	38
3.1. Caracterização da área de estudo	38
3.1.1. Reservatório da PCH Pipoca	41
3.1.2. Geomorfologia	44
3.1.3. Geologia	47
3.1.4. Pedologia	48
3.1.5. Uso do solo e cobertura vegetal	52
3.1.6. Clima	55
3.1.7. Regime pluviométrico	55
3.1.8. Regime fluviométrico	57
3.2. Material	58
3.2.1. Equipamentos utilizados na coleta de sedimentos	58
3.2.2. Equipamentos utilizados na medição de vazão	59
3.2.3. <i>Software</i> RiverSurveyor Live	61
3.2.4. Dados de vazão afluente ao reservatório	62
3.2.5. Equipamentos utilizados nos levantamentos batimétricos	62
3.2.6. Pacote HYPACK	66
3.2.7. Material cartográfico e de satélite	68
3.2.8. <i>Softwares</i> SEDIMENT e DPOSIT	68

3.3. Métodos	68
3.3.1. Amostragem e caracterização dos sedimentos	68
3.3.2. Medição de vazão	70
3.3.3. Tratamento dos dados de vazão afluente	72
3.3.4. Geração do MDE anterior ao enchimento do reservatório	73
3.3.5. Levantamentos batimétricos	77
3.3.5.1. Primeiro levantamento batimétrico	77
3.3.5.2. Segundo levantamento batimétrico	78
3.3.6. Processamentos dos dados batimétricos	79
3.3.6.1. Processamentos dos dados batimétricos do primeiro levantamento batimétrico	79
3.3.6.2. Processamentos dos dados batimétricos do segundo levantamento batimétrico	80
3.3.7. Geração dos MDEs posterior ao enchimento do reservatório	81
3.3.8. Geração das curvas cota x área x volume	82
3.3.9. Cálculo do volume assoreado a partir do <i>software</i> SEDIMENT	82
3.3.10. Estudo para métrico do <i>software</i> SEDIMENT	84
3.3.11. Cálculo da distribuição de sedimentos a partir do <i>software</i> DPOSIT	84
4. Resultados e discussões	86
4.1. Caracterização dos sedimentos	86
4.2. Vazões afluentes ao reservatório	88
4.2.1. Vazão obtida pelo ADCP	88
4.2.2. Vazões defluentes da PCH Neblina	90
4.3. Produtos finais do <i>software</i> Hypack	91
4.3.1. Produtos finais do primeiro levantamento batimétrico	92
4.3.2. Produtos finais do segundo levantamento batimétrico	94
4.4. Geração dos MDEs e CAVs	95
4.4.1. MDE e CAV anterior ao enchimento do reservatório	95
4.4.2. MDE e CAV do primeiro levantamento batimétrico	97
4.4.3. MDE e CAV do segundo levantamento batimétrico	99
4.5. Volume de sedimento depositado a partir da comparação entre curvas CAV	100
4.6. Produtos finais do <i>software</i> SEDIMENT	102
4.6.1. Cenários para estimativa do volume de sedimento depositado	102
4.6.2. Cenários do estudo paramétrico	103
4.7. Produtos finais do <i>software</i> DPOSIT	105
5. Conclusões e considerações finais	110
6. Bibliografia	113
Anexo	118

1. INTRODUÇÃO

As barragens fazem parte da história da humanidade e estão estreitamente ligadas aos momentos de progresso e declínio das civilizações. Suas construções estão entre as primeiras obras arquitetadas pela humanidade, datadas de pelo menos 5.000 anos. A construção das primeiras barragens é evidenciada nos berços da civilização, na Babilônia, Egito, Índia, Pérsia e Extremo Oriente (JANSEN, 1980).

Normalmente, a construção de uma barragem e a formação do seu reservatório alteram as condições naturais do curso d'água. Uma das alterações provocadas por esta obra é a redução da velocidade do fluxo de água. Esta redução provoca um aumento na taxa de deposição de partículas em suspensão que antes eram carregadas pelo fluxo. Com a deposição contínua das partículas, inicia-se um assoreamento indesejável ao reservatório, reduzindo a sua vida útil e podendo vir a impedir a operação do empreendimento.

De acordo com Mahmood (1987) e Yoon (1972), citados por Ji et al. (2011), a taxa anual de assoreamento de reservatórios, no mundo, gira em torno de 1% da capacidade total de armazenamento. Yang (2003) afirma que a perda da capacidade de armazenamento dos reservatórios, devido ao assoreamento, está entre 1 a 2% ao ano. No caso do Brasil, Carvalho (2008) afirma que o valor médio anual para a taxa de assoreamento dos reservatórios é de 0,5%.

Além da redução da velocidade do fluxo de água e o conseqüente aumento na taxa de deposição de sedimentos, a construção de uma barragem altera a morfologia de um curso d'água e a drenagem da bacia hidrográfica, alagando áreas e elevando o nível d'água. Com a redução da velocidade na entrada do reservatório, ocorre a redução da oxigenação e uma grande retenção de nutrientes, podendo provocar o desenvolvimento de processos de eutrofização. A jusante do reservatório a água é liberada em grandes velocidades e com baixa concentração de sedimentos em suspensão, provocando erosões nas margens e no leito do rio (PEREIRA, 1998). Estes são exemplos de alguns dos impactos causados pela construção de barragens.

As partículas de sedimentos depositadas no fundo de reservatórios são provenientes do inadequado uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica, devido principalmente à acelerada urbanização e à adoção de práticas agrícolas inadequadas. O crescimento acelerado das cidades e o avanço da fronteira agrícola são acompanhados pelo desmatamento e pela degradação do solo, que contribuem com um aumento na produção de sedimentos e o conseqüente transporte e deposição das partículas.

A construção de barragens impacta tanto o transporte de água como o transporte de sedimentos. Porém, a diferença mais importante é que a água pode ser removida facilmente do reservatório, ao contrário do sedimento. Com o passar do tempo, os impactos causados pelos sedimentos se tornam mais graves e mais fáceis de serem constatados, porém acompanhados de difícil solução (MORRIS & FAN, 2010).

Os reservatórios atuam como bacias de retenção de sedimentos, promovendo o seu assoreamento gradual. O acúmulo de sedimentos no fundo do reservatório modifica o relevo submerso, que deve ser reavaliado a partir da realização de um novo levantamento para atualização das curvas cota x área x volume. Estas curvas devem ser atualizadas periodicamente para uma melhor operação e gerenciamento do empreendimento, evitando uma avaliação equivocada do processo de assoreamento e estimativa da vida útil do reservatório.

A atualização do relevo do fundo do reservatório e das curvas cota x área x volume pode ser realizado por meio de levantamentos batimétricos, utilizando equipamentos de sondagem acústica, como ecobatímetros monofeixe e multifeixe.

O ecobatímetro monofeixe, também chamado de *single beam*, realiza o levantamento batimétrico a partir da emissão de um único feixe acústico, enquanto o ecobatímetro multifeixe, também conhecido como *multibeam*, é responsável pela emissão de inúmeros feixes. O sistema monofeixe é mais simples de ser operado e o processamento dos dados coletados é rápido, porém demanda mais tempo na realização do levantamento. Já o sistema multifeixe demanda um maior trabalho na operação e no processamento dos

dados, além de ser mais dispendioso, mas promove uma melhor qualidade no resultado final do levantamento.

No estudo do reservatório apresentado neste trabalho foi realizado um primeiro levantamento batimétrico utilizando um ecobatímetro monofeixe e um segundo utilizando um ecobatímetro multifeixe.

Essa dissertação de mestrado é parte integrante do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico Cemig GT - Aneel, ano 2009, intitulado “GT349 - Metodologia para calcular o volume e a distribuição de sedimentos em reservatórios de barragens”, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa em parceria com a Cemig Geração e Transmissão S/A e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Este projeto conta com o desenvolvimento de uma tese de doutorado na UHE Irapé (MG), e duas dissertações de mestrado, uma na PCH Cachoeirão (MG), concluída em junho de 2013, e a outra, presente trabalho, desenvolvida na PCH Pipoca (MG).

1.2. OBJETIVO

1.2.1. Objetivo Geral

Estudar o processo de assoreamento de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), através de levantamentos batimétricos no campo, análises computacionais e caracterização dos sedimentos de fundo do reservatório.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar a curva cota x área x volume (CAV) atual do reservatório da PCH Pipoca, atualizando suas características morfológicas;
- Analisar a deposição de sedimentos no reservatório da PCH desde o início de sua operação, por meio da comparação das curvas CAV geradas antes e depois do enchimento do reservatório;
- Comparar as batimetrias no reservatório feitas com os ecobatímetros monofeixe e multifeixe;
- Determinar a taxa média anual de assoreamento do reservatório;
- Caracterizar o sedimento depositado no fundo do reservatório, a partir da distribuição granulométrica e massa específica das partículas;
- Realizar uma medição de vazão afluyente ao reservatório, com uso de ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*);
- Realizar análises utilizando os *softwares* SEDIMENT e DPOSIT.

1.3. ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação foi dividida em seis capítulos. No primeiro, é apresentada uma introdução do assunto e os objetivos deste estudo. O segundo capítulo contém uma revisão bibliográfica dos principais assuntos abordados, como o processo erosivo e o assoreamento de reservatórios. No terceiro capítulo são apresentados os materiais utilizados e as metodologias empregadas. O quarto e o quinto capítulos apresentam os resultados e as conclusões, respectivamente, resultantes deste estudo. O último capítulo, sexto, apresenta as referências bibliográficas utilizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Breve histórico da hidrossedimentologia no Brasil

Segundo Carvalho (2008), a disciplina que estuda os sedimentos, juntamente com os processos hidroclimatológicos, é a sedimentologia, matéria com grande relevância mundial em função dos diversos problemas causados pelos sedimentos. Quando restrita a cursos d'água e lagos, a sedimentologia é conhecida como hidrossedimentologia.

No Brasil, a sedimentologia tem recebido importância devido aos problemas ocasionados pelos sedimentos, principalmente aqueles acarretados pela erosão e pelo assoreamento de corpos d'água. Apesar de estes problemas já terem causado prejuízos ao País, não há nenhum relato sobre medições de sedimentos anteriores a 1950 (CARVALHO, 2008).

O primeiro trabalho registrado sobre o assunto no país foi realizado pela Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) do Rio Grande do Sul no rio Camaquã, RS, com o intuito de se fazer uma previsão do assoreamento e o cálculo da vida útil do reservatório da barragem do Paredão. Um segundo trabalho de sedimentologia foi composto por estudos destinados à elaboração do projeto, bem como da construção, de um porto em Iguape, com a participação do Laboratório de Chatou, do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo e da Escola Politécnica de São Paulo (CARVALHO, 2008).

No Brasil, as publicações sobre sedimentologia são raras, entre elas, cita-se o livro "Regularização de Rios", do Eng. Octávio Dias Moreira, publicado em 1951 pelo Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), que trata da morfologia fluvial e obras de regularização. Um segundo livro foi publicado em 1956 com o título "A Erosão no Brasil", de autoria de Wanderbilt Duarte de Barros. O "Manual de Hidrometria", publicado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em 1965, possui três volumes, sendo o segundo destinado à sedimentometria (CARVALHO, 2008).

Somente após a criação da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), em 1977, com a realização de simpósios e a edição da "Revista de

Hidrologia e Recursos Hídricos”, foi possível a publicação de diversos trabalhos relacionados à sedimentologia (CARVALHO, 2008).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, SNIRH/ANA, atualmente, o país possui 676 postos sedimentométricos em atividade com registro de sedimentos. Destes, 80 (11,8%) estão localizados no Estado de Minas Gerais. Estes postos realizam somente medições do sedimento em suspensão, sem apresentarem dados da descarga sólida total.

Contudo, a *World Meteorological Organization* (WMO) além de recomendar uma quantidade mínima de postos sedimentométricos em função da unidade fisiográfica e da área da bacia hidrográfica (Tabela 1), recomenda também a medição da descarga sólida total.

Tabela 1 - Densidade mínima recomendada de postos sedimentométricos (adaptado de WMO, 1994).

Unidade fisiográfica	Densidade mínima por posto (área em km² por posto)
Costa litorânea	18 300
Montanhas	6 700
Planícies	12 500
Acidentada/ondulada	12 500
Pequenas ilhas	2 000
Polar/árida	200 000

O número de postos da rede sedimentométrica brasileira é inferior ao recomendado pela WMO, devido a fatores econômicos, relacionados a custos operacionais (CARVALHO et al., 2000).

Com uma quantidade de postos abaixo da recomendada e à realização de medições apenas da carga sólida em suspensão, sem a determinação da descarga sólida total e dados de granulometria, muitos estudos sedimentológicos no país são prejudicados, como aqueles responsáveis pela avaliação do assoreamento de reservatórios.

2.2. Processo de produção do sedimento

Segundo Carvalho (2008), sedimento é uma partícula de solo, rocha, ou de materiais biológicos que pode ser transportada pela água ou pelo vento desde o seu local de origem até locais de deposição. Quando atingem os rios, os sedimentos compõem o material sólido em suspensão e/ou aquele depositado no leito.

A produção de sedimentos é oriunda de processos naturais, podendo ser agravada e acelerada por processos antrópicos, como o uso e ocupação inadequados do solo, sem a adoção de práticas conservacionistas que minimizem sua quantidade.

2.2.1. Erosão

Erosão é o processo pelo qual materiais da superfície terrestre são removidos e transportados de um ponto para outro. É um processo subsequente ao intemperismo de rochas e ao uso inadequado dos solos. A erosão envolve o desprendimento e o transporte de materiais intemperizados de um local para outro, desnudando a superfície terrestre e fornecendo sedimentos para o sistema fluvial (MORRIS & FAN, 2010).

Desta forma, a erosão pode ser inicialmente classificada em dois tipos: geológica e acelerada. A erosão geológica, também conhecida como erosão natural ou normal, é aquela ocorrida normalmente, sem a intervenção humana, acontecendo vagarosamente no ambiente. A erosão acelerada, ou antrópica ou induzida pelo homem, é aquela provocada pelo homem (CARVALHO, 2008).

Segundo Barros (1956), um dos autores brasileiros responsáveis pelas primeiras publicações sobre sedimentos no país, a erosão acelerada é resultante do uso excessivo e/ou das consequências da visão limitada do homem sobre o solo, que, juntamente com fatores meteorológicos, aceleram o processo erosivo. A erosão acelerada também é influenciada por outros fatores, como a topografia, a natureza do solo, as práticas culturais de cultivo e a cobertura do mesmo.

Estes fatores, que afetam diretamente a erosão, são chamados de agentes erosivos ativos e passivos. Dentre os agentes ativos, citam-se a água, representando a maior parte dos fenômenos erosivos, o vento, a temperatura, a ação de microrganismos e a ação do homem. Dentre os passivos citam-se a topografia, o tipo de solo, a cobertura vegetal e as práticas antrópicas (CARVALHO, 2008).

Já em 1956, Barros afirmava que os critérios para classificação dos tipos de erosão eram muito variados. Como exemplo, tem-se a classificação apresentada por Hernani et al. (2002), na qual a erosão é dividida em 5 tipos: hídrica, eólica, química, física e biológica. Na erosão hídrica e na eólica, há perda de camadas superficiais do solo, deformação do terreno, movimentos de massa e deposição de sedimentos erodidos. Na erosão química, ocorre perda de nutrientes, salinização, acidificação e poluição do solo. Na erosão física, ocorre compactação do terreno e selamento das partículas do solo, favorecendo a inundação e aeração deficiente. Por fim, na erosão biológica ocorre redução da biomassa e da biodiversidade do solo.

Em regiões de clima tropical e subtropical úmido, como é o caso do Brasil, o principal agente erosivo é a água. Esta erosão hídrica, juntamente com as atividades humanas, causam perdas e degradação dos solos (HERNANI et al., 2002).

A erosão hídrica pode ocorrer progressivamente nas formas laminar, em sulcos ou em voçorocas. Estas formas podem ocorrer concomitantemente num mesmo terreno, sendo a laminar o primeiro estágio, em que a superfície do solo é lavada, seguido pela erosão em sulcos, quando o escoamento se concentra em pequenos sulcos, e pela erosão em voçoroca, quando os sulcos aumentam em largura e profundidade (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012).

A erosão, acompanhada da utilização não planejada dos recursos hídricos e das áreas agrícolas e urbanas, vem causando graves prejuízos ao homem. Segundo Hernani et al. (2002) estes prejuízos podem ser estimados em R\$ 10,6 bilhões ou US\$ 4,2 bilhões anuais ao país.

Marques, citado por Bertoni & Lombardi Neto (2012), em 1949, estimou para o Brasil uma perda de solo por erosão laminar de aproximadamente 500 milhões de toneladas anuais. Bertoni & Lombardi Neto (2012) afirmam que, atualmente, devido ao excessivo uso do solo e acelerada expansão da fronteira agrícola, as perdas superam o valor estimado por Marques (1949), agravando a situação do país.

2.2.2. Transporte

Durante um evento de chuva, parte do volume total precipitado cai diretamente sobre a superfície do terreno, devido à ausência de vegetação ou porque simplesmente passa pelos espaços da cobertura vegetal. Outra parte é interceptada pela vegetação e retorna à atmosfera por evaporação (MORGAN, 2005).

À medida que a intensidade da precipitação excede a taxa de infiltração da água no solo ou à capacidade deste terreno em acumular água, inicia-se o empoçamento da água na superfície do solo. A partir deste momento, inicia-se o escoamento superficial da água, associado ao transporte de partículas do solo (PRUSKI et al., 2008).

O escoamento da água na superfície é o agente erosivo, das partículas de solo, mais significativo. Assim que a água flui em direção às partes mais baixas do terreno, vai ganhando energia em função do aumento de massa e/ou de velocidade, carreando partículas de solo; esta energia é mais elevada em rampas mais longas (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012).

Assim que os sedimentos chegam aos cursos d'água, estes são transportados em suspensão ou no leito do curso d'água, saltando, deslizando ou rolando, de acordo com o escoamento e as condições locais (CARVALHO, 2008).

O transporte de sedimentos pelo fluxo de água, normalmente mantém as partículas finas em suspensão, movendo-as ao longo do curso d'água aproximadamente na mesma velocidade da água. Os sedimentos mais grosseiros permanecem em repouso na maior parte do tempo, mas podem se deslocar ocasionalmente (EDWARD e GLYSSON, 1998).

2.2.3. Deposição e adensamento

Quando a capacidade de transporte de sedimentos dos cursos d'água é excedida, ocorre a deposição destes em locais mais baixos, como depressões, rios, lagos, açudes ou reservatórios, completando o processo erosivo (BRANCO, 1998).

Os sedimentos mais densos tendem a sedimentar de acordo com as condições da água, as quais dependem das diferenças de densidade entre as partículas e a água, da viscosidade da água e do tamanho, forma e flocculação dos sedimentos. A temperatura influencia na viscosidade da mistura fluido-sedimento. Quanto maior a temperatura da mistura, menor sua viscosidade e maior a velocidade de queda das partículas. A flocculação aumenta a velocidade de queda das partículas, e depende do tamanho, da forma e da composição destas, além da turbulência e composição química da água (COLBY, 1963).

Com a sedimentação das partículas, estas estarão sujeitas a um adensamento que reduzirá o espaço ocupado pelo volume do material depositado. Este processo, dependente do tempo, pode consolidar por décadas devido ao próprio peso juntamente à sobrecarga de uma sedimentação adicional (MORRIS & FAN, 2010).

2.3. Dinâmica de sedimentos em reservatórios

O comportamento de sedimentos em reservatórios é variável de acordo com a energia disponível para o transporte destes. Se a energia for suficiente para o transporte de carga sólida, o fundo do rio permanece em condições estáveis. Caso haja aumento desta energia, ocorrerá erosão das margens e do fundo do rio, transportando a carga sólida e contribuindo para o seu aumento à jusante. Porém, se a energia for menor, parte da carga sólida será depositada no leito do rio (OLIVEIRA & BRITO, 1998).

O transporte de sedimentos pelos rios ocorre de duas formas principais, por carga de leito, em que os sedimentos movimentam-se ao longo do leito, e em

suspensão, quando os materiais são transportados pelo fluxo de água. (LEE, 2005).

As partículas do leito são transportadas quando a força de cisalhamento do fluxo supera a resistência ao movimento da partícula, que é determinada pelo seu peso e pelo atrito entre as partículas vizinhas ali presentes. Estas partículas podem ser transportadas por arraste ou por saltação. A zona limite entre os transportes por carga de leito e em suspensão não é bem definida. (CAMPOS, 2001).

O reservatório, formado a partir da construção de uma barragem, altera as condições naturais do curso d'água, reduzindo a velocidade do fluxo de água e aumentando a taxa de deposição dos sedimentos no reservatório, o qual vai sofrer um assoreamento gradual ao longo do tempo.

Quando o curso d'água encontra o reservatório formado por uma barragem, a carga de leito e a fração mais grosseira da carga em suspensão são depositadas imediatamente, enquanto os sedimentos mais finos, com baixa velocidade de sedimentação, são transportados ao longo do reservatório (MORRIS & FAN, 2010).

A deposição e distribuição dos sedimentos nos reservatórios e a formação do assoreamento é função de diversos fatores, como a forma geométrica do reservatório, a topografia da região, a sinuosidade do curso d'água, a granulometria dos sedimentos, o tipo de operação do reservatório, a vazão afluente, e outros (CARVALHO, 2008).

Os sedimentos depositados não se distribuem uniformemente do início do reservatório até o barramento. Os sedimentos que se depositam na entrada do reservatório são chamados de depósito de remanso, devido ao fenômeno hidráulico presente no encontro do curso d'água com o reservatório. Dentro do reservatório os depósitos são chamados de delta, de margem e de leito. Os depósitos de delta e os de remanso apresentam sedimentos mais grossos, enquanto os depósitos localizados mais no interior, margem e leito, apresentam sedimentos mais finos (MAHMOOD, 1987 *apud* CARVALHO, 2008). A Figura 1

ilustra os tipos de depósitos formados em um reservatório, excetuando os depósitos de margem.

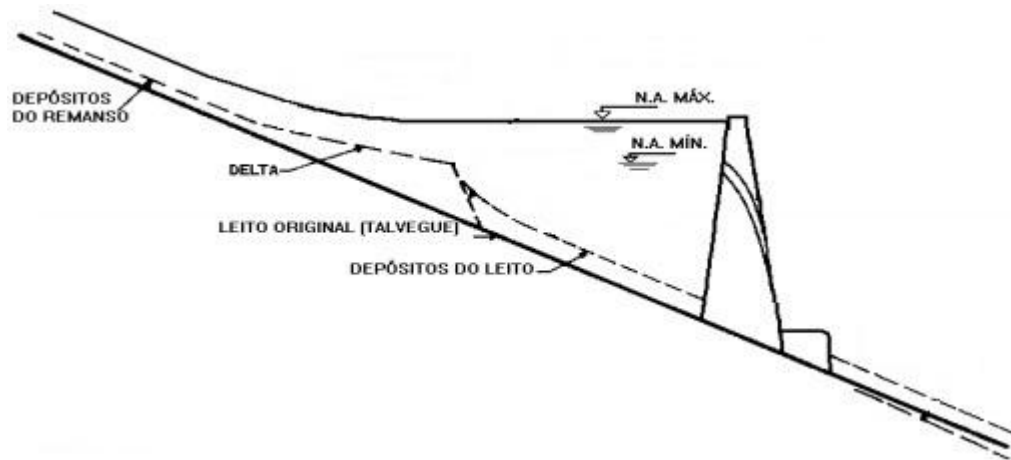


Figura 1 - Formação de depósitos de sedimentos em reservatórios em delta. Fonte: adaptado de CARVALHO (2008).

A dinâmica de sedimentos em reservatórios pode ser simulada através de diversos modelos desenvolvidos para prever a distribuição destes sedimentos, podendo ser divididos em empíricos e matemáticos. Estes modelos serão discutidos mais adiante.

2.4. Assoreamento de reservatórios

2.4.1. Características dos sedimentos depositados

Como partículas individuais, os sedimentos possuem suas próprias características, sendo este conhecimento necessário à modelagem de seu comportamento na água e quando depositados. Desta forma, estas características são importantes no estudo do assoreamento de reservatórios, onde o transporte, a sedimentação e a compactação são funções das características dos sedimentos (CAMPOS, 2001).

Segundo Blake et al. (2007), o tamanho e o peso específico das partículas são fundamentais na compreensão do processo de transporte dos sedimentos, sendo a distribuição granulométrica das partículas a propriedade mais utilizada

na engenharia e em estudos ambientais para a descrição dos sedimentos do leito.

Quanto ao peso específico, outra característica importante relacionada ao comportamento dos sedimentos em reservatórios, este exerce influência no grau de sedimentação e compactação dos sedimentos.

Com a consolidação dos sedimentos, após a deposição, a sua densidade geralmente aumenta com a profundidade e com o tempo, em função da redução dos espaços entre as partículas (JEPSEN *et al.*, 1997).

Além do processo de consolidação, a granulometria dos sedimentos e o manejo do reservatório, também, condicionam o peso específico do sedimento depositado no leito. Depósitos compostos por silte e areia possuem valores de peso específico maiores em relação aos compostos predominantemente por argila. Sedimentos de reservatórios submetidos a rebaixamentos significativos podem ficar expostos por longos períodos e, assim, sofrerem forte consolidação (STRAND, 1987).

O conhecimento do peso específico dos sedimentos em um reservatório é fundamental para se avaliar, com maior precisão, o volume de sedimento depositado. Porém, devido ao difícil acesso a este material, ou seja, por estarem, na maioria das vezes, submersos a profundidades elevadas, a coleta e o conhecimento de suas características não é uma tarefa muito simples.

2.4.2. Eficiência de retenção de sedimentos

Strand (1974) define a eficiência de retenção (E_r) de sedimentos em um reservatório como a razão entre a quantidade de sedimento depositado e o fluxo total de sedimento afluente. Este parâmetro depende principalmente da velocidade de queda das partículas de sedimento e do fluxo destas através do reservatório. A velocidade de queda das partículas é influenciada principalmente pelo tamanho, forma e peso das partículas e pela viscosidade e composição química da água.

Os métodos utilizados para determinação da eficiência de retenção dos sedimentos, além de fornecerem dados estimados, são empíricos. Estes métodos são baseados na medição de depósitos de um grande número de reservatórios. Os métodos mais conhecidos e utilizados no Brasil são o de Brune e o de Churchill. Além destes métodos, podem-se citar os de Brown e de Heinemann, pouco conhecidos (CARVALHO, 2008).

Segundo a pesquisa de Pereira (1998), Brown (1943) estabeleceu uma relação entre a eficiência de retenção e a razão entre a capacidade do reservatório e a área da bacia hidrográfica, de acordo com a seguinte equação:

$$E_r = 100 \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + 4,76 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{C_r}{W} \right)} \right]$$

Em que:

E_r = eficiência de retenção de sedimentos, %

C_r = capacidade do reservatório, m³

W = área da bacia hidrográfica, m²

Esta equação aborda a relação de um reservatório com a bacia hidrográfica na qual está inserido, através do fenômeno da retenção de sedimentos. Gottschalk (1948), também citado por Pereira (1998), afirma que o método de Brown (1943) não considera o comportamento do reservatório em função de sua localização em regiões climáticas diferentes. Justificando, reservatórios situados em regiões de clima seco podem passar longos períodos sem receberem água suficiente para alcançar a tomada d'água. Isto favorece a deposição dos sedimentos devido ao aumento nos tempos de retenção do escoamento e do sedimento no reservatório.

A curva de Brown (1943) pode ser visualizada no Gráfico 1, onde a razão capacidade do reservatório pela área da bacia (C_r/W) é representada no eixo das abscissas e a eficiência de retenção de sedimentos (E_r) é representada pelo eixo das ordenadas.

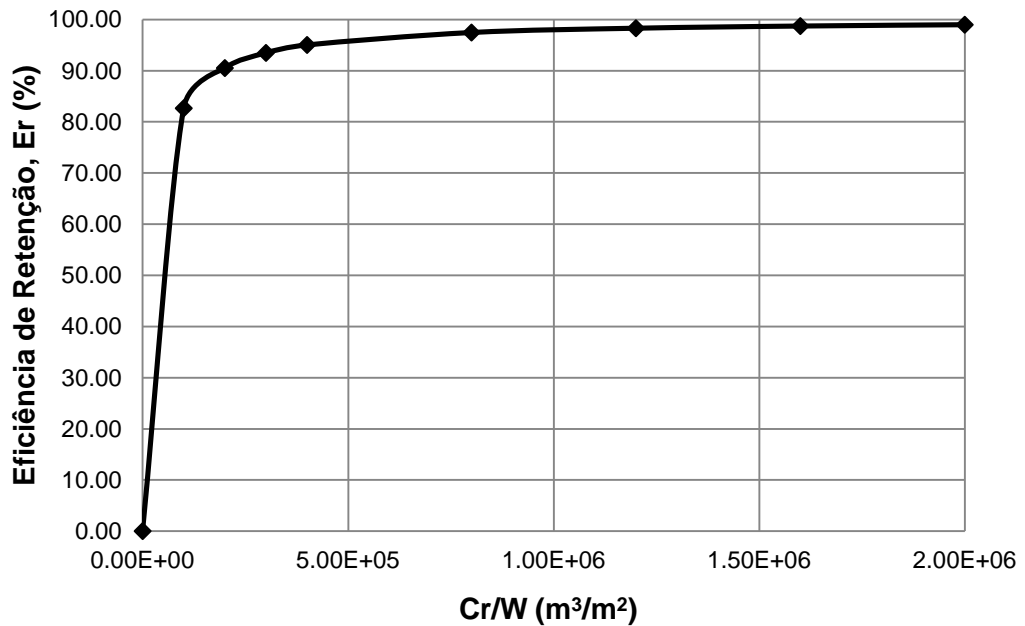


Gráfico 1 - Curva de Brown para determinação da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios.

Churchill (1948) desenvolveu a relação entre a porcentagem de sedimento afluente ao reservatório e o índice de sedimentação do reservatório (IS). O índice de sedimentação é a razão entre o período de retenção e a velocidade média através do reservatório (STRAND, 1987). Desta maneira, a eficiência de retenção (E_r) é obtida pela seguinte diferença:

$$E_r = 100 - \text{sedimento afluente (\%)}$$

Carvalho (2008) define o período de retenção como a razão entre o volume do reservatório em seu nível médio de operação (ft^3) pela vazão média afluente diária referente ao período de estudo ($\text{ft}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). A velocidade média do reservatório é a relação entre a vazão média diária ($\text{ft}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e a área da seção transversal média (ft^2), podendo esta ser determinada pela divisão do volume (ft^3) do reservatório pelo seu comprimento (ft).

A partir das definições acima, a equação para o cálculo do índice de sedimentação, utilizado no método de Churchill (1948), é apresentada da seguinte maneira:

$$IS = \frac{C^2}{L \cdot Q^2}$$

Em que,

IS = índice de sedimentação, $s^2.m^{-1}$

C = capacidade do reservatório no nível médio de operação, m^3

L = comprimento do reservatório, m

Q = vazão média afluente, $m^3.s^{-1}$

A curva de Churchill (1948), apresentada por Strand (1987) apresenta, no eixo das abscissas, valores do índice de sedimentação e, no eixo das ordenadas, valores de sedimento efluente ao reservatório (Figura 2).

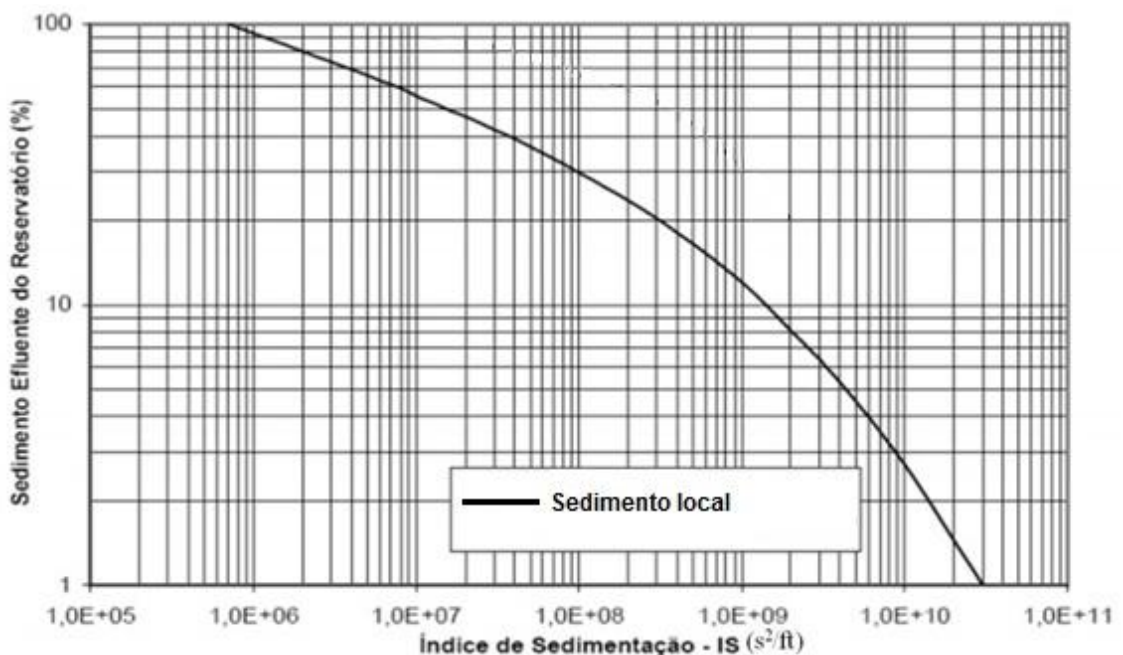


Figura 2 - Curva de eficiência de retenção proposta por Churchill (1948). Fonte: Adaptado de Trindade 2007 apud Carvalho, 2008.

O método de Brune (1953) é provavelmente o método mais utilizado para se estimar a eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios. As curvas obtidas por Brune foram baseadas em 44 reservatórios dos EUA, sendo plotada a eficiência de retenção (E_r) em função da capacidade de afluência do reservatório (C/l) (JOTHIPRAKASH & GARG, 2008). De acordo com as pesquisas de Gill (1979, apud JOTHIPRAKASH & GARG, 2008), a equação que representa o método de Brune para sedimentos grossos é:

$$E_r = \frac{\left(\frac{C}{I}\right)^2}{0,994701 \cdot \left(\frac{C}{I}\right)^2 + 0,006297 \cdot \left(\frac{C}{I}\right) + 0,3 \cdot 10^{-5}}$$

Em que,

E_r = eficiência de retenção de sedimentos, %

C = capacidade do reservatório, m^3

I = volume médio afluente anual, m^3

Na Figura 3 têm-se as curvas de eficiência de retenção de sedimentos segundo o método de Brune (1953). Tem-se uma curva inferior, referente a depósitos contendo sedimentos finos, uma curva superior, para depósitos de sedimentos grossos, e uma curva média. A curva média pode ser utilizada caso a granulometria do sedimento seja desconhecida. Este método é o mais utilizado no Brasil para reservatórios médios e grandes (CARVALHO, 2008).

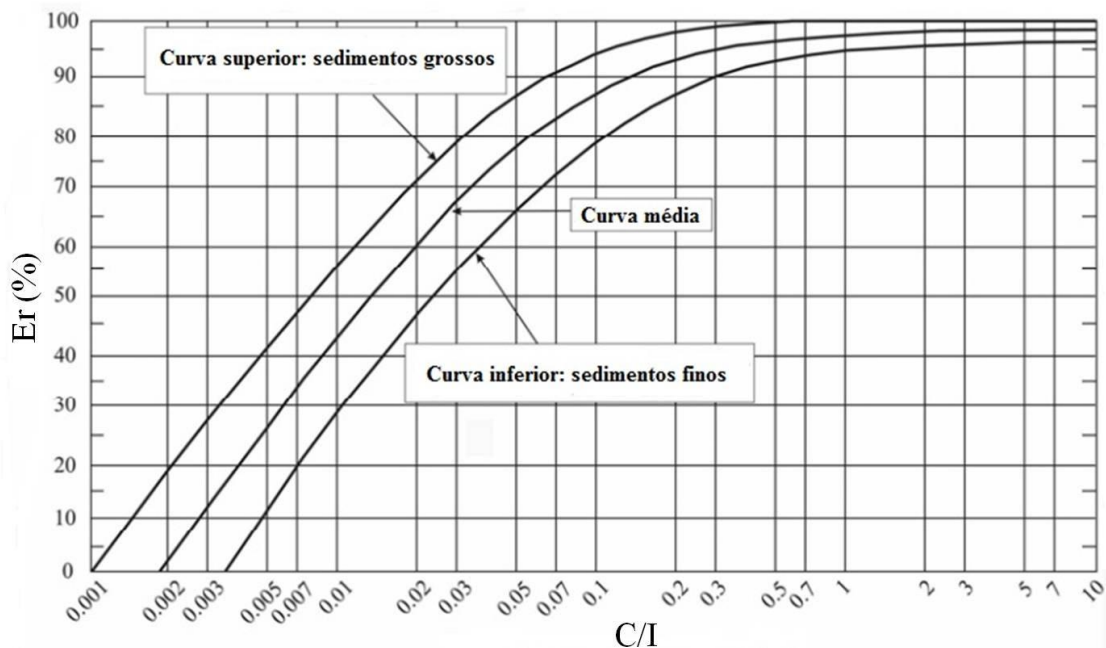


Figura 3 - Curva de eficiência de retenção proposta por Brune (1953). Fonte: Adaptado de Jothiprakash & Garg, 2008.

Enquanto, o método de Brune (1953) é utilizado para reservatórios médios e grandes, o método de Churchill (1948) é utilizado para reservatórios pequenos, reservatórios semi secos, estruturas de retenção de inundação e eclusas (STRAND, 1987).

Segundo Heinemann (1981), citado por Verstraeten & Poesen (2000), o parâmetro mais importante em um reservatório é a eficiência de retenção de sedimentos. Para a maioria dos reservatórios, a capacidade de retenção de água deve ser mantida em seu maior nível na maioria do tempo, resultando em uma eficiência de retenção de sedimentos baixa. A equação de Heinemann é:

$$E_r = -22 + \frac{119,6 \cdot \frac{C}{I}}{0,012 + 1,02 \cdot \frac{C}{I}}$$

Em que,

E_r = eficiência de retenção de sedimentos, %

C = capacidade do reservatório, m^3

I = volume médio afluente anual, m^3

A curva de Heinemann (1981) para a eficiência de retenção é apresentada na Figura 4, em comparação com a curva de Brune (1953).

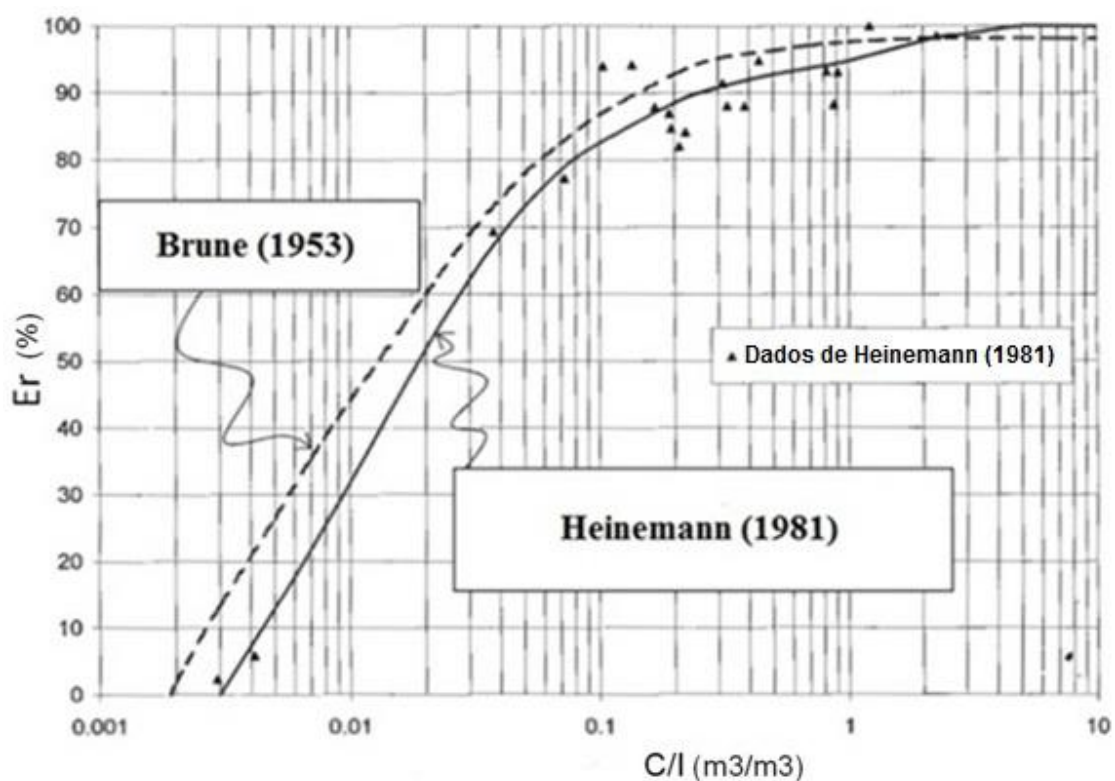


Figura 4 - Curva de eficiência de retenção proposta por Heinemann em comparação com a curva proposta por Brune. Fonte: adaptado de Verstraeten & Poesen, 2000.

Além dos métodos apresentados, existem outros destinados ao cálculo da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, como o método de Borland (1971), baseado em dados de laboratório, método de Karashev (1966), que considera a velocidade de queda da partícula, e método de Dendy (1974), desenvolvido para pequenos reservatórios.

2.4.3. Métodos e modelos para medição e previsão do assoreamento

Para Bruk (1985), o destino final de qualquer reservatório é ficar totalmente preenchido por sedimentos. A sua vida útil inicia-se a partir da sua construção e termina com o seu completo assoreamento, a ponto de não mais atender aos propósitos para os quais foi construído.

De acordo com o mesmo autor, a taxa de acumulação de sedimentos em reservatórios não pode ser prevista com precisão e, desta forma, é desejável a determinação periódica do volume de sedimentos acumulado, durante toda a vida do reservatório.

Existem muitos métodos utilizados para o cálculo do volume de sedimentos retidos em reservatórios e na previsão do seu assoreamento. A seguir, serão apresentados alguns destes métodos.

2.4.3.1. Equações básicas

Para o cálculo do volume de sedimento retido em um reservatório, Carvalho (2008) utiliza as seguintes equações:

$$S = \frac{D_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} = \frac{365 \cdot Q_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} \quad T = \frac{V_{res}}{S}$$

Em que:

S = volume de sedimento retido no reservatório, $m^3 \cdot ano^{-1}$

D_{st} = deflúvio sólido total médio anual afluente ao reservatório, $t \cdot ano^{-1}$

E_r = eficiência de retenção do sedimento afluente ao reservatório, fração

γ_{ap} = peso específico aparente médio dos depósitos, $t \cdot m^{-3}$

Q_{st} = descarga sólida total média afluente ao reservatório, $t \cdot dia^{-1}$

T = tempo de assoreamento de um determinado volume, anos

V_{res} = determinado volume do reservatório, total, volume morto ou outro, m^3

O peso específico aparente médio dos depósitos pode ser obtido de acordo com uma metodologia desenvolvida por Lara & Pemberton (1965), em que este parâmetro é calculado considerando-se o tipo de operação do reservatório, a textura e granulometria das partículas de sedimento, a compactação dos depósitos e outros fatores de menor influência (CARVALHO, 2008).

2.4.3.2. Método das curvas batimétricas

Este é o método mais conhecido, em que a área de cada curva batimétrica do reservatório é determinada e usada para traçar a curva cota x área. Existem dois métodos para a determinação do volume entre pares sucessivos de curvas batimétricas: método da área média das curvas batimétricas e método prismoidal modificado (Morris & Fan, 2010).

No método da área média das curvas batimétricas, o volume de água é calculado a partir da área média entre duas curvas batimétricas sucessivas, multiplicando-se pela distância entre elas. A equação utilizada é:

$$\text{Volume} = \frac{H \cdot (A_1 + A_2)}{2}$$

Em que, H é a diferença de elevação entre curvas batimétricas sucessivas e A_1 e A_2 são as áreas de cada curva.

O método prismoidal modificado é mais preciso que o anterior na determinação do volume d'água represado no reservatório, utilizando a seguinte equação:

$$\text{Volume} = \frac{H \cdot [A_1 + (A_1 \cdot A_2)^{\frac{1}{2}} + A_2]}{3}$$

Para o cálculo do volume de sedimento retido em um reservatório basta subtrair o volume de água encontrado no levantamento atual do volume encontrado no levantamento original do reservatório. Vale ressaltar que este simples cálculo de subtração pode levar a erros devido ao adensamento dos sedimentos ao longo do tempo (CARVALHO, 2008).

2.4.3.3. Modelos

Geralmente, os modelos utilizados para simular a dinâmica dos sedimentos em reservatórios podem ser divididos em empíricos, baseados em informações preexistentes, e matemáticos, baseados em equações matemáticas, os quais podem ainda ser divididos em unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) (LAQUINI, 2009).

2.4.3.3.1. Modelos empíricos

O modelo empírico mais utilizado na predição da distribuição de sedimentos em reservatórios foi desenvolvido por Borland & Miller (1958) e revisado por Lara (1962), sendo chamado de método empírico de redução de área. Os primeiros autores utilizaram levantamentos de 30 reservatórios americanos para desenvolver o método, o qual é baseado na classificação dos reservatórios em quatro tipos, de acordo com o valor de m . Este fator m é o inverso da inclinação da reta obtida em um gráfico log-log entre os dados de profundidades do reservatório, no eixo das ordenadas, e os dados de capacidade do mesmo, no eixo das abscissas. Para cada forma ou tipo de reservatório uma equação, A_p , foi derivada relacionando-se a porcentagem da profundidade do reservatório em relação à porcentagem de sedimento depositado no mesmo. Esta classificação pode ser visualizada na Tabela 2, em que p é a profundidade relativa, ou seja, a relação entre a elevação máxima de água e qualquer elevação genérica do reservatório (CAMPOS, 2001).

Tabela 2 - Classificação e equações do método da redução de área de Borland & Miller. Fonte: adaptado de CAMPOS (2001).

Forma do reservatório	m	Tipo	A_p
Zonas planas	3,5 - 4,5	I	$A_p = 5,047 \cdot p^{1,85} \cdot (1 - p)^{0,36}$
Zonas de inundação ou de colinas	2,5 - 3,5	II	$A_p = 2,487 \cdot p^{0,57} \cdot (1 - p)^{0,41}$
Região montanhosa	1,5 - 2,5	III	$A_p = 16,967 \cdot p^{1,15} \cdot (1 - p)^{2,32}$
Região de garganta profunda	1,0 - 1,5	IV	$A_p = 1,486 \cdot p^{-0,25} \cdot (1 - p)^{1,34}$

O método permite reconhecer que a distribuição dos sedimentos em um reservatório depende de quatro fatores: a maneira como o reservatório é operado, a textura e tamanho das partículas de sedimento depositadas, a forma do reservatório e o volume de sedimento depositado. Contudo, a forma do reservatório, classificação anteriormente citada (*Reservoir Shape*), foi tomada como o principal critério para o desenvolvimento de curvas para o uso na distribuição de sedimento, de acordo com a classificação da forma do reservatório (STRAND, 1987).

Os estudos dos autores indicaram uma relação entre a forma do reservatório e a porcentagem de sedimentos depositados. A partir de então, os dados de porcentagem de sedimentos depositados foram ajustados à profundidade relativa, de acordo com as curvas mostradas na Figura 5. A partir da integração das equações A_p , para cada tipo de reservatório, estas curvas foram convertidas em curvas de área relativa em relação à profundidade relativa (Figura 6) (LOPES, 1993).

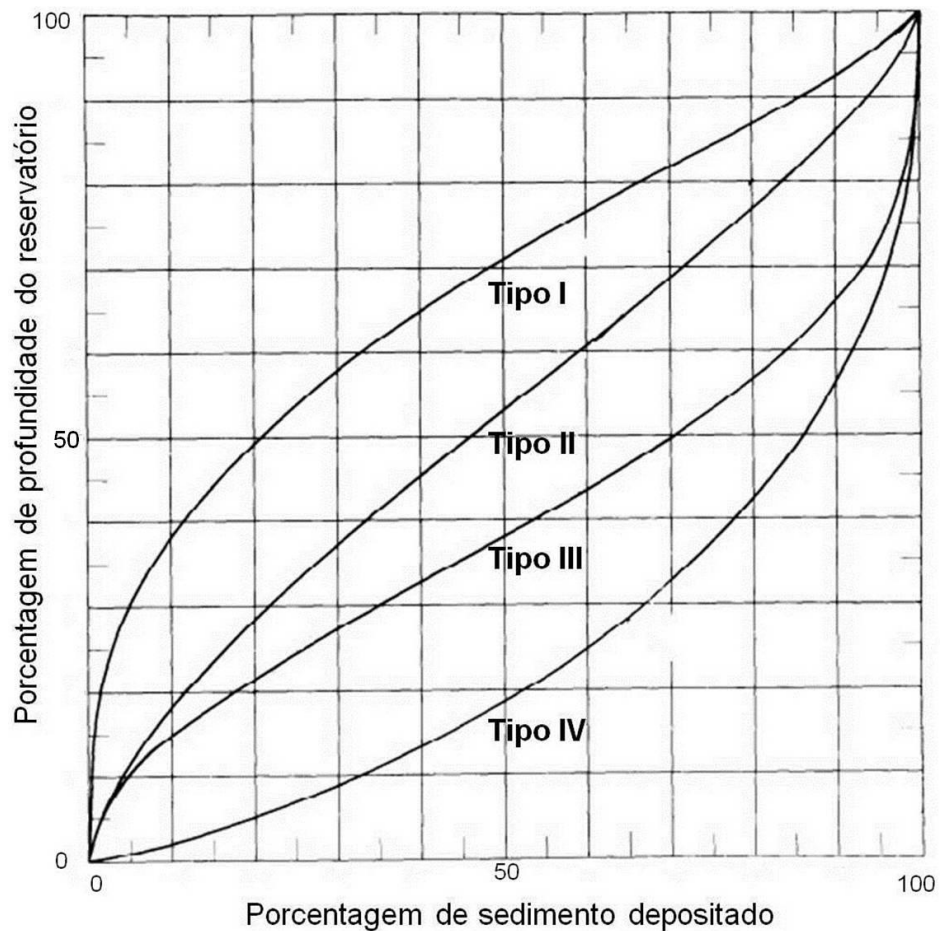


Figura 5 - Curvas de porcentagem de sedimento depositado em relação à profundidade para cada tipo de reservatório, segundo Borland & Miller. Fonte: Adaptado de Morris & Fan, 2010.

A premissa dos autores, relacionando a forma do reservatório com a porcentagem de sedimento depositado, indica que em reservatórios localizados em áreas mais planas, ou seja, com pequenas declividades, os depósitos tendem a se formar principalmente em locais mais altos. Os reservatórios localizados em áreas de grande declividade tendem a acumular sedimentos principalmente nas partes mais baixas, próximas à barragem. Já os reservatórios com declividades médias, os depósitos de sedimentos tendem a se distribuir de maneira relativamente uniforme (LOPES, 1993).

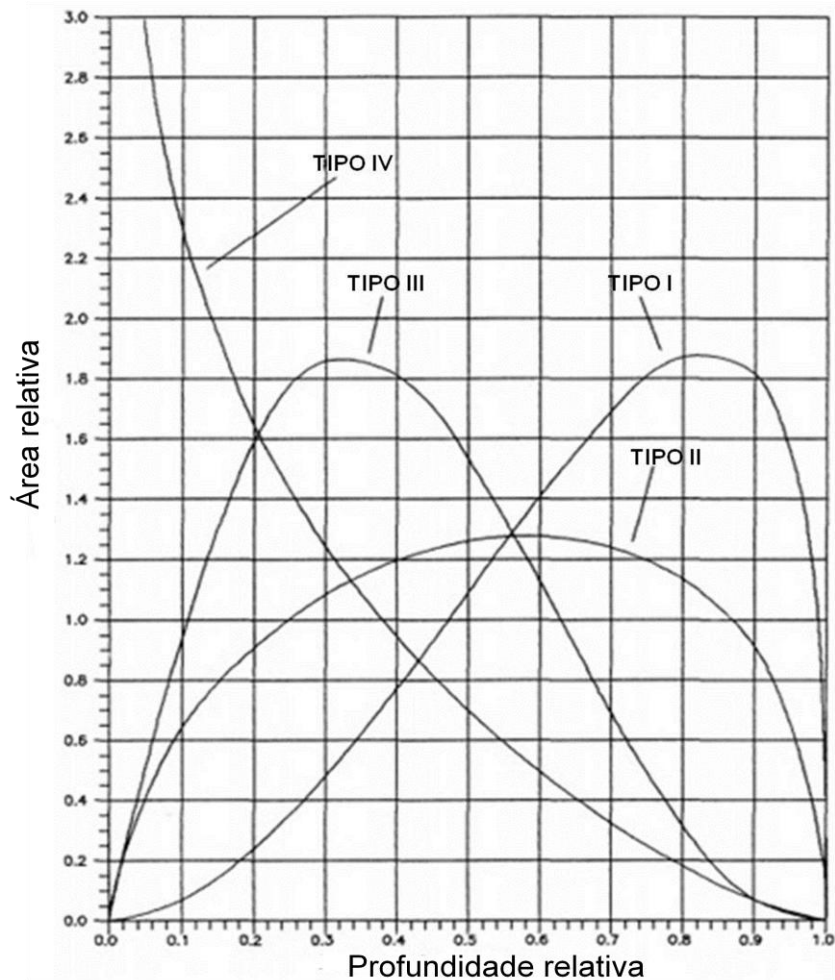


Figura 6 - Curvas de profundidade relativa em relação à área relativa para cada tipo de reservatório, segundo Borland & Miller. Fonte: Lopes, 1993.

Segundo Rice (1981), citado por Campos (2001), neste método, a deposição de sedimentos ocorre apenas em função da forma do reservatório, sem levar em consideração o efeito de outros fatores envolvidos no processo de deposição.

Existem outros tipos de métodos empíricos, como o método clássico, que assume que os sedimentos retidos se depositam em camadas paralelas, e o método de incremento de área, baseado no pressuposto de que a área de depósito de sedimento permanece constante em todas as profundidades do reservatório.

2.4.3.3.2. Modelos matemáticos

Com o avanço da computação, os modelos empíricos foram gradativamente substituídos por modelos matemáticos, que representam os fenômenos físicos que ocorrem durante o assoreamento de um reservatório, por meio de equações diferenciais.

Na modelagem com métodos matemáticos unidimensionais, o único fator considerado é a direção do fluxo de água. A vantagem de sua simplicidade nas formulações se contrapõe com a desvantagem da impossibilidade de simular fluxos em curvas e zonas de recirculação ou fluxos secundários. O modelo matemático unidimensional mais conhecido é o HEC-6, desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers* no começo da década de 70 (CAMPOS, 2001).

De acordo com Morris & Fan (2010), o modelo HEC-6 é provavelmente o mais utilizado nos Estados Unidos na simulação do transporte de sedimentos em rios e reservatórios. Este modelo tem sido modificado e melhorado através de novos lançamentos, e a versão atual lida com o assoreamento e com o tamanho dos sedimentos, variando de argila à pedregulho.

Os modelos bidimensionais são um caso particular dos modelos tridimensionais, servindo como etapa inicial para estes últimos. Usam equações governantes tridimensionais em casos bidimensionais. Estes modelos começaram a ser desenvolvidos na década de 80, podendo ser citados os modelos desenvolvidos por Mc Annally (1989), Evans *et al.* (1990) e Hoogan & Twiss (1993) (CAMPOS, 2001).

Antes do método desenvolvido por Campos (2001), não existia qualquer modelo tridimensional desenvolvido exclusivamente para o assoreamento em reservatórios. Neste método, as equações de Navier-Stokes são resolvidas por diferenças finitas.

Além dos modelos matemáticos determinísticos, existem modelos estocásticos destinados a avaliar o processo físico envolvido no assoreamento de reservatórios. Estes modelos vêm ganhando importância nos últimos anos, devido ao avanço nos métodos de análise de incertezas e na consideração da

variabilidade temporal e espacial de parâmetros e incertezas associadas nos modelos, de acordo com Laquini (2009). Este mesmo autor desenvolveu um modelo matemático estocástico quase-tridimensional capaz de simular os fenômenos físicos envolvidos no assoreamento de reservatórios, considerando a variação granulométrica dos sedimentos afluentes e dos depositados. Tal modelo foi elaborado em um programa de computador e recebeu o nome de SimSed.

2.4.3.4. Softwares SEDIMENT e DPOSIT

Tratam-se de *softwares* públicos e gratuitos, ambos elaborados por Anderson Braga Mendes, em 2005, na sua dissertação de mestrado. São modelos matemáticos que podem ser utilizados na simulação do assoreamento de diferentes tipos de reservatórios, não apenas naqueles destinados à geração de energia elétrica. A seguir, os *softwares* serão descritos de acordo com a dissertação do próprio autor, MENDES (2005), e com os manuais de uso disponíveis em cada *software*.

O *software* SEDIMENT é capaz de calcular o volume assoreado ao longo da vida operacional de uma barragem, utilizando metodologias criadas por outros autores, como Borland & Miler (1958), no cálculo de alguns parâmetros, peso específico aparente e eficiência de retenção de sedimentos, e por metodologias complementares criadas pelo próprio autor.

Este *software* agrega um caráter dinâmico à avaliação da produção de sedimentos, a partir de simulações com a inserção de valor à taxa de aumento da produção de sedimentos. Esta taxa representa a produção ou a regressão da produção de sedimentos na bacia hidrográfica devido ao uso do solo, podendo ser expressa em porcentual anual e podendo ser estática, invariável no tempo, ou dinâmica, variando ao longo dos anos. Este parâmetro é empregado no cálculo da descarga sólida anual a partir da seguinte equação:

$$Q_{sol}(t) = Q_{sol}(t_0) \cdot (1+taxa)^t$$

Em que,

$Q_{sol}(t)$ = descarga sólida anual para o tempo t ;

$Q_{sol}(t_0)$ = descarga sólida anual para o tempo t_0 ;

taxa = taxa de aumento/redução da produção de sedimentos;

t = tempo, em anos.

No do *software*, a taxa de aumento da produção de sedimentos pode ser mantida constante durante todo o período de análise ou linearmente variável ao longo do período. A opção em adotar esta taxa como variável é viável quando a bacia hidrográfica, na qual o rio está inserido, tenha sofrido ações antrópicas significativas durante o período em questão.

Os dados de entrada necessários ao *software* são:

- Tipo de operação do reservatório, o qual pode ser: tipo 1 (sedimento sempre ou quase sempre submerso); tipo 2 (depleção do reservatório de pequena à média); tipo 3 (reservatório com variações consideráveis de nível); tipo 4 (reservatório normalmente vazio);
- Volume do reservatório no nível d'água máximo normal;
- Volume assoreado para $t = 0$ ano, ou seja, o volume já depositado;
- Vazão média anual afluente;
- Taxa de aumento do transporte sólido;
- Porcentual de argila afluente;
- Porcentual de silte afluente;
- Porcentual de areia afluente;
- Comprimento do reservatório;
- Intervalo de tempo modelado.

Após a inserção dos dados de entrada, o usuário deve escolher a opção de cálculo para a eficiência de retenção do reservatório, podendo ser através das curvas de Churchill (1948) e Brune (1953) ou a partir da inserção do valor inicial da eficiência de retenção e posterior utilização das curvas, ou considerar o sedimento vindo de um reservatório de montante.

Os dados de saída ou resultados finais são apresentados na forma de tabelas com os seguintes parâmetros, por intervalo de tempo:

- Volume sólido depositado;
- Volume sólido efluente;
- Eficiência de retenção;
- Peso específico aparente;
- Vazão sólida afluyente;
- Vazão sólida efluente;
- Volume sólido depositado em relação ao volume total do reservatório.

O peso específico aparente médio dos depósitos é calculado pelo método de Lara e Pemberton (1965), por meio de equações matemáticas e de acordo com o tipo de operação do reservatório, sendo necessário o conhecimento das frações médias de argila, silte e areia presentes nos sedimentos.

O *software* DPOSIT visa a modelagem da forma de deposição dos sedimentos dentro do reservatório, a partir da metodologia desenvolvida por Borland & Miller, descrita anteriormente.

Como dados de entrada, o programa requer a inserção da curva cota x área x volume original do reservatório, ou seja, a curva anterior ao seu enchimento, e o volume de sedimento depositado a cada intervalo de tempo a ser modelado, obtidos do SEDIMENT.

A partir da inserção dos dados de entrada, o *software* determina o tipo de reservatório, de acordo com o método de Borland & Miller, que estabelecem uma relação entre as porcentagens de sedimento depositado e a forma do reservatório. O *software* sugere o tipo de reservatório de maior incidência, ou seja, aquele que apresenta a maior porcentagem, mas o usuário pode fazer a escolha final com bases nos resultados indicados pelo *software*.

Os resultados da modelagem podem ser visualizados no formato de tabelas ou através de curvas cota x área x volume, de acordo com cada intervalo de tempo modelado. As tabelas apresentarão dados para diferentes cotas referentes à área original, ao volume original, à área final e ao volume final.

2.4.3.5. Levantamento batimétrico por sondagem acústica

O levantamento batimétrico de reservatórios, realizado por meio de sondagem acústica, consiste no rastreamento do relevo submerso a partir da emissão de pulsos sonoros que se propagam pela água até atingirem o fundo do reservatório.

O ecobatímetro atua tanto como emissor quanto como receptor dos pulsos sonoros. O equipamento responsável pela emissão e recepção dos pulsos é denominado transdutor. A profundidade de um ponto qualquer do terreno é obtida a partir da emissão de um pulso e a medição da velocidade com que este mesmo pulso retorna ao ecobatímetro. A partir da velocidade de propagação do som e o tempo gasto para o pulso retornar ao equipamento, calcula-se a profundidade daquele ponto.

O tempo percorrido pelo pulso acústico depende da sua velocidade de propagação na água. Com o conhecimento da velocidade de propagação do som na água e da distância entre o transdutor e a superfície da água, a profundidade corrigida pode ser calculada a partir da medição do tempo percorrido pelo pulso (USACE, 2002). Esta profundidade pode ser expressa pela seguinte equação:

$$D = \frac{1}{2} (V \cdot t) + k + d_r$$

Em que,

D = distância corrigida a partir da superfície da água como referência;

V = média da velocidade do som na água;

t = tempo médio decorrido desde transdutor até o fundo do terreno e de volta ao transdutor;

k = constante índice do sistema;

d_r = distância do transdutor até a superfície da água de referência, distância conhecida como *draft*.

A constante k é determinada a partir de calibrações periódicas do equipamento. A velocidade do som em água doce é cerca de 1.480 m.s^{-1} e em água salgada

cerca de 1.530 m.s^{-1} , podendo ser determinada pela técnica do *bar check* ou por uma sonda.

A área rastreada, por cada feixe de pulso acústico emitido pelo transdutor, é função do ângulo de abertura do feixe e da profundidade até o fundo do terreno. Feixes mais estreitos mapeiam áreas menores, proporcionando uma distorção menor das características do fundo do terreno (USACE, 2002). A área mapeada, por cada feixe, pode ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$A = 3,14 \cdot D^2 \cdot \tan^2(\alpha/2)$$

Em que,

A = área do terreno mapeada pelo feixe acústico;

D = profundidade, ft;

α = ângulo de abertura do feixe.

2.4.3.5.1. Ecobatímetro monofeixe

No sistema monofeixe, também conhecido com *single beam*, um feixe único é emitido, retornando apenas um valor de profundidade para determinado intervalo de tempo. A projeção deste feixe se dá na forma de um cone formado pelo ângulo do feixe, sendo a altura deste cone equivalente à profundidade abaixo do transdutor.

Em levantamentos batimétricos em larga escala, é necessária a obtenção de medições precisas da profundidade, além da realização de um número elevado de medições dentro de um intervalo de tempo razoável (SEABEAM INSTRUMENTS, 2000).

Apesar da simplicidade no uso e no entendimento, dos custos menores e do processamento rápido, o ecobatímetro monofeixe possui uma série de limitações que o torna impróprio para levantamentos batimétricos em grandes reservatórios.

Uma das limitações do ecobatímetro monofeixe ocorre após a emissão do pulso sonoro, quando se supõe que a primeira onda sonora oriunda deste pulso, determine a profundidade do local imediatamente abaixo da embarcação. Esta situação ocorre ao se assumir o fundo do terreno como plano (Figura 7). Contudo, erros frequentes ocorrem em situações onde a primeira onda a atingir o terreno não necessariamente atinge o ponto imediatamente abaixo da embarcação. Em um terreno irregular, a primeira onda pode atingir primeiro um ponto mais afastado daquele localizado imediatamente abaixo da embarcação, como ilustrado na Figura 8 (SEABEAM INSTRUMENTS, 2000).

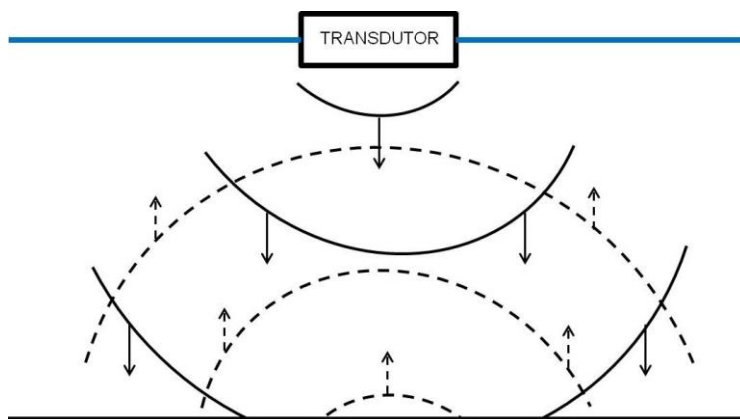


Figura 7 - Propagação de pulso sonoro em terreno plano, a partir de um ecobatímetro monofeixe.

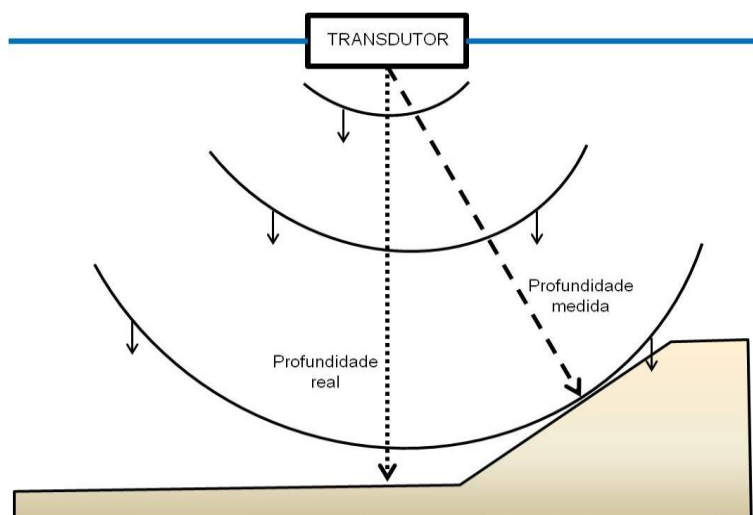


Figura 8 - Propagação de pulso sonoro em terreno irregular, a partir de um ecobatímetro monofeixe.

Por emitir apenas um feixe acústico, realizando uma medição de profundidade por vez, este equipamento torna-se pouco eficiente. A área realmente mapeada pelo equipamento é apenas aquela por onde o feixe percorre, o que demanda períodos maiores de tempo, caso seja desejado obter um mapeamento mais preciso da área. Toda a área que o equipamento deixou de mapear é interpolada durante o processamento dos dados, podendo ocultar informações importantes da área mapeada.

No levantamento batimétrico com o uso de um ecobatímetro monofeixe, o espaçamento entre as linhas a serem percorridas pela embarcação deve ser selecionado de forma a proporcionar a densidade de dados necessária para os resultados do estudo. A partir dos objetivos do estudo e do orçamento disponível, determina-se a densidade de dados a serem coletados. Geralmente, cerca de 5 por cento da área de estudo é mapeada pelo ecobatímetro monofeixe, o que implica que é preciso ter cuidado para coletar dados suficientes para garantir um mapeamento preciso da topografia submersa (FERRARI & COLLINS, 2006).

Segundo Morris & Fan (1997), o número de seções transversais a serem planejadas depende do tamanho e da geometria do reservatório, sendo necessário um mínimo de três seções, até mesmo para os menores represamentos. A média do número de seções utilizadas no levantamento batimétrico de 57 reservatórios com áreas entre 30 e 15.000 ha é dada pela fórmula:

$$\text{Número de seções} = 2,942 \cdot A^{0,3652}$$

Em que,

A = área da superfície do reservatório, ha.

De acordo com um guia técnico, elaborado pela ANA, com orientações para atualização das curvas cota-área-volume, para trabalhos com ecobatímetros de feixe únicos em PCHs, a equidistância entre as seções de sondagem deve ser obtida pela seguinte fórmula:

$$E_{ST} = (0,25 * A^{0,25}) / D$$

Em que,

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

A = área do reservatório em seu nível máximo maximorum, ha;

D = extensão do corpo principal do reservatório, km.

Para reservatórios pequenos e para garantia de um maior detalhamento do fundo do terreno a ser mapeado, Ferrari (2006) recomenda um espaçamento de 100 a 200 pés entre seções, o que significa seções espaçadas de aproximadamente 30 a 60 m.

2.4.3.5.2. Ecobatímetro multifeixe

No sistema multifeixe, também conhecido como *multibeam*, o fundo do terreno submerso é mapeado a partir de inúmeros feixes (Figura 9). Enquanto este instrumento é capaz de mapear grandes áreas em regiões profundas com uma única varredura, o sistema monofeixe demandaria vários ciclos de medições para fazer um mapeamento menos preciso da mesma área.

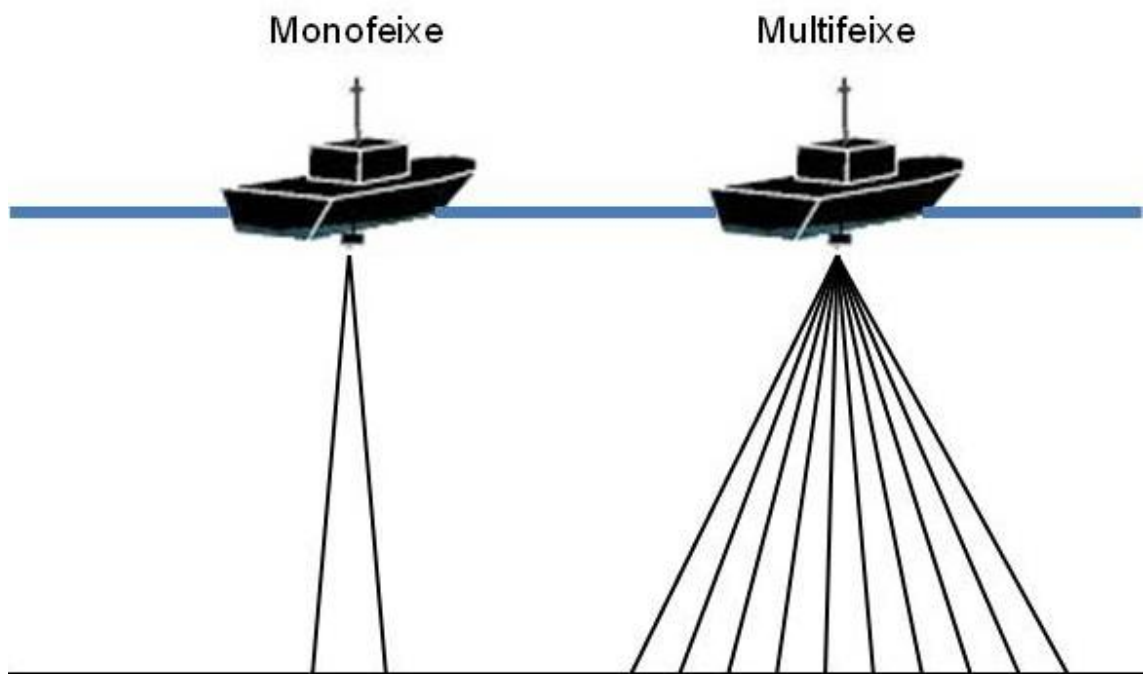


Figura 9 - Comparação sistemas monofeixe e multifeixe.

Enquanto, geralmente, cerca de 5 por cento da área estudada é mapeada por um ecobatímetro monofeixe, um ecobatímetro multifeixe permite o mapeamento de 100 por cento da área estudada, proporcionando um detalhamento elevado do fundo do terreno e reduzindo o tempo de coleta dos dados e a interpolação de áreas que não foram mapeadas. Porém, este sistema possui um custo elevado e demanda mais trabalho na operação e no processamento dos dados (FERRARI, 2006).

A calibração em campo de um sistema multifeixe é mais crítica e complicada do que aquela necessária no sistema monofeixe. São necessárias calibrações periódicas para assegurar posições precisas do equipamento. A posição do equipamento depende da habilidade do sistema em compensar erros pontuais causados por movimentos da embarcação, chamados de *heave*, *pitch*, *roll* e *yaw*. Um pequeno grau do movimento *roll* pode acarretar grandes erros nos feixes exteriores (FERRARI, 2006).

Os diferentes tipos de movimentos da embarcação que devem ser corrigidos durante a calibração do ecobatímetro multifeixe, podem ser visualizados no esquema da Figura 10.

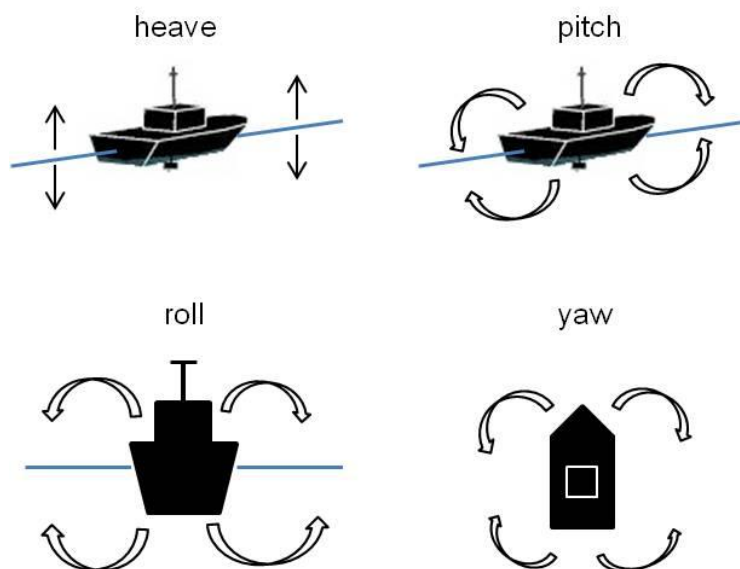


Figura 10 - Tipos de movimentos da embarcação.

Fazem parte do sistema multifeixe o compensador de ondas, responsável por medir o movimento vertical da embarcação (*heave*), o GPS girocompasso para

indicar a verdadeira direção da embarcação e corrigir o movimento *yaw*, e o MRU (motion reference unit) para medições de movimentos *pitch* e *roll*.

O método de calibração conhecido como *patch test* é realizado após a instalação dos equipamentos na embarcação, e inclui um teste de latência, para se medir o tempo de atraso da posição e testes para se determinar as correções dos movimentos *heave*, *pitch*, *roll* e *yaw* (FERRARI & COLLINS, 2006).

De acordo com Ferrari & Collins (2006), o *patch test* deve ser realizado em condições calmas na área de estudo. Para o teste de *roll*, deve-se escolher uma região de fundo plano e percorrer a embarcação em uma linha reta, nos dois sentidos. O teste de *pitch* consiste em percorrer uma linha, nos dois sentidos, sobre um terreno inclinado ou sobre um objeto submerso bem definido. O teste de *yaw* consiste em percorrer duas linhas paralelas sobre um terreno inclinado ou sobre um objeto submerso bem definido, sendo que o espaçamento entre as linhas paralelas deve ser o equivalente à duas vezes a profundidade local. No teste de latência do gps, a embarcação deve percorrer uma linha, em um terreno inclinado ou com um objeto submerso bem definido, duas vezes na mesma direção em diferentes velocidades. Um esquema com as linhas percorridas durante o *patch test* podem ser visualizadas na Figura 11.

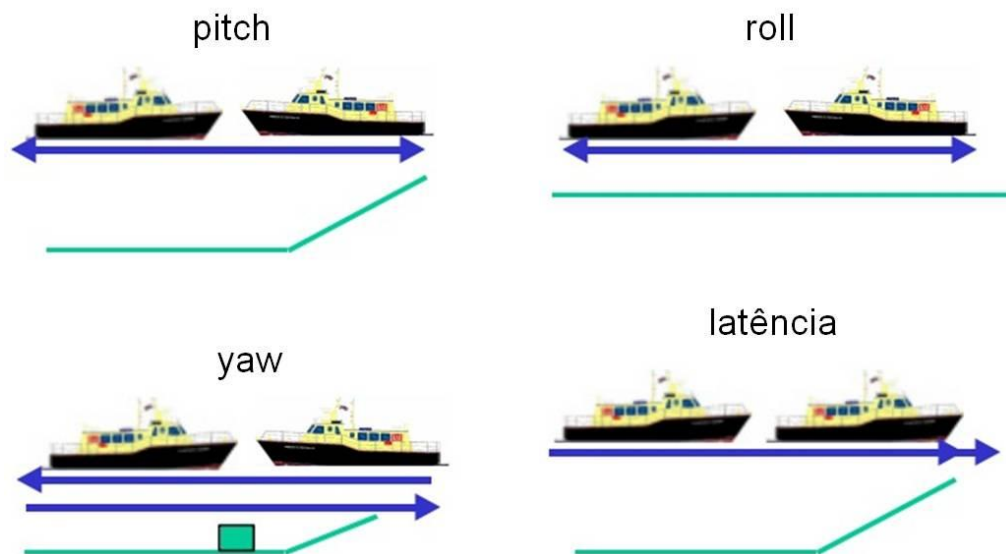


Figura 11 - Linhas percorridas no patch test. Fonte: Adaptado de USACE, 2002.

Além das correções de latência e movimentos da embarcação, deve-se calibrar o perfil velocidade do som na coluna d'água periodicamente, pelo menos uma vez ao dia ou mais frequentemente quando a embarcação muda para porções diferentes no local de estudo (FERRARI, 2006).

Segundo Morris & Fan (2010), todas as técnicas destinadas à estimativa do volume de um reservatório envolvem erros. Estudos de assoreamento objetivam medir com precisão a diferença entre sucessivos levantamentos batimétricos. Dessa maneira, o cálculo da taxa de sedimentação torna-se extremamente sensível a pequenos erros na estimativa do volume, principalmente em pequenas variações de volume advindas de um curto intervalo de tempo entre levantamentos ou a uma baixa taxa de sedimentação, ou mesmo quando os reservatórios são recentes e ainda não perderam nenhuma porcentagem significativa de seu volume total.

Para a atualização da capacidade de um reservatório e a avaliação da porcentagem de volume assoreado, Carvalho (2008) recomenda que seja realizado um levantamento a cada dois anos para pequenos reservatórios, um a cada cinco anos para reservatórios de tamanho médio e um a cada dez anos para grandes reservatórios.

2.5 Geração de MDE de reservatórios a partir de levantamento batimétrico

Na geração do modelo digital de elevação (MDE) de um reservatório para avaliação do assoreamento e cálculo da capacidade de armazenamento, o *U.S. Army Corps of Engineers* (2002) utiliza o modelo TIN na geração do MDE, a partir de dados de seções transversais.

Triangulated Irregular Network (TIN) é um meio digital para se representar a morfologia da superfície, sendo muito utilizado em sistemas de informação geográfica. Esta representação é formada a partir da triangulação de um conjunto de vértices (pontos), que são conectados com uma série de outros vértices para formar uma rede de triângulos. Existem diferentes métodos de interpolação para formar estes triângulos, sendo o método da triangulação de Delaunay (1934) um deles (ARCGIS HELP 10.1).

O Serviço Geológico Americano elaborou um relatório para a avaliação de mapas batimétricos, em que também recomenda o uso do modelo TIN na geração de MDE a partir de dados coletados em levantamentos batimétricos de pequenos reservatórios (USGS, 2006).

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (2011) elaborou um documento com orientações para atualização das curvas cota x área x volume, em que também recomenda a geração de MDE em formato TIN, a partir de dados obtidos durante o levantamento batimétrico.

Matos (2012) afirma que o método de interpolação TIN é utilizado para melhor representar a topografia do terreno submerso de reservatórios, permitindo uma melhor representação do relevo. Porém, segundo este mesmo autor e baseado na experiência do Núcleo de Hidrometria do CRHEA/EESC/USP, o método TIN não fornece uma boa representação em regiões próximas às bordas do reservatório, acarretando em uma perda de volume no cálculo final. Apesar deste fato, o método TIN é vastamente utilizado e recomendado pela literatura internacional e nacional.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

O reservatório da PCH Pipoca está localizado na bacia do rio Manhuaçu, umas das cinco subbacias da bacia hidrográfica do rio Doce. Esta última abrange uma área de 83.400 km², dos quais 86% situam-se no estado de Minas Gerais e 14% no estado do Espírito Santo (CUPOLILLO, 2008). As outras quatro subbacias são: Santo Antônio-Suaçuí, Médio Doce, Baixo Doce e Alto Doce (Figura 12).

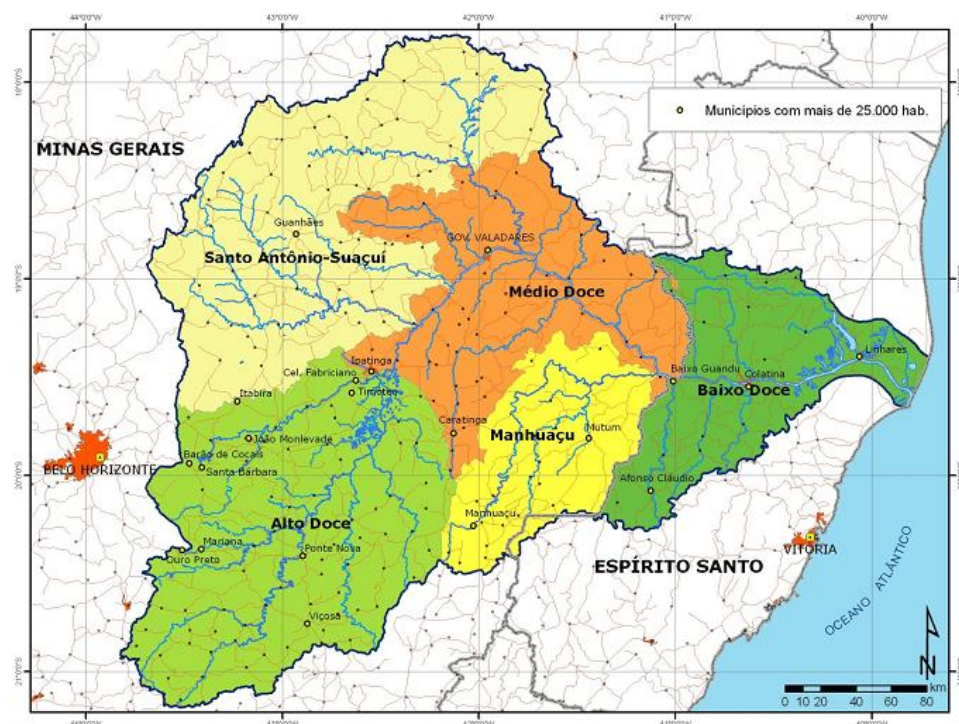


Figura 12 - Mapa da bacia hidrográfica do rio Doce (EPE, 2008)

A bacia hidrográfica do rio Doce está dividida em nove Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRHs), sendo seis delas pertencentes ao estado de Minas Gerais e três ao estado do Espírito Santo (Figura 13). As UPGRHs localizadas no estado de Minas Gerais foram estruturadas como Comitês de Bacia. As UPGRHs localizadas no estado do Espírito Santo foram estruturadas como Unidades de Análise (UA), ou seja, apenas para efeito de planejamento e caracterização de dados (IGAM, 2010a).

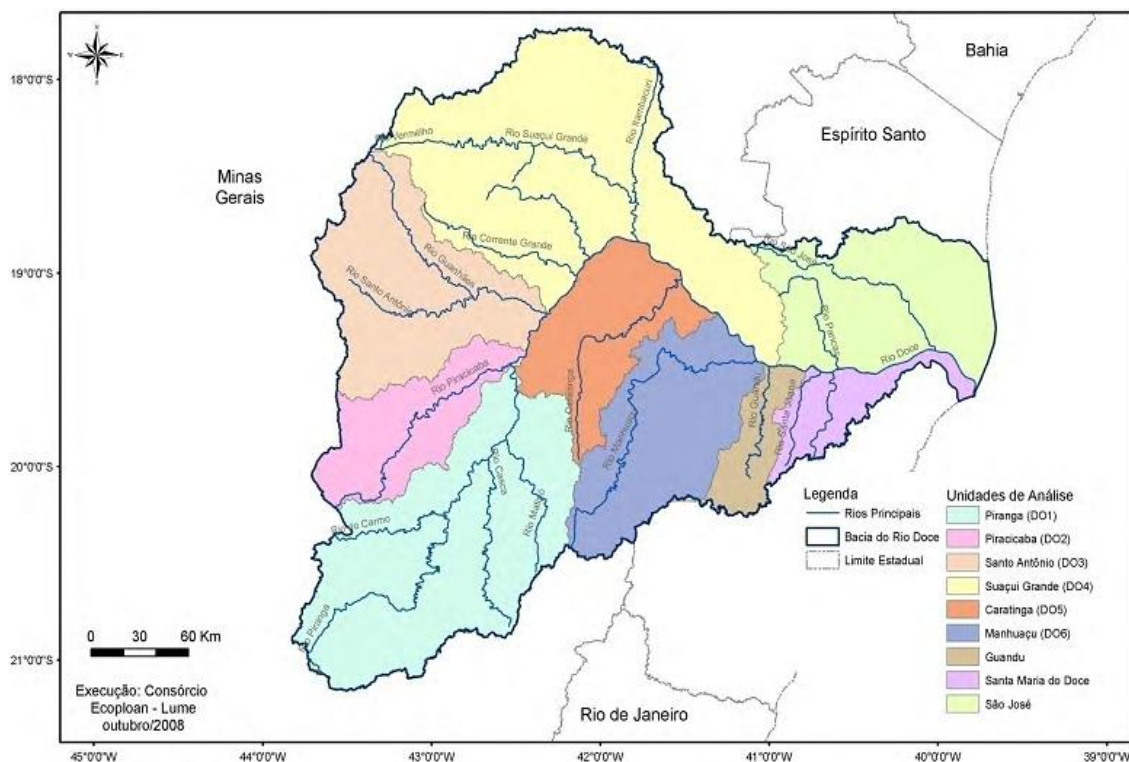


Figura 13 – Mapa das UPGRHs da bacia do rio Doce.

A UPGRH D06 (Comitê de Bacia Hidrográfica Águas do rio Manhuaçu), está localizada no sudeste do estado de Minas Gerais, divisa com Espírito Santo, ocupando uma área de 9.189 km². Esta UPGRH faz limite com as UPGRHs D01 (Piranga), D04 (Suaçuí) e D05 (Caratinga), e com a unidade de análise (UA) Guandú. É composta pela bacia hidrográfica do rio Manhuaçu (8.826,37 km²) e por uma pequena bacia adicional (362,68 km²) ao norte, que inclui pequenos córregos (Barroso, Barrosinho, Socesso, Natividade, Santana, da Barata e Lorena) (IGAM, 2010a).

Segundo dados do IBGE (2010), a população presente nesta região é representada principalmente pelas cidades de Manhuaçu (79.574 habitantes), Mutum (26.661 habitantes), Aimorés (24.959 habitantes) e Manhumirim (21.382 habitantes). Esta região apresentou um grau de urbanização de 63,65 % para o ano de 2007, valor com 11,44 pontos abaixo da média da fração mineira da bacia do rio Doce, com grau de urbanização médio de 75,09% (IGAM, 2010b).

Os principais cursos d'água que formam a UPGRH D06 são o rios Manhuaçu, Mutum, São Luís, Pocrane, Itueto, José Pedro e Capim. O rio Manhuaçu é o principal, percorrendo cerca de 347 km até desaguar no rio Doce.

Segundo documento do IGAM (2010a), atualizado por revisão bibliográfica, tem-se 8 PCHs e 1 UHE, todas em operação, situadas na UPGRH D06 (Figura 14). Deste total, seis PCHs estão localizadas no rio Manhuaçu, sendo elas: Sinceridade, Benjamim Mário Baptista, Neblina, Pipoca, Areia Branca e Cachoeirão. A PCH Pipoca está situada a jusante das PCHs Sinceridade, Benjamim Mário Baptista e Neblina, e a montante das PCHs Areia Branca e Cachoeirão. A PCH Cachoeirão apresenta a maior potência entre as PCHs localizadas no rio Manhuaçu, e a PCH Sinceridade a menor, cerca de dezenove vezes inferior à potência da PCH Cachoeirão. As outras duas PCHs estão localizadas no rio José Pedro, sendo elas: Varginha e Várzea Alegre. Na Tabela 3 têm-se as PCHs e a UHE localizadas na UPGRH D06, com seus respectivos rios e potência instalada, sendo a potência totalizada em 210,2 MW.

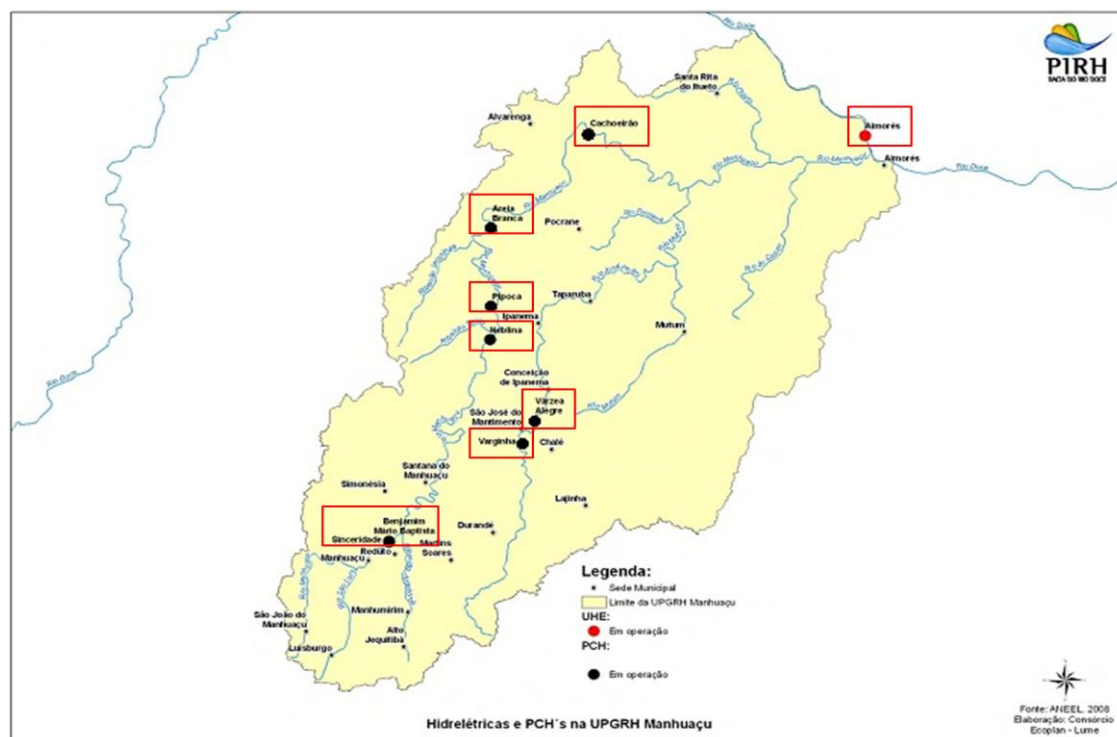


Figura 14 – UHE e PCHs localizadas na UPGRH Manhuaçu. IGAM (2010a) atualizado.

Tabela 3 – UHE e PCHs da UPGRH D06.

Nome	Tipo	rio	Potência
Cachoeirão	PCH	Manhuaçu	27
Areia Branca	PCH	Manhuaçu	19,8
Pipoca	PCH	Manhuaçu	20
Neblina	PCH	Manhuaçu	6,5
Várzea Alegre	PCH	José Pedro	7,5
Varginha	PCH	José Pedro	9,0
Benjamim Mário Baptista	PCH	Manhuaçu	9,0
Sinceridade	PCH	Manhuaçu	1,4
Aimorés	UHE	Doce	110

3.1.1. Reservatório da PCH Pipoca

A Hidrelétrica Pipoca S.A. está localizada no rio Manhuaçu, a jusante da PCH Neblina e a montante da PCH Areia Branca, entre os municípios mineiros de Caratinga e Ipanema. As coordenadas extremas estão localizadas entre os meridianos 41° e 42° 20' e entre os paralelos 19° 10' e 20° 40', sendo que o eixo do barramento está localizado na latitude 19° 46' 11,46" S e na longitude 41° 47' 20,64" W. A Figura 15 apresenta uma vista do eixo do barramento da PCH Pipoca.



Figura 15 - Eixo do barramento da PCH Pipoca (MG).

A PCH Pipoca recebe, adicionalmente, as águas do ribeirão Suíço, um tributário da margem esquerda do rio Manhuaçu (Figura 16). A foz deste ribeirão está localizada nas coordenadas aproximadas 19°49'1.48"S e 41°47'37"W. A área de contribuição da bacia do rio Manhuaçu até a PCH é de 2.240 km², aproximadamente um quarto da área total da bacia.

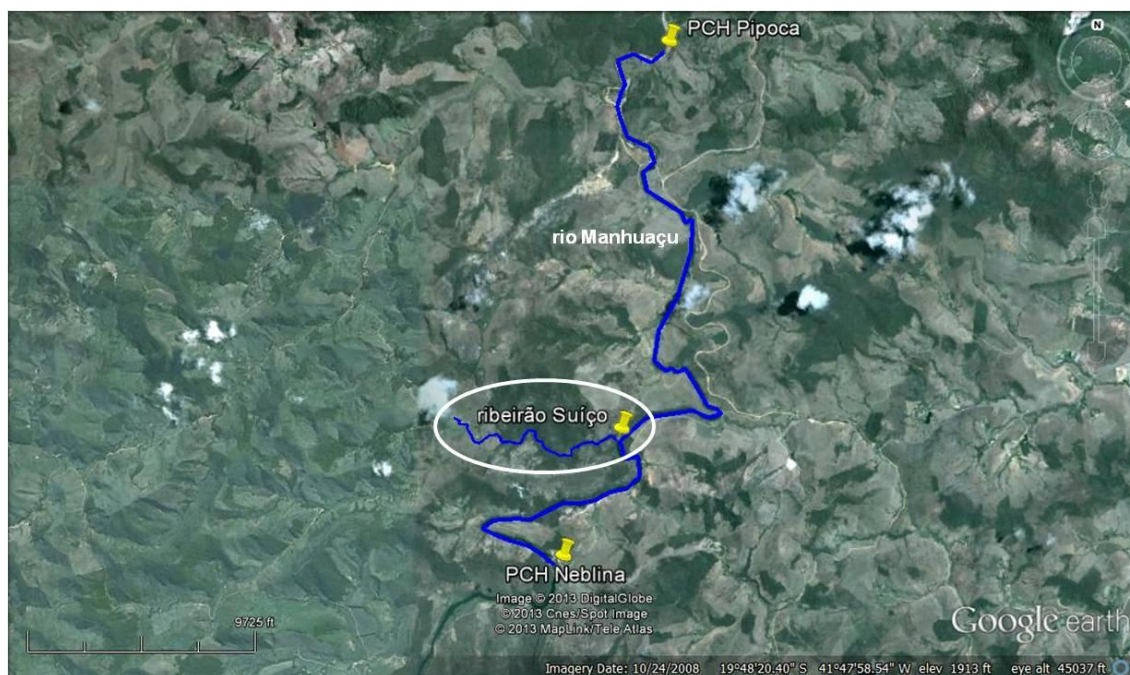


Figura 16 - Localização do ribeirão Suíço (MG).

A construção da PCH Pipoca teve início em outubro de 2006. O seu funcionamento começou em outubro de 2010. A empresa Omega Energia Renovável S. A. possui 51 % de participação e é responsável por sua operação; o restante, 49%, pertence à empresa sócia CEMIG.

Com uma área de 110 ha, abrangendo o reservatório, o canteiro e 20 ha de área de preservação permanente, o empreendimento foi construído com a finalidade de geração de energia elétrica, através de uma potência instalada de 20 MW (OMEGA, 2010). Na Tabela 4 têm-se as características principais da PCH Pipoca, retiradas do projeto básico da hidrelétrica (SPEC, 2007).

Tabela 4 – Características principais da PCH Pipoca.

Característica a montante	
N.A. máximo maximorum (TR = 10.000)	403,58 m
N.A. máximo normal	400,50 m
N.A. mínimo normal	399,50 m
Área no N.A. máximo maximorum	121 ha
Área no N.A. máximo normal	85,5 ha
Área no N.A. mínimo normal	75 ha
Volume no N.A. máximo maximorum	11,532 hm ³
Volume no N.A. máximo normal	8,186 hm ³
Volume no N.A. mínimo normal	7,426 hm ³
Vazão média a longo termo (1931 a	36,80 m ³ /s
Vazão afluyente média	38,35 m ³ /s
Comprimento do reservatório	5,64 km
Barragem	
Tipo	Enrocamento na margem esquerda e gravidade em concreto na margem direita
Vertedouro	Soleira livre
Queda bruta	49,20 m
Queda líquida	47,44 m
Comprimento do vertedouro	100 m
Altura máxima do vertedouro	26 m
Cota da crista d'água	405 m
Cota da soleira da tomada d'água	384 m
Turbinas	
Número	3
Tipo	Francis Eixo
Potência nominal unitária	7,03 MW
Queda de referência	44,50 m
Engolimento máximo	52,98 m ³ /s
Geradores	
Tipo	Trifásico
Potência	7.330 kVA
Rotação	400 rpm
Comportas	
Número	1
Tipo	Deslizante
Vão livre	4.000 mm
Altura livre	6.000 mm
Túnel de adução	
Tipo	Arco-retângulo
Largura = Altura	5,75 m
Extensão	1.832 m

3.1.2. Geologia

A região das cidades de Ipanema e Caratinga encontra-se inserida no território que pertence à Província Estrutural Mantiqueira, uma das quinze Províncias Estruturais encontradas no território brasileiro (Figura 17). Cada Província reúne regiões com feições estratigráficas, tectônicas, magmáticas, metamórficas e geomórficas características (CPRM, 2003).

A Província da Mantiqueira se estende por parte dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia, sendo caracterizada pela ocorrência de rochas metamórficas de origem pré-cambriana.

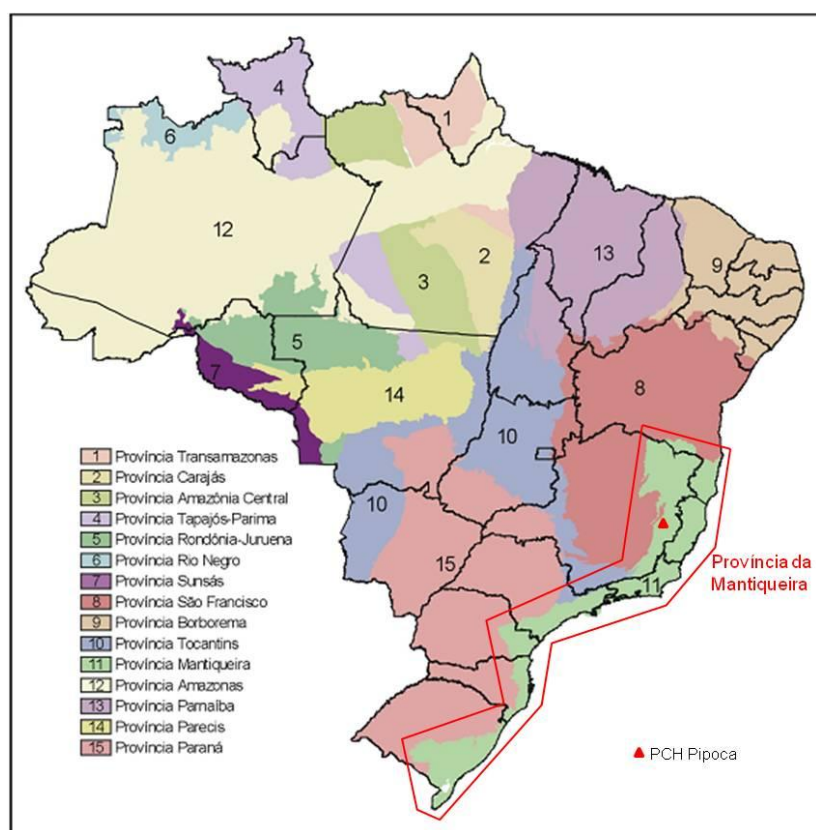


Figura 17 - Províncias Estruturais Brasileiras. Fonte: CPRM, 2003.

O substrato geológico da região do empreendimento é composto por rochas metamórficas de idade pré-cambriana, como as rochas dos Complexos Pocrane e Juiz de Fora, e por unidades geológicas mais recentes provenientes de rochas sedimentares e intrusivas, englobando o Grupo São Tomé, o Grupo Crenaque, a Suíte Intrusiva Galiléia e a Suíte Intrusiva Aimorés (SPEC, 2007).

Os Complexos Pocrane e Juiz de Fora são unidades que pertencem ao embasamento do Orógeno Araçuaí, que compreende majoritariamente os complexos Guanhães, Gouveia, Porteirinha, Mantiqueira e Juiz de Fora. O domínio externo desse embasamento é compreendido pelo Craton do São Francisco, enquanto o domínio interno apresenta a exposição de volumosos corpos granitoides (NOCE *et al.*, 2007).

O Complexo Pocrane, situado na porção oriental do embasamento do Orógeno Araçuaí, é a unidade geológica mais representativa da região do empreendimento, ocorrendo principalmente na sua porção sudoeste. De acordo com BRASIL (1983):

O Complexo é caracterizado pela presença de biotita e/ou hornblenda gnaisses bem foliados, com ou sem granada, localmente exibindo mobilizados migmatíticos e metatexitos com paleossomas anfibolíticos e/ou hornblenda gnaisses. São também encontrados ortognaisses granodioríticos-tonalíticos, gnaisses quartzo-feldspáticos, com intercalações até decimétricas, formando estruturas dobradas anisopacas, além de xistos e quartzitos subordinados.

O Complexo Juiz de Fora situa-se na fronteira dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, e é caracterizado pela presença de ortognaisses e metabasitos com paragêneses metamórficas da fácies granulito, e hornblenda e biotita originados a partir de piroxênios (NOVO, 2013).

O Grupo São Tomé, localizado ao norte da região, é composto de quartzo-biotita xistos, com granada e sillimanita, apresentando intercalações restritas de biotita-quartzo xistos e lentes de calcossilicáticas, raramente gnáissicas, intercalações subordinadas de quartzitos, anfibólio xistos, mármore e migmatitos de injeção nas proximidades de corpos granitoides (SPEC, 2007).

O Grupo Crenaque, localizado na porção central, é uma unidade litológica de origem essencialmente sedimentar, composta por quartzitos puros a muscovita, granulação média a grosseira, ocasionalmente fina, coloração creme e intercalações subordinadas de biotita-xisto granatíferos com estauroлита e/ou sillimanita e mármore (SPEC, 2007).

A Suíte Intrusiva Galiléia está localizada, em sua maioria, na porção nordeste da região. Esta unidade representa um conjunto de rochas ígneas, cuja

composição varia de tonalítica a granítica, ricas em encraves microgranulares e diques sinistruivos. A litologia apresenta-se na forma de um biotita-quartzo diorito a hornblenda, gradando para granito a granodiorito (BRASIL, 1983).

A Suíte Intrusiva Aimorés é uma unidade, pequena e isolada, próxima da cidade de Itanhomi (MG) composta de rochas de termos graníticos a tonalíticos, de granulação grossa, com megacristais de feldspato maciços ou com foliação cataclástica, e possuem raros encraves microgranulares e xenólitos (BRASIL, 1983).

A geologia local do empreendimento da PCH Pipoca foi caracterizada a partir de observações de campo e por meio de sondagens executadas no local. As sondagens revelaram um maciço rochoso composto de um gnaisse-granítico de textura média a fina, coloração cinza e foliação fraca a moderada. Localmente ocorrem hornblenda gnaisse, anfíbolitos, veios de pegmatitos e rochas de composição gabrótica (SPEC, 2007).

Na área do barramento, o maciço são aflora no leito e margens do rio, como pode ser observado na Figura 18, que apresenta uma foto tirada imediatamente a jusante do barramento. Nas ombreiras direita e esquerda ocorrem vários afloramentos de rocha são entremeados por solos coluvionares e residuais. Na região da calha do rio, ocorre no maciço rochoso são, um nível de rocha decomposta associado às juntas de alívio presentes na região (SPEC, 2007).



Figura 18 - Afloramento de rocha a jusante do barramento da PCH Pipoca (MG).

3.1.3. Geomorfologia

A região do empreendimento não apresenta um relevo íngreme de destaque, caracterizando-se por uma topografia constituída de morrotes e colinas sob uma superfície com marcas severas de erosão. As cotas variam entre 500 m, nos níveis mais elevados, e 350 m no nível mais inferior, localizado a jusante do eixo do barramento (LIMIAR, 2008).

A feição geomorfológica mais significativa da região é representada por grandes falhamentos, que controlam a calha do rio Manhuaçu, sendo a cidade de Santo Antônio do Manhuaçu o termo médio deste sistema (LIMIAR, 2008).

O local do barramento da PCH Pipoca é constituído por um vale encaixado, assimétrico e constituído por ombreiras acentuadas, sendo a ombreira esquerda revestida por mata e a direita, por pastagem (SPEC, 2007).

A jusante da Ponte de Pedra, localizada a aproximadamente 3 km do barramento, o rio Manhuaçu percorre um vale encaixado com encostas íngremes, e, a montante, o rio percorre por um vale mais aberto e de fundo plano, onde estão concentrados depósitos aluviais e trechos de várzeas (LIMIAR, 2008).

A jusante desta ponte, o leito do rio Manhuaçu é controlado por um complexo estrutural, apresentando trechos com rochas expostas e corredeiras. Falhas

presentes na região ditam o rumo do rio na área do reservatório (LIMIAR, 2008).

Fatores naturais aliados a uma intensa intervenção antrópica na região, marcam o atual comportamento morfodinâmico da bacia do rio Manhuaçu, caracterizado por uma intensa atividade erosiva. Estes padrões erosivos são comuns à toda a bacia do rio Doce (LIMIAR, 2008).

Devido à natureza do substrato rochoso, a bacia do rio Manhuaçu apresenta uma tendência natural à erosão, que é agravada pela supressão da vegetação nativa. Devido a estes processos erosivos, ocorre um acentuado aumento das cargas de sólidos em suspensão no rio, principalmente durante as fortes chuvas de verão. Pode-se verificar ao longo do rio vales colmatados por sedimentos arenosos, resultantes de processos erosivos que ocorrem nas encostas ao longo dos vales (LIMIAR, 2008).

3.1.4. Pedologia

As principais classes de solo existentes na região do empreendimento foram identificadas e mapeadas, podendo ser observadas na Figura 19. Foram identificadas 5 tipos de solos:

- Cambissolo;
- Latossolo
- Podzólico;
- Aluvial;
- Hidromórfico.

Os solos da região do empreendimento apresentam as seguintes características:

- Cambissolo: é um solo pouco desenvolvido, constituído por material mineral e por um horizonte B incipiente. As características desse tipo de solo variam de acordo com a localidade, devido à heterogeneidade do material de origem, do relevo e das condições climáticas locais. Um horizonte B incipiente deve apresentar no mínimo 10 cm de espessura, dominância de cores brumadas, amareladas e avermelhadas, textura franco arenosa ou mais argilosa, desenvolvimento de unidades estruturais no solo e ausência da estrutura da rocha original, teor de argila mais elevado que o horizonte subjacente, conteúdo de argila menor, igual ou pouco maior que o do horizonte A e remoção de carbonatos (EMBRAPA, 2009).

Na região do empreendimento encontram-se associações de cambissolo com solo podzólico, podzólico vermelho amarelo e latossolo vermelho amarelo.

- Latossolo: trata-se de um solo muito intemperizado, evoluído e profundo, constituído por material mineral e por um horizonte B latossólico. Geralmente, são fortemente ácidos, apresentam baixa capacidade de troca catiônica, baixa saturação por bases, são distróficos ou alumínicos e variam de fortemente a bem drenados. Têm sequência de horizontes A, B e C, sendo que o horizonte B possui cores que variam do amarelo ao vermelho, dependendo da natureza e quantidade de seus constituintes. O horizonte B latossólico é um horizonte com avançado grau de intemperização, evidenciado pela transformação quase que PR completa dos minerais alteráveis. Em geral, este horizonte é constituído por óxidos de ferro e de alumínio, argilominerais do tipo 1:1, quartzo e outros minerais resistentes ao intemperismo (EMBRAPA, 2009).

Na região do empreendimento encontram-se latossolos vermelho amarelo associados a solos podzólicos vermelho amarelo e a cambissolos.

- Podzólico: o solo podzólico vermelho-amarelo eutrófico encontrado na região do empreendimento, está incluído na classe dos luvisolos. Os luvisolos são solos minerais, não hidromórficos, apresentam um horizonte B textural e possuem argila de atividade alta e alta saturação por bases. Estes solos podem variar de bem drenados a imperfeitamente drenados, são pouco profundos, com uma profundidade variando de 60 a 120 cm, e apresentam sequência de horizontes A, Bt e C, com transição clara ou abrupta do horizonte A para Bt, devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura entre eles. Um horizonte B textural apresenta uma coloração avermelhada, amarelada e menos frequentemente, brunada ou acinzentada, textura franco arenosa ou mais argilosa, teor de argila maior que o do horizonte A ou E e pode, ou não, apresentar um teor maior que o presente no horizonte C, e apresenta cerosidade constituída de materiais coloidais minerais que promovem um aspecto lustroso e brilho graxo (EMBRAPA, 2009).
Na região do empreendimento encontram-se associações de podzólico vermelho amarelo com solo aluvial, latossolo, latossolo vermelho amarelo e hidromórfico.

- Aluvial: estes solos estão incluídos na classe dos neossolos, que são solos jovens que sofreram baixa atuação de processos pedogenéticos. Estes solos são constituídos por material mineral, ou orgânico pouco espesso, sem alterações expressivas em relação ao material de origem. (EMBRAPA, 2009).
Na região do empreendimento encontram-se solos aluviais eutróficos com horizonte A moderado, associados a solo podzólico vermelho amarelo.

- Hidromórfico: Na região do empreendimento encontra-se uma pequena região com solo hidromórfico indiscriminado associado a solo podzólico vermelho amarelo.

3.1.5. Uso e ocupação do solo

A região da área de estudo é ocupada por porções de Floresta Estacional Semidecidual na forma de mata, capoeira e capoeirinha, Floresta Estacional Decidual na forma de capoeira, mata ciliar, pastagens, brejo e áreas cultivadas por culturas temporárias e permanentes (Figura 20).

Estão distribuídos pela região da área de estudo fragmentos isolados de Floresta Semidecidual, na forma de remanescentes secundários em diferentes estágios de regeneração. Predominam as formas de capoeira, situadas, principalmente, nas regiões mais altas de encostas (LIMIAR, 2008).

A Floresta Estacional Decidual, também conhecida como Floresta Tropical Caducifólia, ocorre na região na forma secundária de capoeira, isoladamente e na associação com afloramento rochoso (LIMIAR, 2008).

Apenas pequenos fragmentos de Mata Ciliar são encontrados ao longo do trecho estudado do rio Manhuaçu. A mata foi intensamente degradada devido à implantação de atividades agropecuárias, restringindo-se a pequenos trechos mais encaixados dos vales (LIMIAR, 2008).

As pastagens ocupam a maior parte do terreno da região estudada, sendo representadas por uma cobertura vegetal composta com o predomínio de espécies forrageiras (LIMIAR, 2008).

Próximo ao curso d'água encontram-se fragmentos de brejo em áreas de várzea. Esta fisionomia ocupa áreas de solos hidromórficos, permanecendo alagada a maior parte do ano. Há o predomínio de uma vegetação de caráter herbáceo, com espécies vegetais adaptadas a solos com baixa aeração. Os brejos são encontrados em pequenas áreas, muito alteradas devido ao seu uso como pastagem, além de sofrerem com o constante efeito do assoreamento (LIMIAR, 2008).

As áreas cultivadas são utilizadas principalmente para os cultivos de café, milho, cana, pomares residenciais e capineiras para alimentação animal. Excluindo o cultivo do café, os demais cultivos apresentam, geralmente, caráter de subsistência, ocupando pequenas áreas de terra (LIMIAR, 2008). No ano de

2012 foram observadas áreas ao longo do rio destinadas ao cultivo de eucalipto, sendo muitas delas ocupando áreas muito próximas às margens do rio. Além do eucalipto, foi observada a presença de gado bovino também próximo às margens do rio.

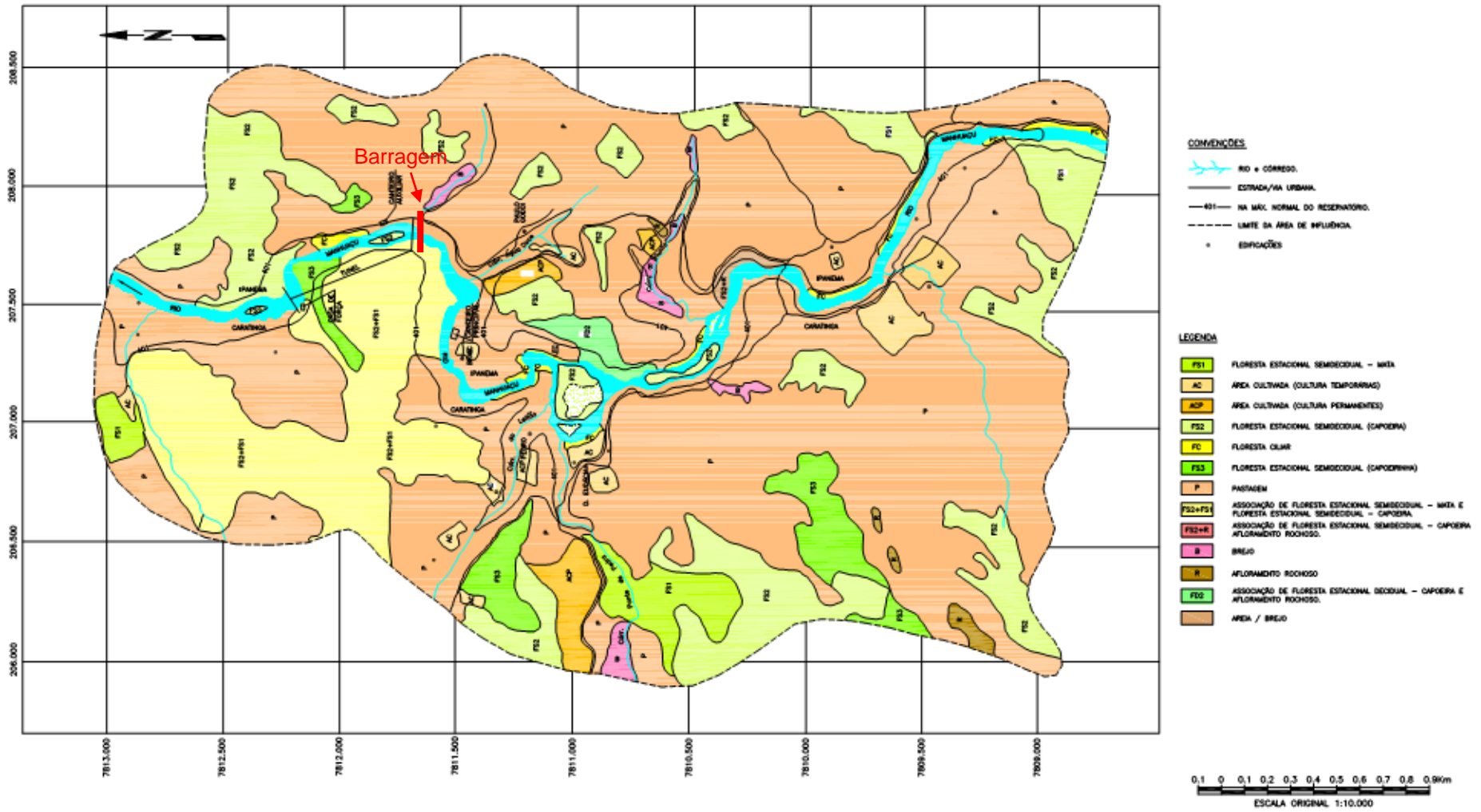


Figura 20 - Mapa de uso e ocupação do solo da região do empreendimento (LIMIAR, 2000)

3.1.6. Clima

O clima predominante na região estudada é similar ao clima característico de toda a bacia do médio rio Doce. De acordo com a classificação do sistema Köppen, esta região é do tipo Aw, quente e úmido, com estações seca no inverno e úmida no verão (LIMIAR, 2008).

A estação climatológica de Caratinga foi tomada como respresentativa para o local da PCH Pipoca. Esta estação é operada pelo INEMET (código 83592) e está localizada na latitude -19.73° , longitude -42.13° e altitude 609.65 m.

A temperatura média anual é de $21,2^\circ\text{C}$, com mínima de $16,5^\circ\text{C}$ e máxima de $27,2^\circ\text{C}$. Por ser muito influenciada pela altitude regional, a temperatura é muito variável ao longo do ano. Valores mais baixos ocorrem nos meses de junho a agosto e mais altos em janeiro e fevereiro, acompanhados por uma intensa precipitação (LIMIAR, 2008).

A umidade relativa apresenta-se mais alta pela manhã e mais baixa à tarde. Os valores são mais altos na estação chuvosa e mais baixos na estação seca, apresentando um valor médio anual em torno de 77,2% (LIMIAR, 2008).

A velocidade média dos ventos apresenta pouca variação durante o ano, oscilando de $1,3 \text{ m.s}^{-1}$ à $1,6 \text{ m.s}^{-1}$, com média anual de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ na direção N/SE (LIMIAR, 2008).

A evaporação total anual é registrada em torno de 1124,5 mm, com uma média mensal variando entre 77,6 mm, para o mês de abril, e 112,2 mm, para o mês de setembro (SPEC, 2007).

3.1.7. Regime Pluviométrico

A bacia do rio Manhuaçu apresenta um regime pluviométrico caracterizado por dois períodos bem definidos, um chuvoso, com precipitações abundantes, nos meses de outubro a março, e um de estiagem nos demais meses do ano.

Para a caracterização da pluviometria na região do empreendimento foram utilizados dados pluviométricos médios mensais de 4 estações utilizadas no

projeto do empreendimento. As características das estações são apresentadas na Tabela 5, e a localização na Figura 21.

Tabela 5 - Características das estações pluviométricas utilizadas (Adaptado LIMIAR, 2008).

Código	Estação	Dados	Localização		
			Latitude	Longitude	Altitude
1941006	Assaraí	Jan 1946 a Dez	19°35'41"S	41°27'29"W	172 m
1941010	S.S. Encruzilhada	Jan 1968 a Dez 2005	19°29'33"S	41°09'42"W	115 m
1941011	S. A. Manhuaçu	Jan 1970 a Dez	19°40'42"S	41°50'10"W	290 m
1941020	Aimorés	Jan 1970 a Dez	19°29'40"S	41°04'35"W	83 m

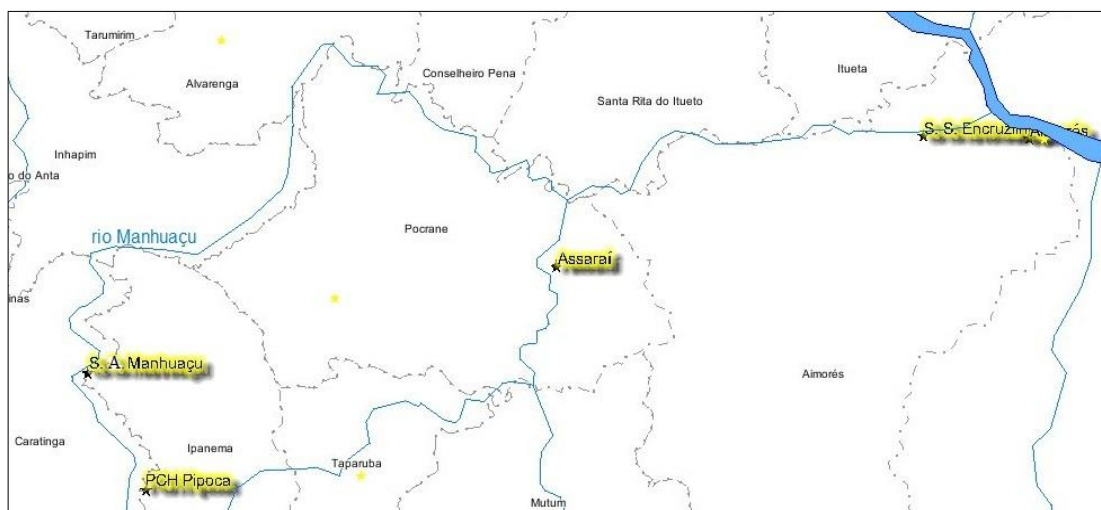


Figura 21 - Localização das estações pluviométricas analisadas (Adaptado SIAM, 2013).

A variação pluviométrica, ao longo do ano, é bem definida e caracterizada por um período chuvoso e um período seco, podendo ser claramente verificada nos dados de precipitação média das 4 estações utilizadas (Figura 22). O período chuvoso vai de outubro a março, com os maiores níveis nos meses de novembro, dezembro e janeiro, com médias de 185,98 mm, 202,58 mm e 176,08 mm, respectivamente. O período seco vai de abril a setembro, sendo mais crítico nos meses de junho, julho e agosto, com médias de 14,71 mm,

10,92 mm e 16,31 mm, respectivamente. A precipitação anual média é igual a aproximadamente 1020 mm.

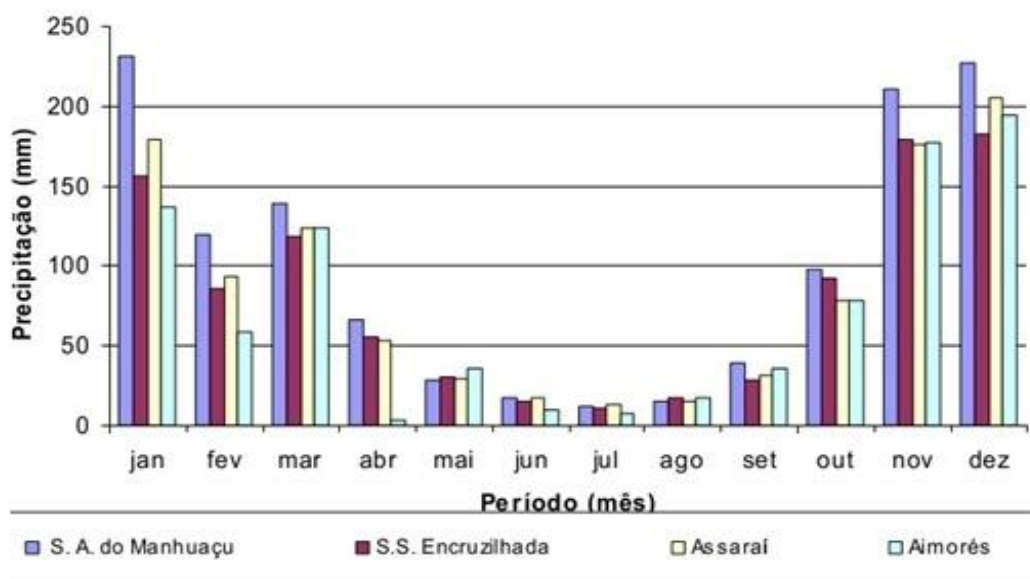


Figura 22 - Precipitações médias mensais das estações analisadas (LIMIAR, 2008).

3.1.8. Regime Fluviométrico

Os dados fluviométricos utilizados durante o estudo hidrológico do empreendimento foram obtidos a partir dos postos fluviométricos de Fazenda Bragança, Santo Antônio do Manhuaçu e São Sebastião da Encruzilhada. O posto de Fazenda Bragança, localizado no rio Manhuaçu a aproximadamente 2,5 km a jusante do eixo da PCH Pipoca, apresentou melhor caracterização do regime fluvial no local do empreendimento, em função da sua proximidade e por seu período de monitoramento ser superior a 20 anos (SPEC, 2007). As principais informações deste posto estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Principais informações da estação fluviométrica Fazenda Bragança.

Código	Estação	Área	Município	Localização		Entidade	Operação	
				Latitude	Longitude		Início	Fim
569766000	Fazenda Bragança	2270 km ²	Ipanema (MG)	19°44'35"S	41°47'07"W	ANA	1978	-

A partir da estação fluviométrica Fazenda Bragança, foi obtida a série de vazões média mensais para o local do barramento da PCH Pipoca, através de transferência, considerando a proporcionalidade entre as áreas de drenagem dos dois locais (LIMIAR, 2008). A equação de transferência utilizada no estudo foi a seguinte:

$$Q_{\text{PCH Pipoca}} = 0,9898 \cdot Q_{\text{F.Bragança}}$$

Com um coeficiente de transferência de 0,9898 e a partir da série de vazões da estação Fazenda Bragança, foi possível obter uma série de vazões correspondente para a PCH Pipoca, cujos valores máximo, médio e mínimo são apresentados na Tabela 7. Em 95% do tempo, a vazão permanece em $11,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, em 50 % do tempo em $27,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e em 5% do tempo em $86,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (LIMIAR, 2008).

Tabela 7 - Vazões da estação Fazenda Bragança e PCH Pipoca.

Local	Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		
	Máxima	Média	Mínima
Fazenda Bragança	296,0	35,80	6,10
PCH Pipoca	293,0	35,43	6,04

3.2. Material

3.2.1. Equipamentos utilizados na coleta de sedimentos

Para a realização da coleta de sedimentos do leito do reservatório da PCH Pipoca foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Barco a motor;
- Garmin GPSmap 60CSx;
- Guincho hidrométrico;
- Amostrador tipo Petersen;
- Tablado de madeira;
- Bacia de plástico;
- Sacos plásticos identificados;

O amostrador, em aço inox, utilizado na coleta de material do leito foi do tipo Petersen, de penetração vertical e do tipo caçamba de raspagem. Este

equipamento consiste de duas caçambas montadas em hastes, as quais são presas por cabos. O conjunto fica preso a uma corda resistente com 25 m de comprimento, enrolada em um carretel. Pode-se coletar aproximadamente 3kg de material, por vez (Figura 23).

Com o auxílio de um guincho hidrométrico, este equipamento fica suspenso, facilitando o seu manejo. O guincho foi fixado em um tablado de madeira preso ao barco, ficando firme e em uma posição adequada para a operação do mesmo.

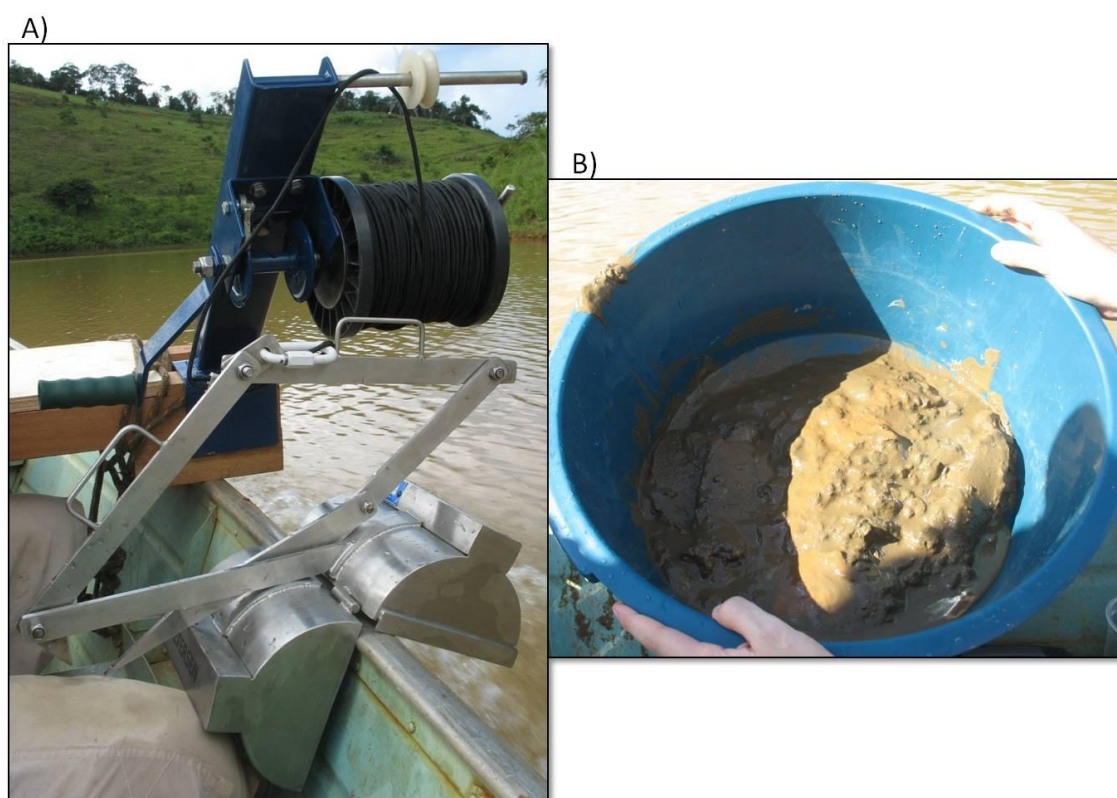


Figura 23 – A) Draga de Petersen e B) Material coletado.

3.2.2. Equipamentos utilizados na medição de vazão

Como a PCH Pipoca não realiza o monitoramento de vazão afluente ao seu reservatório, foi realizada uma medição no remanso, para se ter um conhecimento a respeito deste parâmetro. Para a sua realização foram utilizados os seguintes equipamentos (Figura 24):

- ADP RiverSurveyor M9;
- Hydroboard;
- GPS e antena;
- GPS-RTK e antena;
- Baterias;
- Tripé;
- Bluetooth dongle;
- Notebook;
- Corda;
- Metro.

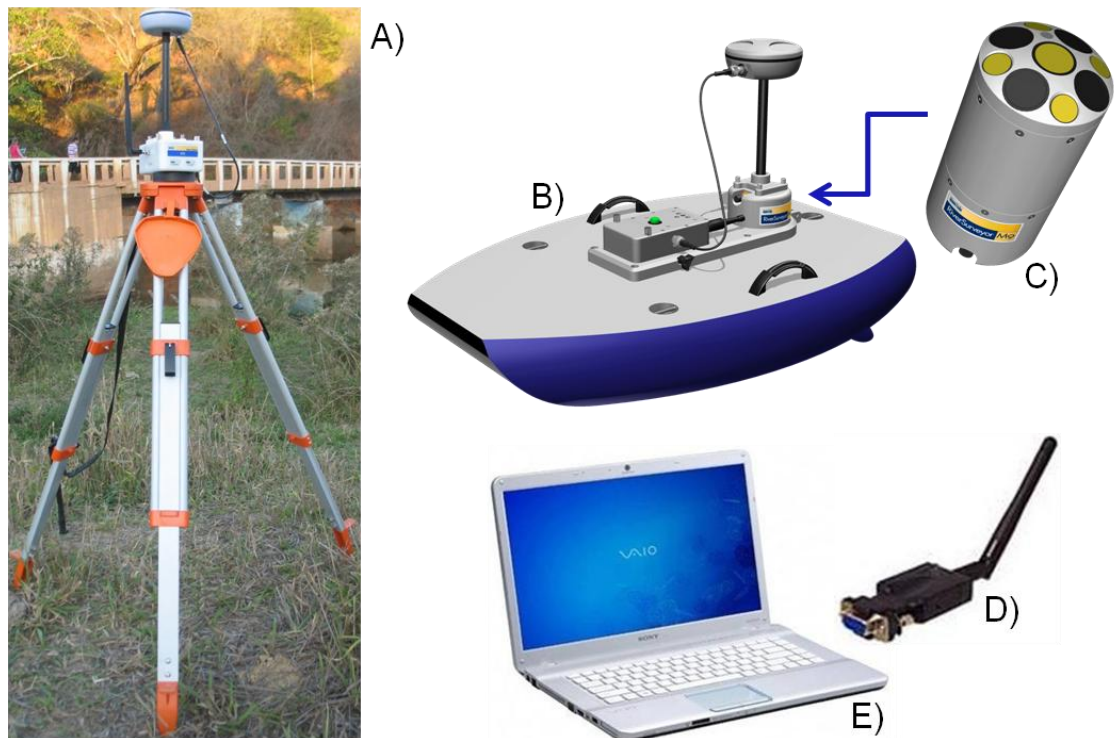


Figura 24 - Equipamentos utilizados na medição de vazão: A) tripé, B) hydroboard, C) ADP, D) bluetooth dongle e E) notebook.

O ADCP é um perfilador monostático, em que cada transdutor opera como um transmissor de ondas e, também, como um receptor. Trata-se de um medidor acústico de vazão instantânea que possui uma exatidão de 30 cm, ou melhor, em função das correções transmitidas em tempo real pela base fixa do GPS-RTK para o sistema móvel.

3.2.3. *Software* RiverSurveyor Live

O RiverSurveyor Live é o *software* utilizado na coleta e no processamento dos dados coletados pelo ADCP. Durante a medição da profundidade, este *software* possui um alcance de 0,3 m a 80 m no feixe vertical e 0,3 m a 40 m nos feixes de velocidade, além de uma exatidão de 1% da profundidade medida e de uma resolução de 1 mm. Na medição da velocidade da água, o alcance gira em torno de 10 m.s^{-1} , com uma exatidão de até $0,25 \text{ m.s}^{-1}$ da velocidade medida, resolução de 1 mm.s^{-1} e número de células de até 128.

Para o uso do *software* é necessário que o computador possua *Windows* Vista ou XP, processador de 1,6 MHz, memória de 1 GB, espaço disponível no HD de 1 GB e resolução de 1024 x 728. Utilizou-se a versão *firmware* 2.00.

O *software* possui cinco janelas (abas) principais: sistema, verticais, navegação, margens e travessia.

A aba do sistema possui um resumo de todas as configurações do sistema, como por exemplo, o registro de detalhes do local de medição, a profundidade do transdutor, a salinidade da água, a declinação magnética local e a distância das margens.

A aba das verticais mostra valores numéricos em tabela para cada vertical, referentes ao número da vertical, hora, distância do trajeto, número de satélites, profundidade, vazão, entre outros.

A aba da navegação oferece uma vista geral do trajeto feito pelo hydroboard e do perfil transversal do local de medição.

A aba das margens oferece a posição das margens esquerda e direita. Esta aba é uma boa referência para se avaliar a variação em posição original e em profundidade das margens.

A aba das travessias é utilizada para comparações de parâmetros ao longo de todo o trajeto, como as profundidades e o perfil de cada trajetória.

Existe ainda um painel lateral onde o operador pode visualizar a condição de cada vertical (etapa, hora, duração e comprimento da trajetória, temperatura da água, vazão, velocidades do barco e da água etc), escolher os parâmetros a serem mostrados e visualizar um gráfico do perfil vertical de toda a coluna d'água.

3.2.4. Dados de vazão afluente do reservatório

Foram fornecidos pela empresa ONEX O&M dados de vazão defluente (turbinada e vertida) da PCH Neblina, localizada nas coordenadas 19° 49' 58,20" S e 41° 48' 2,70" W, a aproximadamente 7 km a montante da PCH Pipoca.

Os dados são de setembro de 2010 a maio de 2013, totalizando 33 meses de medições diárias, a cada 15 min para os meses de outubro a dezembro de 2010, e uma vez por dia para os demais. Observaram-se algumas falhas nos dados fornecidos, com dias sem nenhum registro de vazão.

Adicionalmente aos dados de vazão medidos, foram fornecidos dados de vazão defluente previstos, diários a cada 30 min.

3.2.5. Equipamentos utilizados nos levantamentos batimétricos

O conjunto utilizado no primeiro levantamento batimétrico do reservatório foi constituído dos seguintes materiais e equipamentos (Figura 25):

- ecobatímetro monofeixe HY 1600 ECHOSOUNDER;
- DGPS Hemisphere R131;
- bateria estacionária de 12V;
- placa de metal;
- notebook;
- barco a motor.

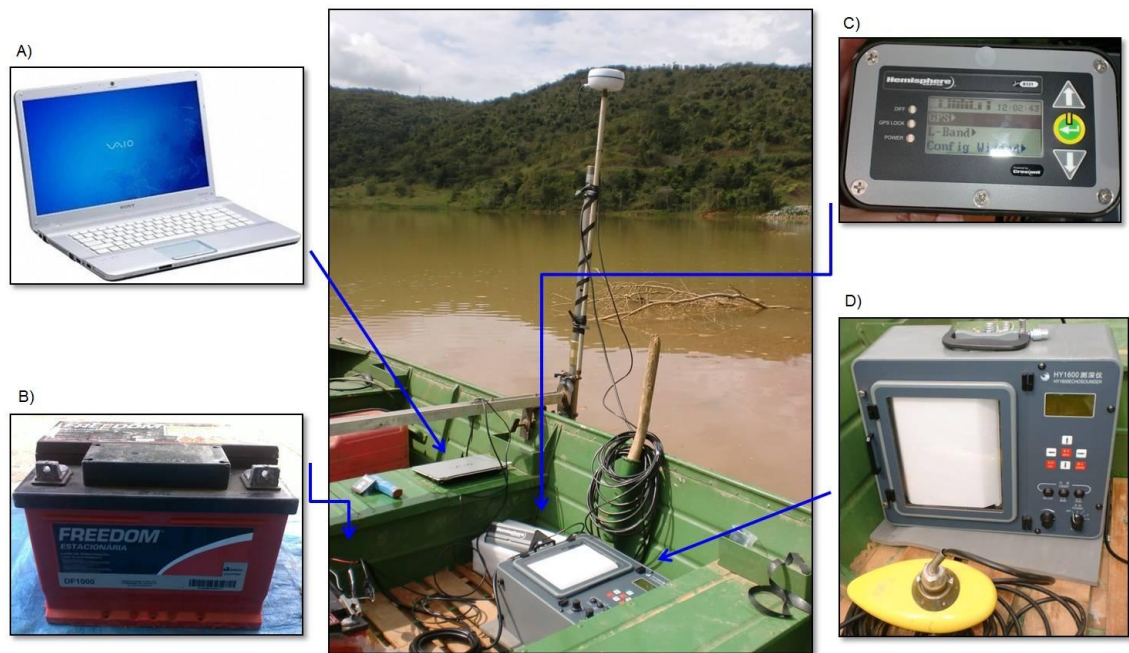


Figura 25 - Equipamentos utilizados na batimetria: A) notebook, B) bateria, C) DGPS e D) ecobatímetro.

O equipamento HY 1600 ECHOSOUNDER é um ecobatímetro monofeixe portátil utilizado do levantamento batimétrico de lagos, rios e áreas costeiras. Possui um alcance de medição de 30 cm a 300 m de profundidade, produzindo dados digitais de profundidade com uma exatidão de 0,1%.

O ecobatímetro possui um dispositivo denominado transdutor, responsável pela emissão dos pulsos sonoros que são refletidos ao atingirem o fundo do local. Com abertura do feixe de 8°, o transdutor calcula a profundidade a partir da diferença de tempo entre a emissão e a recepção do pulso, multiplicando-se a metade deste intervalo de tempo pela velocidade do som na coluna de água. O usuário pode acompanhar os dados fornecidos pelo conjunto em gráficos, gerados em papel térmico no interior do ecobatímetro ou em tempo real no *display* do painel frontal.

O método conhecido como *bar check* utiliza uma placa de metal, aço ou alumínio, para a calibração da velocidade de propagação do som na água. Esta é uma técnica muito comum utilizada em locais com profundidades de 20 a 30 m. Na aplicação deste método, a placa é colocada embaixo do transdutor e é suspensa vagarosamente em várias profundidades, através de um cabo de

comprimento conhecido. As profundidades observadas no ecobatímetro são comparadas com as profundidades conhecidas do cabo durante a descida da placa.

O sistema DGPS funciona com o apoio de três ou mais satélites orbitais, em que as coordenadas geográficas são calculadas automaticamente em função da posição dos satélites. No levantamento, fez-se uso da assinatura OnminiSTAR, possibilitando uma cobertura proporcionada por 8 satélites geoestacionários, que cobrem a maior parte continental da Terra.

O uso de um sistema composto por um ecobatímetro digital e por um DGPS permite a gravação simultânea de dados de profundidade de coordenadas geográficas.

O conjunto utilizado no segundo levantamento batimétrico do reservatório foi constituído dos seguintes equipamentos:

- ecobatímetro multifeixe SONIC 2022;
- *sonar interface module* (SIM);
- DGPS Hemisphere R131;
- GPS girocompasso;
- *motion sensor* DMS-10;
- *digibar S*;
- bateria estacionária de 12V;
- inversor de corrente;
- notebook;
- barco a motor.

O ecobatímetro multifeixe utilizado é de fabricação americana e possui um alcance de até 500 m, emissão de feixes variando de 10° à 160°, frequência de 200 à 400 kHz e resolução de 1,25 cm. Aliado ao ecobatímetro, o *sonar interface module* (SIM) é um módulo de comunicação entre o notebook e o ecobatímetro. O SIM fornece energia ao ecobatímetro, sincroniza dados de tempo e transmite dados para o notebook e comandos para o ecobatímetro.

O *motion sensor* DMS-10 utilizado é um compensador de ondas da marca americana Teledyne, permitindo a correção do movimento das ondas. O GPS girocompasso foi utilizado para permitir o registro da direção correta da embarcação.

O *digibar S* é um equipamento destinado à calibração da velocidade do som na água, através dos parâmetros de salinidade, temperatura e pressão. O *digibar S* utilizado é da marca Teledyne.

A Figura 26 apresenta o barco já montado, com todos os equipamentos necessários à segunda campanha batimétrica no reservatório da PCH Pipoca, utilizando o ecobatímetro multifeixe. A Figura 27 apresenta os principais equipamentos utilizados nesta batimetria.



Figura 26 - Barco montado para a batimetria com o ecobatímetro multifeixe.



Figura 27 - Principais equipamentos utilizados na segunda batimetria: A) ecobatímetro multifeixe, B) *sonar interface module*, C) GPS, D) *digibar* e E) *motion sensor*.

3.2.6. Pacote HYPACK (Hypack, Inc.)

HYPACK é um dos mais utilizados *softwares* de coleta e processamento de dados batimétricos no mundo. Fornece as ferramentas necessárias para planejar levantamentos, coletar e processar dados, e gerar produtos finais, além de calcular volume, gerar bordas e curvas de nível, e criar mosaicos de varredura. Para tanto, o *software* possui várias fases, uma de planejamento, uma de navegação e coleta de dados, uma de tratamento e processamento dos dados coletados e outra de geração de produtos finais.

Primeiramente, são configurados os parâmetros geodésicos para um determinado projeto, como unidade para distância e profundidade, elipsóide, sistema de projeção, entre outros.

No planejamento são criadas as seções batimétricas, ou seja, as linhas longitudinais e transversais que serão úteis na orientação do barco durante o levantamento. Nesta fase, pode ser carregado o desenho do local para a

criação das linhas, que podem ser criadas manualmente ou ser importadas de arquivos com linhas já planejadas.

O HYPACK permite que sejam carregadas imagens de fundo em formatos variados: DXF/DNG, S-57/S-63, OrthoTIF, GeoTIF, BSB, UKHO ARCS, formato vetor (.SHP) e formato raster (.RST).

Na fase de navegação e coleta de dados, também chamada de *Survey*, o *software* trabalha recebendo dados do GPS e do ecobatímetro, proporcionando dados tridimensionais de posição. Na tela podem ser visualizados diversos tipos de dados, tais como profundidade, coordenadas geográficas, velocidade da embarcação, linhas planejadas, localização do barco, régua para orientação da navegação, perfil da seção, entre outros; todos em tempo real. Os dados são visualizados em diferentes janelas, distribuídas e ajustadas na tela de exibição. Durante a navegação, pontos de interesse com coordenadas x-y, também chamados de *targets*, podem ser registrados em tempo real, conforme o interesse do usuário.

O pós-processamento dos dados coletados durante o levantamento é realizado no módulo *Single Beam Editor*. Esta ferramenta fornece uma interface gráfica que permite uma análise crítica da qualidade dos dados coletados. Este módulo permite correções e ou ajustes diversos, tais como: variação de nível d'água, suavizações de linhas de trajeto, variação de nível d'água e de perfis de profundidade, eliminação de pontos discrepantes de profundidade, entre outros.

Após a coleta e o processamento dos dados, o *software* ainda permite a geração de produtos finais, tais como mapas de curvas de nível, mapas de profundidade da área rastreada, cálculos de volume e de área, geração de borda, entre outros. Na geração de mapas de terreno e cálculos de volume e de área, optou-se pela utilização do *software* ArcGIS 10.0.

3.2.7. Material cartográfico e de satélite

Como material cartográfico, para a geração do modelo digital de elevação (MDE) do terreno anterior ao enchimento do reservatório, foi utilizado um arquivo de levantamento topográfico realizado em agosto de 2006. Este levantamento foi realizado pela empresa SPEC Planejamento, Engenharia e Consultoria. Além do levantamento da região do empreendimento, este arquivo apresenta algumas seções topobatimétricas realizados no rio Manhuaçu. Todo material foi utilizado na geração do modelo digital de elevação (MDE) do terreno anterior ao enchimento do reservatório.

Para a delimitação da área estudada do reservatório, ou seja, da borda da área rastreada pela batimetria, foi utilizada uma imagem do satélite RESOURCESAT-1, também conhecido como IRS-P6, do sensor LISS-III, com data de captura em setembro de 2012 e com resolução de 23 m, proveniente do Instituto de Pesquisa Espacial (INPE).

3.2.8. Softwares SEDIMENT e DPOSIT

Para a avaliação do assoreamento do reservatório da PCH Pipoca foram utilizados os *softwares* SEDIMENT, para o cálculo do assoreamento, e DPOSIT, para análise da distribuição dos sedimentos no reservatório. Ambos os *softwares* foram elaborados por Anderson Braga Mendes, em 2005, na linguagem Delphi 7.

3.3. Métodos

3.3.1. Amostragem e caracterização dos sedimentos

A amostragem dos sedimentos de fundo foi realizada com a finalidade de se analisar a granulometria do material, bem como a sua variação ao longo do reservatório. A massa específica das partículas também foi um parâmetro de análise para a caracterização dos sedimentos.

A coleta dos sedimentos foi efetuada com o uso do amostrador tipo Petersen, coletando amostras superficiais do fundo do reservatório. O mecanismo de

coleta, contou com o apoio de um guincho hidrométrico para facilitar o trabalho da coleta. Com o guincho, o amostrador, com as conchas abertas, descia pela coluna d'água e fechava-se ao tocar o fundo, coletando aproximadamente 3 kg de material.

Amostras foram coletadas em 12 pontos ao longo do reservatório, desde o remanso até bem próximo ao eixo da barragem. Os pontos distaram aproximadamente 200 m entre si, podendo ser visualizados na Figura 28. Das amostras coletadas, 10 foram ao longo do reservatório e 2 (Pontos 3 e 11) na entrada de braços.

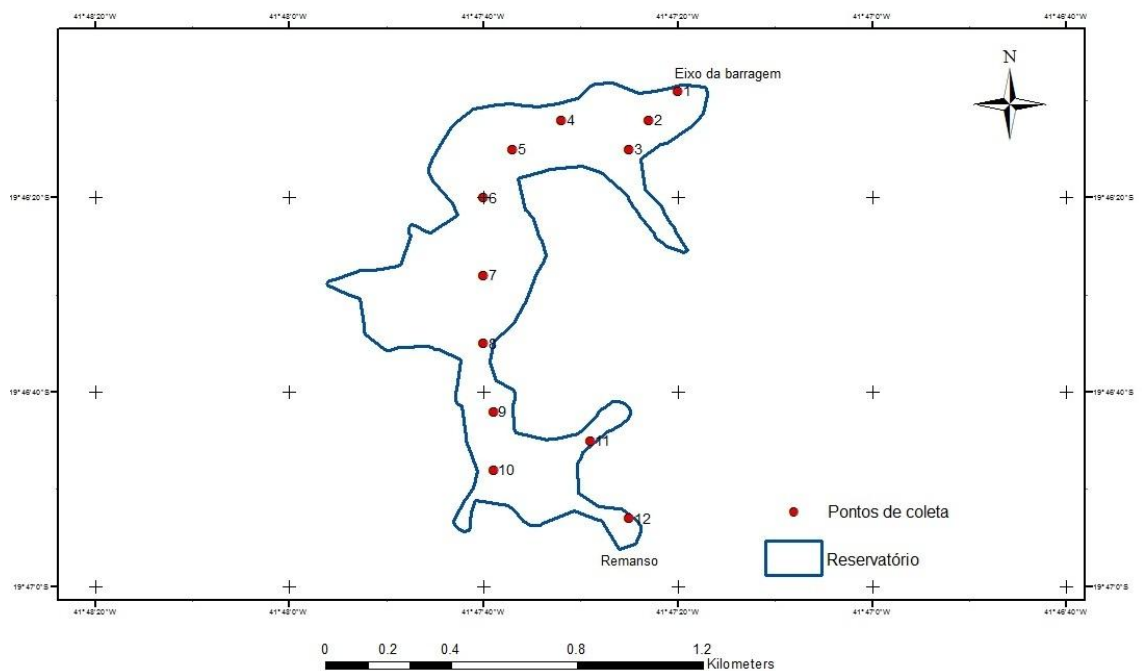


Figura 28 - Pontos de coleta de sedimento de fundo no reservatório da PCH Pipoca (MG).

Com auxílio de um GPS, pode-se registrar as coordenadas geográficas de cada ponto de coleta (Tabela 8).

Tabela 8 - Coordenadas geográficas dos pontos de coleta.

Ponto	Latitude (S)	Longitude (W)
1	19° 46' 08,7"	41° 47' 19,6"
2	19° 46' 12,3"	41° 47' 22,8"
3	19° 46' 14,9"	41° 47' 24,7"
4	19° 46' 12,0"	41° 47' 31,8"
5	19° 46' 14,6"	41° 47' 36,5"
6	19° 46' 20,2"	41° 47' 39,6"
7	19° 46' 28,4"	41° 47' 40,4"
8	19° 46' 34,7"	41° 47' 39,7"
9	19° 46' 41,8"	41° 47' 38,6"
10	19° 46' 47,9"	41° 47' 38,7"
11	19° 46' 44,8"	41° 47' 29,1"
12	19° 46' 52,5"	41° 47' 24,8"

A análise granulométrica para a caracterização dos sedimentos foi realizada com base na NBR 7181, de dezembro de 1984, e a determinação da massa específica das partículas com base na NBR 6508, de outubro de 1984.

Uma nova amostra (número 13) foi obtida a partir da mistura de 20 g de cada amostra coletada ao longo do reservatório. Assim como as demais amostras, esta amostra de mistura passou por análises laboratoriais para a determinação da granulometria e do peso específico das partículas.

3.3.2. Medição de vazão

Realizou-se uma medição de vazão afluente ao reservatório da PCH Pipoca com o intuito de comparar o valor obtido com os valores de vazão defluente da PCH Neblina. A medição foi realizada no remanso do reservatório, sobre a Ponte de Pedra localizada nas coordenadas geográficas 19° 47' 59,92" S e 41° 47' 24,43" W. Este local foi escolhido devido às facilidades em se utilizar o ADCP sobre a ponte, dispensando a necessidade de um barco. As águas estavam calmas e livres de turbulência, condições importantes na obtenção de bons resultados.

A medição foi realizada no dia 10 de setembro de 2012 e durou aproximadamente 1 hora, sem contar o tempo utilizado com a preparação do equipamento. O dia estava ensolarado e sem nuvens, o que facilitou o recebimento de sinal pelo GPS.

Antes das medições são necessárias algumas preparações. Primeiramente, o ADCP deve ser montado e a conexão com o computador deve ser estabelecida. O relógio interno do equipamento deve ser checado e ajustado. Internamente ao ADCP existe uma bússola, que deve ser calibrada o mais próximo possível do local de medição. Após a calibração, é necessária a configuração de alguns parâmetros para otimizar a qualidade dos dados como, por exemplo, a profundidade do ADCP na água, a declinação magnética local e a seleção do método de extrapolação para as margens e leito.

Durante a medição, não se recomenda que o equipamento aproxime-se das margens, para evitar danos por pedras e galhos de árvores. Deve-se prever o trajeto a ser feito pelo ADCP e registrar as distâncias até as margens direita e esquerda. Este é um fator indispensável para a extrapolação das margens.

Feita toda a preparação inicial de montagem, calibração e configurações, deu-se início as medições. Para condições de fluxo constante, recomenda-se que sejam realizadas no mínimo 4 travessias no local, sendo duas em cada sentido, e a vazão média obtida em cada travessia não deve diferir em mais de 5% da vazão média obtida nas travessias. Se a vazão média de uma das travessias diferir em mais de 5% da vazão média, outras 4 travessias adicionais devem ser feitas, totalizando em 8 o número total de travessias (USGS, 2002).

Para obtenção de um valor de vazão de melhor qualidade, foram realizadas um total de 12 travessias, sendo que duas foram desprezadas por apresentarem um coeficiente de variação maior do que 5% em relação a vazão média. Portanto, a vazão média da seção foi determinada pela média da vazão obtida em cada travessia.

Durante as travessias o equipamento foi suspenso por uma corda e movimentado vagarosamente por cima da Ponte de Pedra (Figura 29). Recomenda-se que a velocidade média do *hydroboard* deve ser menor ou igual a velocidade média da água (USGS, 2002). Isso pode ser monitorado no computador em tempo real. Em alguns momentos, durante a passagem pelas pilastras da ponte, não foi possível manter a velocidade do barco menor que da

água. Por comodidade, as medições deveriam ter sido feitas do outro lado da ponte, a montante, evitando o problema ao passar pelas pilastras.



Figura 29 - Medição de vazão com ADCP.

Os dados coletados são processados automaticamente pelo software RiverSurveyor Live, e o resultado final é apresentado em uma tabela com o resumo de cada travessia.

3.3.3. Tratamento dos dados de vazão defluente

Os dados diários de vazão defluente foram agrupados em valores médios mensais, para posterior análise em um gráfico.

Pode-se comparar o valor médio de vazão afluente à PCH Pipoca, obtido com o uso do ADCP, com o valor da vazão defluente medido e previsto da PCH Neblina para o mesmo dia.

3.3.4. Geração do MDE anterior ao enchimento do reservatório

Para a geração do MDE anterior ao enchimento do reservatório, utilizou-se o levantamento topográfico realizado em agosto de 2006. Este levantamento contempla curvas de nível de 2 em 2 m da área de entorno do reservatório, o contorno do rio e a localização de seções batimétricas realizadas no curso d'água.

Os dados estavam no formato CAD (.dwg) e foram convertidos para o formato *shapfile* (.shp) para que pudessem ser utilizados e manipulados no *software* ArcGIS. A escolha de se trabalhar em um ambiente de SIG, foi devido ao objetivo do cruzamento de dados topográficos anteriores e posteriores ao enchimento do reservatório. Os arquivos foram convertidos e as feições de curvas de nível, contorno do rio e seções batimétricas foram separadas em diferentes arquivos, sendo necessária a edição das curvas e a inserção do valor das cotas.

Foram realizadas poucas seções batimétricas no trecho de estudo do rio Manhuaçu, estando elas muito espaçadas umas das outras. Nesse sentido, para se ter uma maior precisão na estimativa do cálculo do volume do rio e a obtenção do MDE, anteriores ao enchimento do reservatório, fez-se necessário estimar outras seções batimétricas no local (Figura 30) (BRITO, 2013).

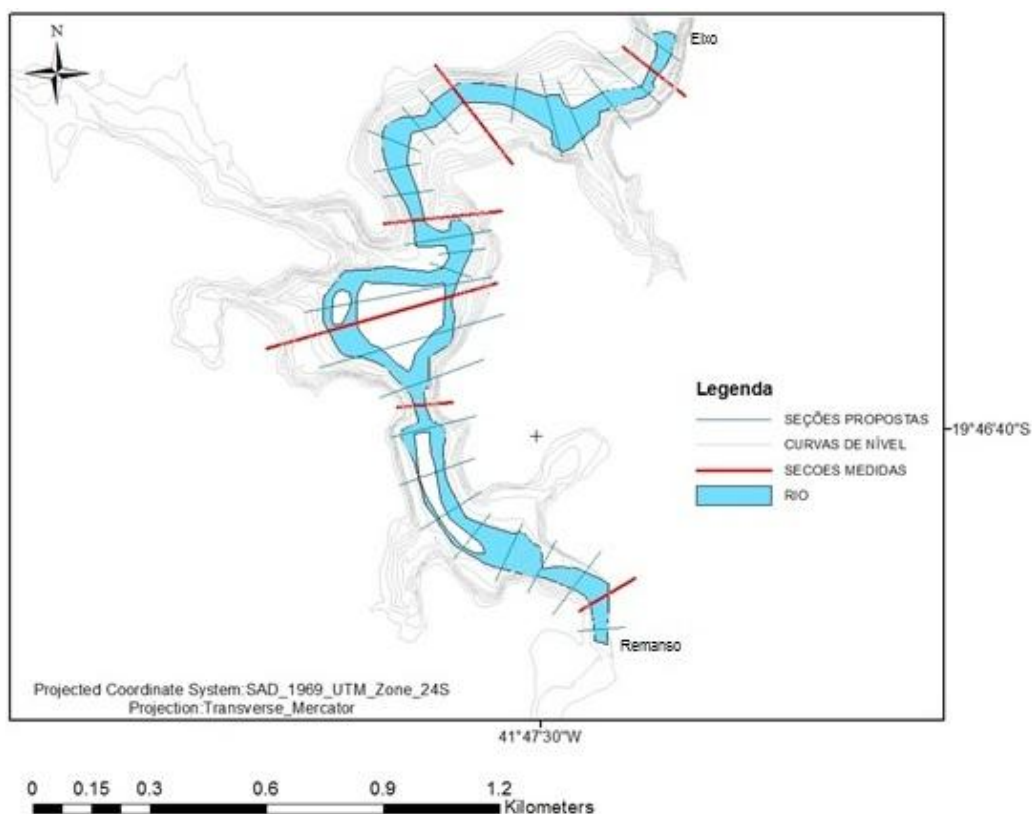


Figura 30 - Curvas de nível e seções batimétricas anteriores ao enchimento do reservatório da PCH Pipoca (MG).

Para a estimativa do volume do rio e posterior geração do MDE anterior ao enchimento do reservatório, foram utilizadas seis seções batimétricas, medidas no local, e foram propostas mais vinte e cinco, entre as seções já existentes, totalizando trinta e uma seções. A partir destas seções, estimou-se o perfil transversal do leito do rio no trecho estudado.

O perfil transversal das seções propostas no fundo do reservatório foi obtido a partir das curvas de nível das margens (Figura 31). Para isso, inicialmente, ajustou-se retas pelos pontos de interseção das curvas de nível com a seção transversal e, em seguida, obteve-se o ponto de encontro destas duas retas. O próximo passo consistiu em calcular a profundidade máxima da seção proposta a partir da média das maiores profundidades das duas seções medidas, entre as quais a seção proposta se encontrava. Com esta profundidade definiu-se o ponto mais profundo da seção proposta, localizado imediatamente acima do ponto de interseção das retas. Dessa maneira, estimou-se o perfil submerso da

seção a partir da união, através de duas retas, do ponto mais profundo com os pontos de encontro das margens com o nível d'água (Figura 32).

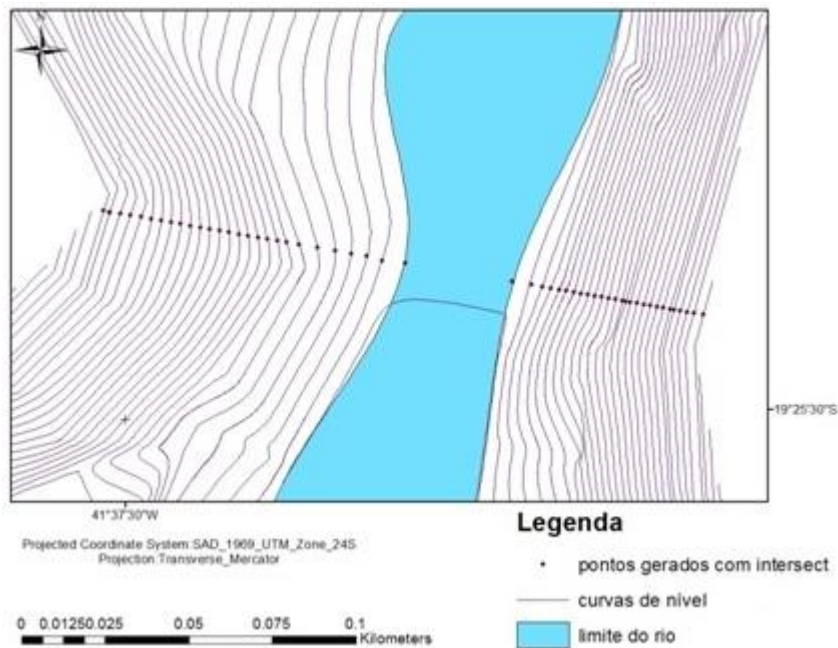


Figura 31 - Pontos de interseção das curvas de nível com as seções propostas.

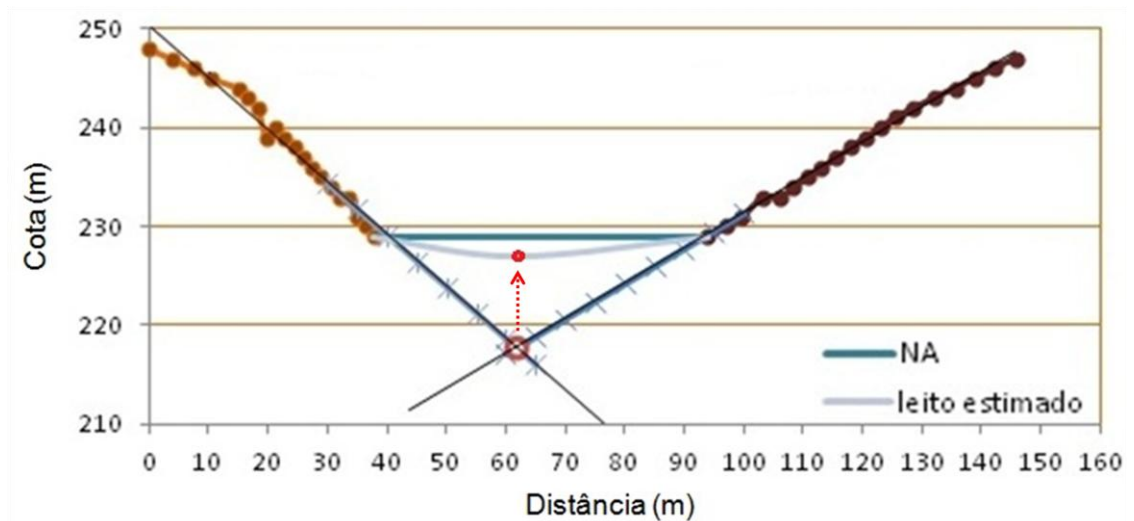


Figura 32 - Estimativa do perfil transversal de uma seção proposta.

Para validar a metodologia proposta, foram escolhidas três seções em locais onde já existiam seções batimétricas e comparadas com as seções propostas para o mesmo local. Foram escolhidas duas seções próximas aos extremos do reservatório (barragem e remanso) e uma no meio do reservatório. Uma

ilustração do perfil transversal destas três seções pode ser visualizada na Figura 33.

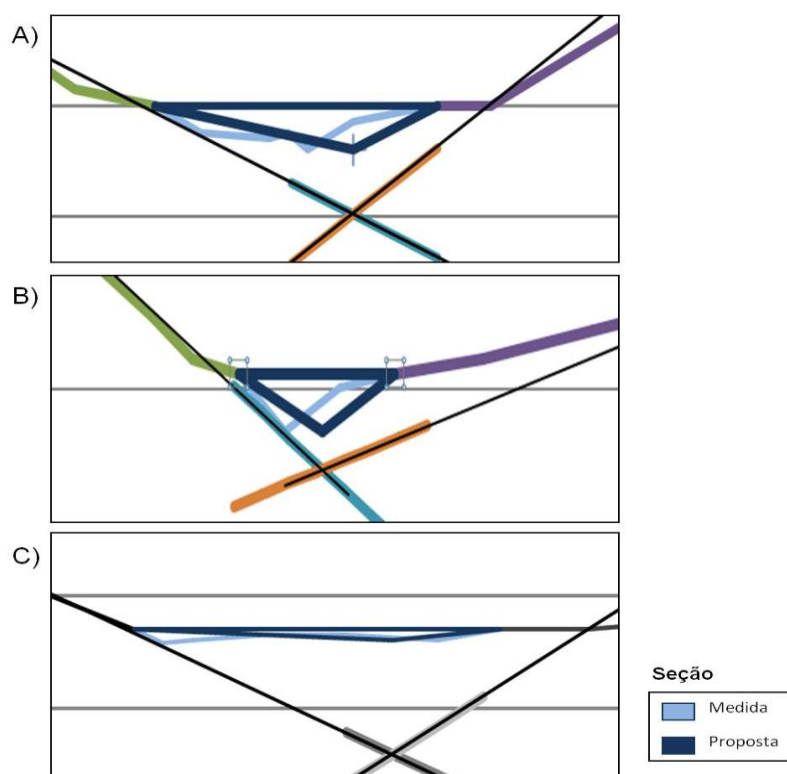


Figura 33 - Comparação entre as seções medida e proposta. A) Seção próxima ao eixo da barragem, B) Seção localizada no meio do reservatório e C) Seção próxima ao remanso do reservatório.

Após uma comparação entre os resultados obtidos a partir da metodologia proposta para a criação de novas seções, encontrou-se uma diferença média percentual entre as áreas igual a 10,4% (Tabela 9).

Tabela 9 - Seções utilizadas na validação da metodologia proposta.

Localização	Área medida	Área proposta	Diferença (%)
Barragem	75.6	77.8	2.8
Meio	46.8	56.8	17.6
Remanso	26.9	24	10.8

Por fim, o arquivo das seções batimétricas medidas e o arquivo das curvas de nível foram transformados em arquivos de pontos, assim como feito para o arquivo das seções propostas. De posse destes dados e do contorno da área de estudo, utilizou-se a ferramenta TIN, do *software* ArcGIS, para a geração do MDE anterior ao enchimento do reservatório.

3.3.5. Levantamentos batimétricos

A partir da recomendação de Carvalho (2008), o reservatório do presente estudo se enquadra na frequência de realização de um levantamento a cada dois anos, por se tratar de um reservatório de uma pequena central hidrelétrica, conforme os preceitos estabelecidos na Resolução da ANEEL n° 652 de 2003.

No entanto, o Art. 8° da Resolução Conjunta ANA/ANEEL n° 03, de agosto de 2010, dita sobre a obrigatoriedade da avaliação do processo de assoreamento em reservatórios, por meio da atualização das curvas cota x área x volume. Para empreendimentos novos, como é o caso do reservatório em estudo, a atualização das curvas deverá ser realizada uma vez a cada dez anos. Esta resolução não levou em consideração o tamanho do reservatório, conforme o critério recomendado por Carvalho (2008).

3.3.5.1. Primeiro levantamento batimétrico

Considerando o valor de área no nível d'água máximo maximorum igual a 121 ha, encontrou-se para a fórmula de Morris & Fan (1997) um número médio de seções recomendadas igual a 17. Considerando a extensão do reservatório em estudo de aproximadamente 2 km, obteve-se, pelas orientações do guia técnico da ANA, uma equidistância entre seções de 415 m. Porém, para uma maior precisão no levantamento do reservatório, foram realizadas 65 seções transversais, espaçadas aproximadamente de 30 em 30 m, ao longo do reservatório (Figura 34).

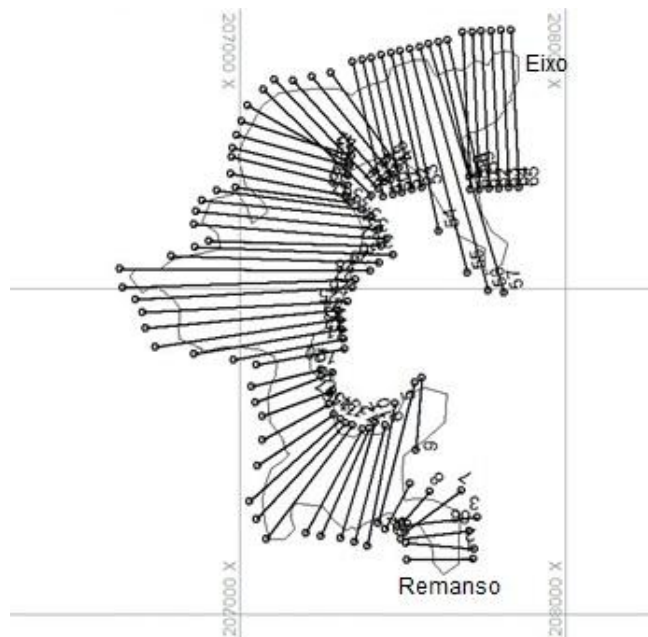


Figura 34 - Seções batimétricas do reservatório da PCH Pipoca (MG).

Após o planejamento das seções transversais deu-se início ao levantamento batimétrico em campo. Uma linha longitudinal foi percorrida desde o eixo da barragem até próximo ao remanso. A partir do remanso, a embarcação seguiu de volta em direção ao eixo da barragem realizando o levantamento nas seções transversais planejadas.

No início e no final do levantamento foram registrados o nível do reservatório em uma régua localizada bem próxima ao eixo da barragem. Isto foi necessário para descontar a variação de nível durante o levantamento no processamento dos dados coletados.

3.3.5.2. Segundo levantamento batimétrico

O segundo levantamento batimétrico no reservatório da PCH Pipoca foi realizado nos dias 27 e 28 de junho de 2013, a partir do uso de um ecobatímetro multifeixe.

Após a montagem dos equipamentos no barco, foram realizadas algumas preparações prévias ao início propriamente dito do levantamento batimétrico. Dentre essas preparações pode-se citar a inserção no *software* HYPACK dos

valores referentes aos *offsets*, que são algumas distâncias entre os equipamentos instalados no barco, a calibração da velocidade do som, utilizando o *digibar* e a realização do *patch test*.

O levantamento batimétrico do reservatório foi dividido em três partes, para otimizar o trabalho e reduzir as distâncias percorridas pelo barco. Em cada parte foi levantado o contorno das margens seguido do interior desta área. No interior de cada parte, o barco percorreu a área realizando círculos que terminavam no seu interior, e, no final, o barco voltava a percorrer algumas áreas que não foram muito bem cobertas pelo ecobatímetro. Os braços do reservatório foram levantados da mesma forma que o lago principal.

A área levantada do reservatório foi a mesma do primeiro levantamento batimétrico, realizado com o ecobatímetro monofeixe. Desta forma, foi possível a comparação do resultado das batimetrias. Em ambos os levantamentos, não foi possível levantar seções acima da área de remanso, devido à presença de grandes rochas no trecho do rio.

O nível d'água registrado na régua, localizada bem próxima ao eixo da barragem, foi obtido em um arquivo fornecido pela PCH com registros de hora em hora. Estas informações foram utilizadas na criação do arquivo de maré a ser inserido durante o processamento dos dados obtidos.

3.3.6. Processamento dos dados batimétricos

3.3.6.1. Processamento dos dados do primeiro levantamento batimétrico

Após o levantamento batimétrico no campo, fez-se o processamento dos dados coletados no *software* HYPACK, utilizado na coleta e também no processamento. Esta etapa permite analisar e ajustar as informações necessárias para a elaboração de produtos finais, como mapas de curvas de nível.

Os arquivos brutos foram analisados detalhadamente, verificando-se a presença de eventos discrepantes ou fora do comportamento esperado. Estes eventos podem ser picos indesejáveis encontrados no perfil das seções, por

exemplo. A suavização destas imperfeições é realizada com a ferramenta *smooth*, dentro do módulo *single beam editor* (Figura 35).

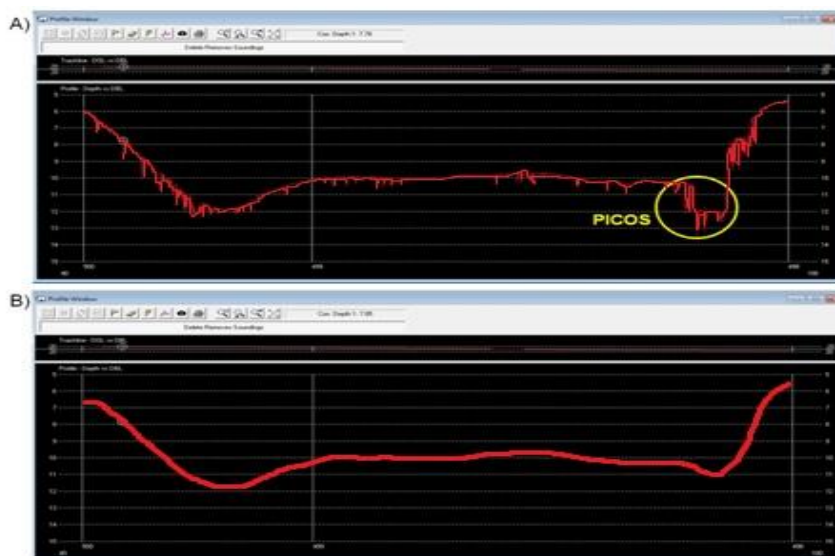


Figura 35 - Suavização de picos indesejáveis. A) Seção antes da suavização e B) Seção após a suavização.

Para realizar a correção proveniente da variação do nível d'água do reservatório durante a realização da batimetria, foi necessária a criação de um arquivo de maré. Este arquivo foi criado manualmente com a inserção do valor do nível d'água registrado antes do levantamento (400,75 m) e o valor registrado no final do levantamento (400,4 m), com os respectivos horários. A diferença de nível registrada durante o todo o período necessário ao levantamento foi de 0,35 cm.

Feito o processamento necessário aos dados coletados, pode-se dar continuidade para a obtenção dos produtos finais disponibilizados pelo *software*.

3.3.6.2. Processamento dos dados do segundo levantamento batimétrico

Assim como no primeiro levantamento batimétrico, o processamento dos dados coletados do segundo levantamento foi realizado no *software* HYPACK. Porém,

o processamento de dados provenientes de ecobatímetro multifeixe é realizado dentro do módulo *Hysweep Editor (MB MAX)*.

Para realizar a correção proveniente da variação do nível d'água do reservatório durante a realização da batimetria, também foi necessária a utilização do arquivo de maré. Este arquivo foi criado a partir de dados de medições horárias de variação de nível, que foram disponibilizadas pela PCH Pipoca.

Foi aplicado um filtro sobre os dados brutos para a remoção de erros grosseiros, aqueles que estão fora dos padrões e que podem ser facilmente detectáveis. Esse tipo de erro pode surgir, por exemplo, durante falhas do equipamento durante o levantamento. Deve-se tomar cuidado ao aplicar filtros sobre os dados, pois corre-se o risco da remoção de dados bons. Após a remoção de erros grosseiros, cada linha foi analisada e editada manualmente para a remoção de demais erros.

Feito o processamento necessário dos dados coletados, deu-se continuidade à obtenção dos produtos finais disponibilizados pelo *software*, como a geração de mapa de curvas de nível e mapas representativos da geomorfologia do terreno submerso.

3.3.7. Geração dos MDEs posterior ao enchimento do reservatório

Para a geração do MDE posterior ao enchimento do reservatório, primeiramente exportou-se um arquivo xyz do *software* HYPACK, com as coordenadas geográficas e a cota dos pontos coletados em cada batimetria, para depois serem importados no Excel.

Na tabela xyz, o valor de cota dos pontos foi transformado em profundidade, a partir da subtração do valor do nível d'água registrado na régua do reservatório no final da batimetria.

A imagem do satélite IRS-P6 de setembro de 2012 foi utilizada para delimitar a borda do reservatório, referente à área em que foi realizada a batimetria. A borda foi definida manualmente no *software* ArcGIS. Durante o levantamento batimétrico, não foi possível realizar a coleta de dados muito próximos às

margens do reservatório, devido as baixas profundidades e a presença de galhos e rochas. Por esse motivo, utilizou-se a imagem de satélite para interpolar os dados batimétricos até a borda real do reservatório. Esta borda foi utilizada como limite do reservatório.

Com os pontos xyz importados das batimetrias e o limite real do reservatório, gerou-se os MDEs posterior ao seu enchimento, utilizando a ferramenta *create tin* do ArcMap. De posse dos MDEs da primeira e da segunda batimetria pode-se comparar, a partir de uma álgebra de mapas no ArcMap, a diferença entre os dois modelos.

3.3.8. Geração das curvas cota x área x volume

Para atender os requisitos da Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 03, de 10 de agosto de 2010, este estudo preocupou-se em determinar a curva CAV atual para o reservatório da PCH Pipoca, com base no documento de orientações elaborado pela ANA.

Foram geradas CAVs a partir dos MDEs anterior (levantamento topográfico) e posteriores ao enchimento do reservatório (batimetrias). No procedimento de geração, utilizou-se a ferramenta *surface volume*, dentro do *software* ArcGIS para gerar uma tabela com informações referentes às curvas CAV dos MDEs. Exportando as tabelas geradas para o *software* Excel, pode-se gerar os gráficos de CAV, possibilitando comparações.

3.3.9. Cálculo do volume assoreado utilizando o *software* SEDIMENT

Foram definidos dois cenários para a estimativa do volume de sedimentos depositados no reservatório da PCH Pipoca. O primeiro cenário foi gerado a partir de dados disponíveis no projeto básico da PCH, com exceção dos valores referentes à granulometria que não constavam no projeto básico, tendo sido usados valores atuais referentes à amostra de mistura de sedimentos coletados no reservatório. O segundo cenário foi definido com alguns dados oriundos do projeto básico e outros obtidos a partir do presente estudo. Os

dados utilizados do projeto básico foram estimados com a finalidade, também, de calcular o volume de sedimentos a ser depositado após o enchimento e início de operação do reservatório. Os dados de entrada utilizados nos cenários 1 e 2 são apresentados na Figura 36.

IDENTIFICAÇÃO DO ESTUDO Estudo: PCH Pipoca - cenário 1 Registro: 1	GRANULOMETRIA DO SEDIMENTO AFLUENTE Argila (%): 48.5 Silte (%): 32.7 Areia (%): 18.8
CARACTERÍSTICAS GERAIS Tipo de operação do reservatório: 1 ? Volume do reservatório no N.A. máximo normal (hm ³): 8.186 Volume assoreado para t= 0 anos (hm ³): 0 Descarga líquida média anual afluente (m ³ /s): 36.8 Descarga sólida média anual afluente (t/ano): 38240 Taxa de aumento do transporte sólido (%/ano): 1.00 ...	OPÇÕES DE CÁLCULO <input type="radio"/> Utilizar a curva de Brune no cálculo da Er do reservatório. <input checked="" type="radio"/> Utilizar a curva de Churchill no cálculo da Er do reservatório. <input type="radio"/> Inserir Er inicial e posteriormente utilizar a curva de Brune. <input type="radio"/> Inserir Er inicial e posteriormente utilizar a curva de Churchill. <input type="radio"/> Considerar o sedimento vindo de um reservatório de montante. IdentificCurva de Churchill Comprimento do reservatório deste estudo (m): 5640
IDENTIFICAÇÃO DO ESTUDO Estudo: PCH Pipoca - cenário 2 Registro: 2	GRANULOMETRIA DO SEDIMENTO AFLUENTE Argila (%): 48.5 Silte (%): 32.7 Areia (%): 18.8
CARACTERÍSTICAS GERAIS Tipo de operação do reservatório: 1 ? Volume do reservatório no N.A. máximo normal (hm ³): 8.186 Volume assoreado para t= 0 anos (hm ³): 0 Descarga líquida média anual afluente (m ³ /s): 40.20 Descarga sólida média anual afluente (t/ano): 38240 Taxa de aumento do transporte sólido (%/ano): 1.00 ...	OPÇÕES DE CÁLCULO <input type="radio"/> Utilizar a curva de Brune no cálculo da Er do reservatório. <input checked="" type="radio"/> Utilizar a curva de Churchill no cálculo da Er do reservatório. <input type="radio"/> Inserir Er inicial e posteriormente utilizar a curva de Brune. <input type="radio"/> Inserir Er inicial e posteriormente utilizar a curva de Churchill. <input type="radio"/> Considerar o sedimento vindo de um reservatório de montante. IdentificCurva de Churchill Comprimento do reservatório deste estudo (m): 2000

Figura 36 - Dados de entrada utilizados nos cenários 1 e 2.

Com relação aos dados utilizados no cenário 2, o valor da descarga líquida média anual afluente foi obtida a partir dos dados da PCH Neblina, os valores de granulometria foram obtidos a partir de análises laboratoriais da amostra da mistura de sedimentos coletados e quanto ao comprimento do reservatório, este foi considerado ser igual à distância da barragem até o remanso, trecho onde foram realizadas as batimetrias.

Para o cálculo da eficiência de retenção de sedimentos do reservatório utilizou-se a curva de Churchill, mais usada para pequenos reservatórios.

3.3.10. Estudo paramétrico do *software* SEDIMENT

Um estudo paramétrico dos dados de entrada foi realizado com o objetivo de avaliar o comportamento e a sensibilidade dos resultados apresentados pelo *software* SEDIMENT, mediante algumas alterações em alguns parâmetros de entrada.

Para este estudo foram criados quatro cenários, variando em 10% os valores de quatro parâmetros de entrada utilizados no cenário 2, sendo que em cada simulação alterou-se o valor de apenas um parâmetro de entrada. No primeiro cenário (cenário 3) o valor utilizado como volume do reservatório foi de 9,005 hm³. No segundo cenário (cenário 4) o valor utilizado para a descarga líquida média anual afluyente foi de 44,22 m³.s⁻¹. No terceiro cenário (cenário 5) o valor da descarga sólida média anual afluyente passou para 42.064 t.ano⁻¹. No quarto cenário (cenário 6) o valor do comprimento do reservatório passou para 2200 m.

De acordo com Molinas & Yang (1986), citado por Morris & Fan (2010), a sensibilidade é definida como a mudança em um parâmetro de saída em relação a uma mudança no parâmetro de entrada. A função para o coeficiente de sensibilidade é expressa da seguinte forma:

$$S_i = \frac{Y_i - Y_0}{Y_0} \times 100\%$$

Em que,

S_i = coeficiente de sensibilidade, %;

Y_i = valor do parâmetro dependente em sua condição original;

Y₀ = valor do parâmetro dependente com uma mudança em seu valor.

3.3.11. Cálculo da distribuição de sedimentos a partir do *software* DPOSIT

Utilizou-se o *software* DPOSIT para simular a distribuição dos sedimentos depositados no reservatório da PCH Pipoca, ao longo do tempo. Deu-se

continuidade às simulações dos cenários 1 e 2, iniciadas no *software* SEDIMENT.

Este *software* requer, como dados de entrada, a inserção do volume de sedimento depositado a cada intervalo de tempo a ser modelado e da curva CAV original do reservatório, ou seja, antes de seu enchimento. É necessário, também, fornecer a cota do nível d'água máximo normal do reservatório (400,5m).

O arquivo referente ao volume de sedimento depositado pode ser inserido tanto manualmente quanto através da importação de dados de um arquivo externo, com a extensão “.res” (originado do *software* SEDIMENT).

Os dados da curva CAV inseridos foram originados do MDE gerado antes do enchimento do reservatório, a partir das curvas de nível medidas na área de entorno do reservatório e das seções batimétricas no trecho estudado do rio.

4. Resultados e Discussões

4.1. Caracterização dos sedimentos

A partir da coleta e posteriores análises laboratoriais dos sedimentos de fundo do reservatório, pode-se analisar a variação granulométrica das amostras, e os valores de massa específica das partículas. Os resultados das análises podem ser visualizados na Tabela 10. Em anexo, encontram-se as curvas granulométricas das amostras e da mistura.

Tabela 10 - Resultados das análises laboratoriais.

Ponto	Observação	Massa específica das partículas	Granulometria		
			Argila	Silte	Areia
1	Eixo	2.663	64,5	26,4	9,1
2		2.668	64,5	26,9	8,6
3		2.672	67,0	23,5	9,5
4		2.677	61,5	29,5	9,0
5		2.631	62,0	26,6	11,4
6		2.672	55,0	33,5	11,5
7		2.668	53,1	34,9	12,0
8		2.626	51,8	34,2	14,0
9		2.641	51,5	37,5	11,0
10		2.668	52,0	35,7	12,3
11		2.669	51,7	36,3	12,0
12	Remanso	2.715	0	0	100
13	Mistura	2.634	48,5	32,7	18,8

Excluindo-se a amostra coletada no remanso do reservatório, não houve variação expressiva nos valores das frações granulométricas. A média das frações granulométricas dos sedimentos foi de aproximadamente 58% de argila, 31% de silte e 11% de areia. Dessa maneira, pode-se afirmar que os sedimentos de fundo do reservatório da PCH Pipoca são argilo siltosos.

O comportamento da variação das frações granulométricas pode ser visualizado no Gráfico 2. Pode-se observar uma pequena redução na porcentagem da fração argila à medida que as amostras se aproximam do remanso de reservatório, sendo a amostra coletada no remanso constituída apenas por areia. Assim como a variação da fração argila, houve um pequeno aumento da porcentagem de silte à medida que os sedimentos se

aproximavam do remanso. Porém, com relação à fração areia houve um pequeno aumento da porcentagem em direção ao remanso e um aumento brusco na amostra coletada especificamente no remanso. Assim, como esperado, encontraram-se sedimentos mais grossos próximos à entrada do reservatório e sedimentos mais finos próximos ao eixo da barragem.

Em sua grande maioria, os sedimentos coletados apresentaram predominância de frações granulométricas mais finas, com argila e silte. Este fato pode ser justificado pela existência do reservatório da PCH Neblina localizado a montante do reservatório da PCH Pipoca, que retém, principalmente, as partículas mais grossas.

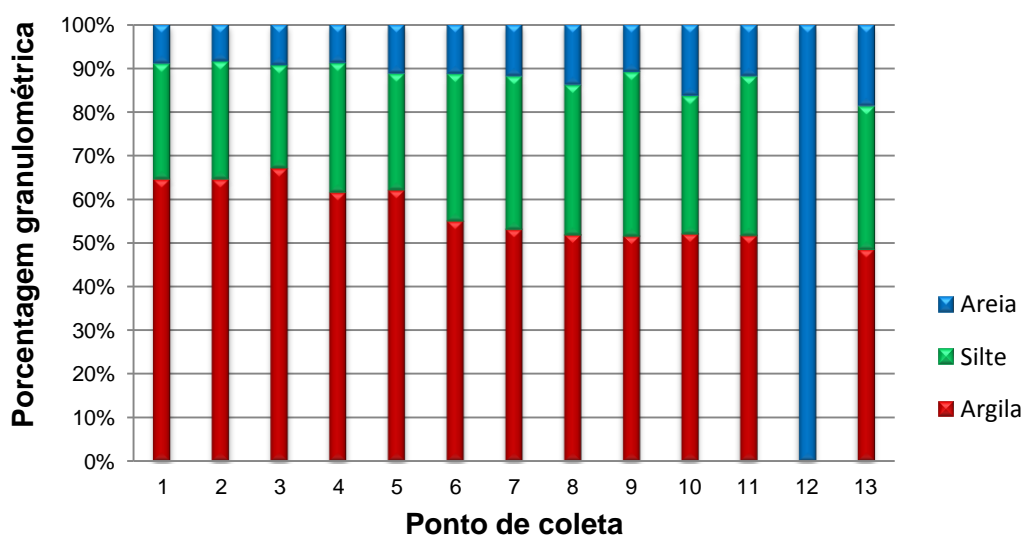


Gráfico 2 - Variação das frações granulométricas nas amostras coletadas.

Com relação à massa específica das partículas, coerentemente com os resultados de granulometria, não houve expressiva variação entre as amostras, como pode ser observado no Gráfico 3. A amostra localizada no remanso do reservatório apresentou o maior valor, por ser composta completamente por areia. O valor médio encontrado para os sedimentos no remanso foi de 2,72 g.cm⁻³ (26,7 kN.m⁻³), e o valor médio para as demais amostras do reservatório foi de aproximadamente 2,66 g.cm⁻³ (26,1 kN.m⁻³).

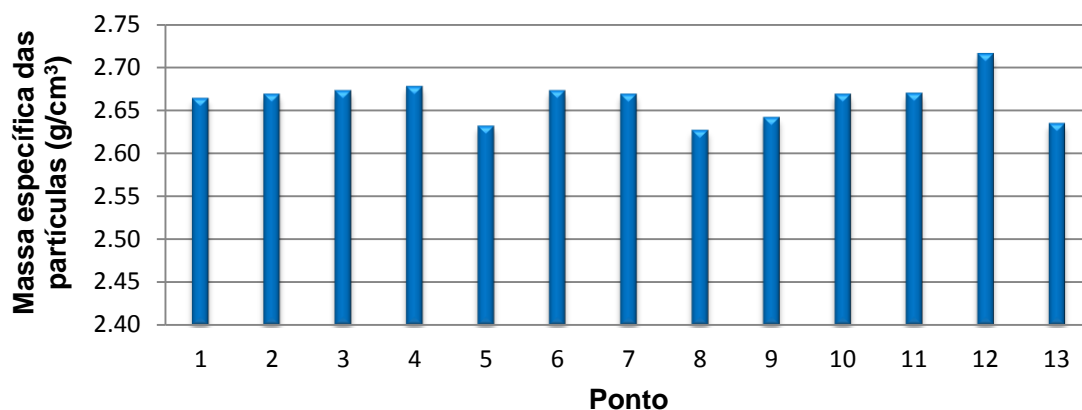


Gráfico 3 - Variação da massa específica das partículas nas amostras coletadas.

4.2. Vazões afluentes ao reservatório

4.2.1. Vazão obtida pelo ADCP

Para cada uma das dez travessias realizadas o *software* RiverSurveyor Live gerou um perfil transversal do rio na seção de medição, como pode ser observado no Gráfico 4, referente à primeira travessia.

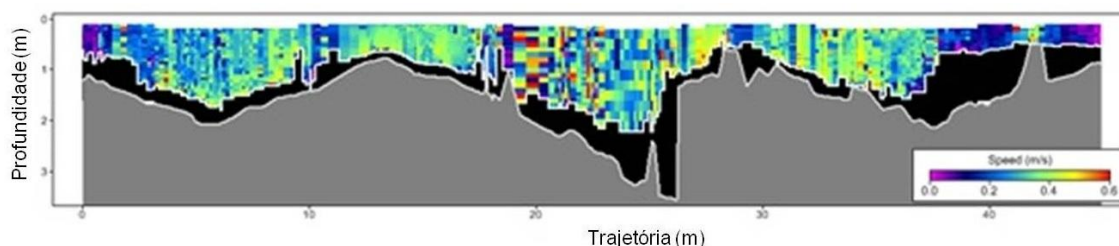


Gráfico 4 - Perfil da seção transversal da primeira travessia.

Uma das limitações de equipamentos acústicos é a medição da velocidade no fundo do rio, caracterizada pela mancha preta observada no Gráfico 4. Estas células em preto não são utilizadas no cálculo da vazão, sendo esta região interpolada pelo *software*. Assim como o fundo do rio, as margens também são interpoladas, pois o equipamento não chega até as bordas do rio devido à pequena profundidade e à presença de galhos, rochas e outros impedimentos.

Por conveniência, a medição deveria ter sido realizada no lado de jusante da ponte, para que não houvesse interferência dos pilares, como pode ser observado no Gráfico 5. O ideal é que este gráfico apresente, em sua maioria,

barras verdes, ou seja, quando a relação entre a velocidade do *hydroboard* e a velocidade da água é menor do que 1,0. Justamente ao passar pelas três pilastras da ponte, esta relação foi maior do que 1,0, ou seja, a velocidade do *hydroboard* foi maior que a velocidade da água.

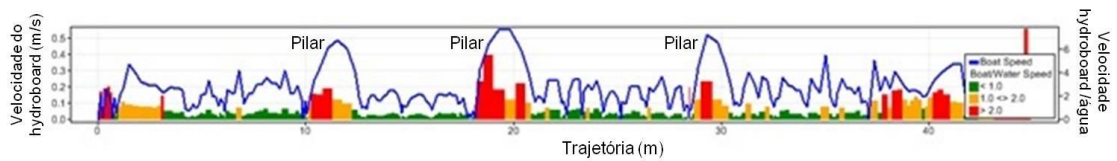


Gráfico 5 - Trajetória versus velocidade do *hydroboard*.

Os dados coletados pelo equipamento são processados automaticamente pelo *software* RiverSurveyor Live. O resultado final é apresentado na forma de um relatório com o resumo de cada travessia (Figura 37). O coeficiente de variação da vazão foi menor que 5%, conforme recomendado, e o valor médio de vazão encontrado para a seção foi igual a $13,672 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Relatório de Medição de Vazão																	
Detalhes do Local										Informações da Medição							
Nome do Local					ponte pipoca					Participantes							
Código da Seção										Barco/Motor							
Localização					ipanema					Nº da Medição							
Informações do Sistema					Configurações do Sistema							Unidades					
Tipo do Sistema		RS-M9			Prof. dos Transdutores (m)		0,06					Dist.		m			
Número de Série		2071*			Salinidade (ppt)		0,0					Velocidade		m/s			
Versão do Firmware		2.00*			Declinação Mag. (graus)		-23,1					Área		m ²			
Versão do Software		2.50										Vaz.		m ³ /s			
												Temperatura		graus C			
Configurações da Medição										Resultados de Vazão							
Ref. para Trajeto		Bottom-Track			Método Margem Esq.		Margem Gradual					Largura (m)		44,64			
Ref. para Prof.		Feixe Vertical			Método Margem Dir.		Margem Gradual					Área (m ²)					
Sist. de Coord.		ENU			Tipo Extrapolação Superf.		Lei Exponencial					Vel. Abs. Média (m/s)		0,195			
					Tipo Extrapolação Fundo		Lei Exponencial					Vaz. Total (m ³ /s)		13,672			
Resultados das Medições																	
Nº da trav.	Hora		Dist.				Vel. Méd.		Vaz.						%		
#	Hora	Duração	Temp.	Trajeto	DMG	Larg.	Área	Emb.	Água	Esq.	Dir.	Superf.	Meio	Fundo	Total	LCTotal	Medido
1 M	17:38:09	0:05:47	25,6	46,13	39,04	43,74	64,6	0,133	0,212	0,05	0,01	1,59	9,10	2,98	13,728	--	66,3
2 M	17:44:27	0:05:27	25,4	46,29	40,04	44,74	64,2	0,142	0,221	0,03	0,02	1,59	9,64	2,94	14,221	--	67,8
3 M	17:50:20	0:05:58	25,3	48,40	40,24	44,94	65,8	0,135	0,224	0,02	0,01	1,75	9,55	3,41	14,755	--	64,7
4 M	17:56:52	0:05:37	25,1	46,71	39,76	44,46		0,139	0,000	0,04	0,00	1,60	9,04	2,75	13,432	--	67,3
5 M	18:03:24	0:03:56	25,1	44,27	40,16	44,86	63,9	0,188	0,219	0,02	0,01	1,72	9,21	3,01	13,977	--	65,9
6 M	18:07:44	0:03:45	25,0	44,96	40,98	45,68	63,9	0,200	0,207	0,08	0,03	1,54	9,05	2,53	13,210	--	68,5
8 M	18:18:27	0:05:21	24,9	47,53	40,45	45,15	62,6	0,148	0,215	0,02	0,01	1,51	9,43	2,49	13,458	--	70,0
9 M	18:24:16	0:05:42	24,9	51,67	38,52	43,22	61,6	0,151	0,212	0,00	0,01	1,57	9,00	2,47	13,053	--	69,0
11 M	18:36:51	0:04:23	24,9	46,08	39,49	44,19	61,4	0,175	0,205	-0,02	0,01	1,55	8,53	2,54	12,610	--	67,7
12 M	18:41:40	0:04:22	24,8	47,00	40,69	45,39	62,2	0,179	0,230	0,03	0,02	1,65	9,89	2,69	14,271	--	69,3
		Média	25,1	46,90	39,94	44,64		0,159	0,195	0,03	0,01	1,61	9,24	2,7	13,672	0,000	67,6
		Desvio Padrão	0,2	1,94	0,71	0,71		0,023	0,065	0,02	0,01	0,07	0,37	0,29	0,613	0,000	1,6
		CV	0,0	0,041	0,018	0,016		0,145	0,335	0,864	0,453	0,046	0,040	0,104	0,045	0,000	0,023

Figura 37 - Relatório de medição de vazão gerado pelo software RiverSurveyor Live.

O valor médio de vazão medido pelo equipamento no dia 10/09/2012, entre os horários de 17h38 e 18h41, foi semelhante ao valor de vazão defluente da PCH Neblina medido no dia 10/09/2010 às 17h43, de 15,21 m³.s⁻¹. A vazão defluente medida na PCH Neblina no dia 10/09/2011 às 21h30 foi de 16,68 m³.s⁻¹ e no dia 10/09/2012 às 18h32 foi de 17,62 m³.s⁻¹. Ressalta-se que as comportas desta PCH são abertas às 17h30, aumentando o valor da vazão defluente.

4.2.2. Vazões defluentes da PCH Neblina

Os dados diários de vazão defluente fornecidos pela PCH Neblina foram agrupados em valores médios mensais e depois plotados no hidrograma representado no Gráfico 6.

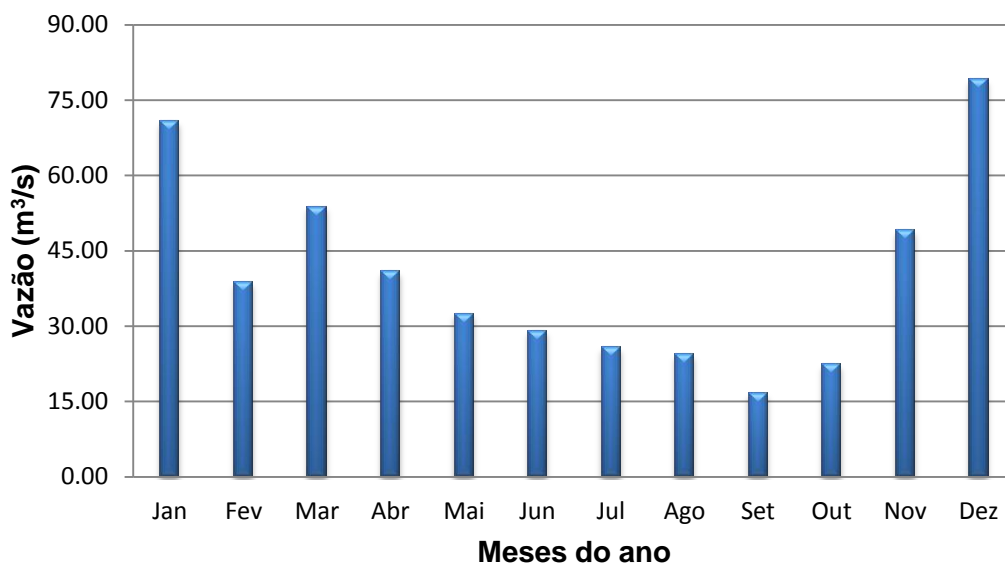


Gráfico 6 - Vazões médias defluentes da PCH Neblina, MG.

Estas são as vazões médias afluentes ao reservatório da PCH Pipoca, com os maiores valores observados nos meses de novembro, dezembro, janeiro e março. Era de se esperar que o mês de fevereiro também estivesse entre os meses com maior valor de vazão, mas não foi o que aconteceu. Isto pode ser devido ao pequeno intervalo de dados obtidos, sendo insuficiente para um estudo mais apurado. Para um estudo hidrológico, que não é o foco deste trabalho, o ideal seria uma série de dados de no mínimo 30 anos. Desta maneira, os dados analisados da PCH Neblina são apenas uma estimativa para a vazão afluente ao reservatório da PCH Pipoca, já que esta hidrelétrica não possui medições de vazão afluente ao seu reservatório.

4.3. Produtos finais do *software* HYPACK

4.3.1. Produtos finais do primeiro levantamento batimétrico

Os dados brutos coletados durante o primeiro levantamento batimétrico, no reservatório da PCH Pipoca, foram interpolados pelo *software* HYPACK, por meio do método TIN. A evolução deste processo pode ser observada na Figura 38, em que toda a área levantada foi interpolada pelo método de triangulação.

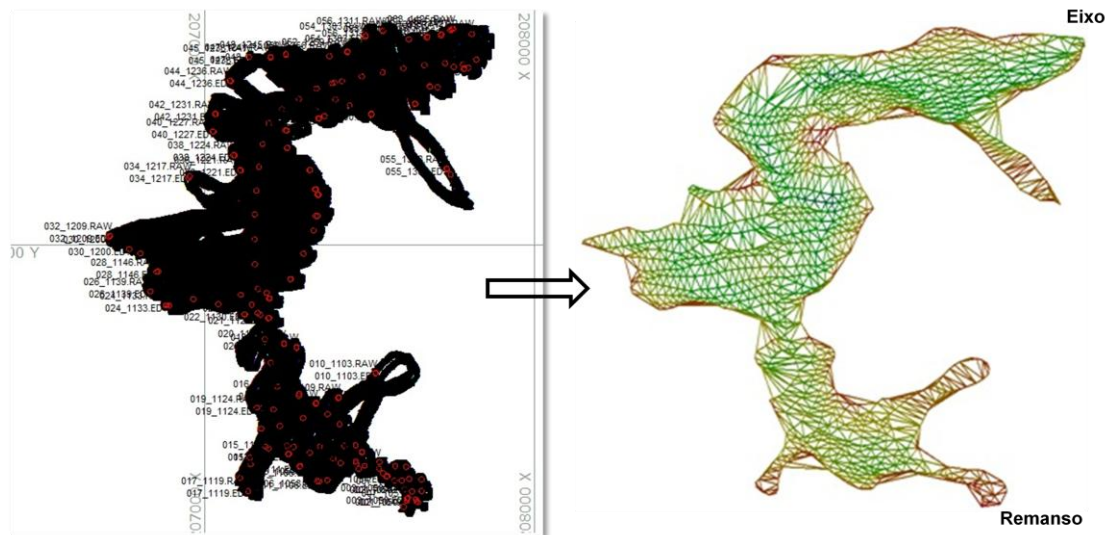


Figura 38 - Interpolação dos dados brutos coletados no primeiro levantamento batimétrico.

Após a interpolação dos dados coletados, o *software* pode gerar um MDE para o reservatório. Para uma melhor visualização, colocou-se uma imagem de satélite, obtida do software Google Earth, ao fundo deste MDE criado (Figura 39). A partir da análise desta imagem pode-se observar que as menores profundidades encontram-se próximas ao remanso, nos braços e em algumas curvas do reservatório, onde é comum a formação de bancos de sedimentos. A profundidade mínima encontrada pelo software foi de 0,8 m, e a máxima de 26,2 m.

A partir do MDE do reservatório, pode-se gerar um mapa com curvas de nível de 1 em 1 m (Figura 40). Neste mapa, optou-se por destacar as curvas de nível principais, em linhas contínuas, de 5 em 5 m e curvas secundárias, em linhas pontilhadas, de 1 em 1 m.

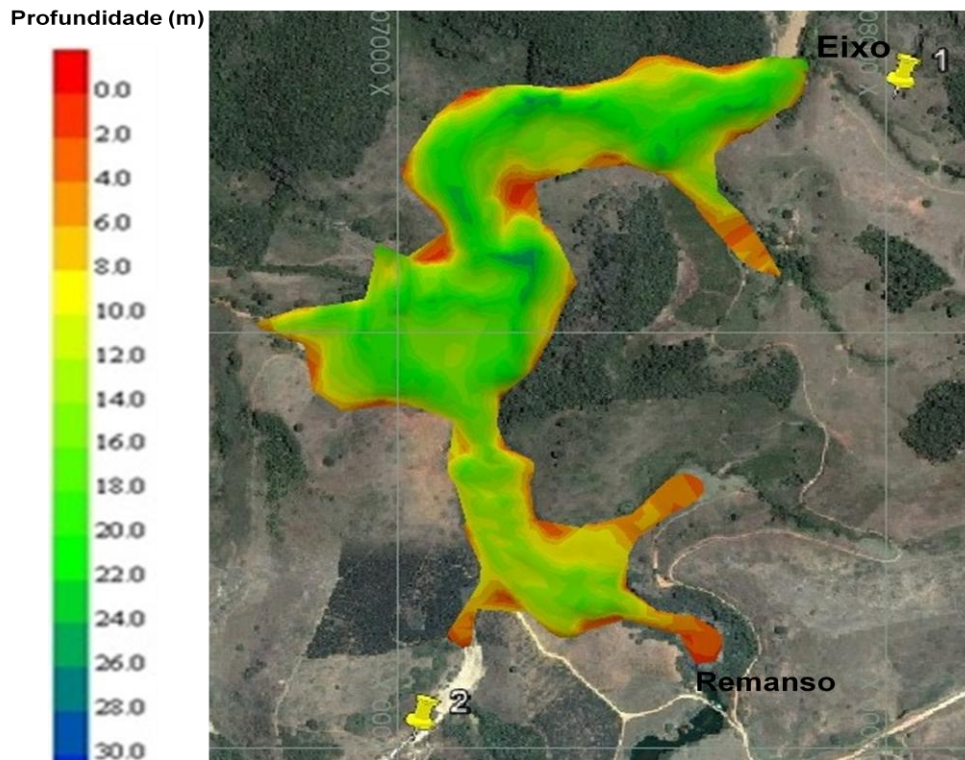


Figura 39 - MDE do reservatório da PCH Pipoca, MG, gerado pelo software HYPACK.

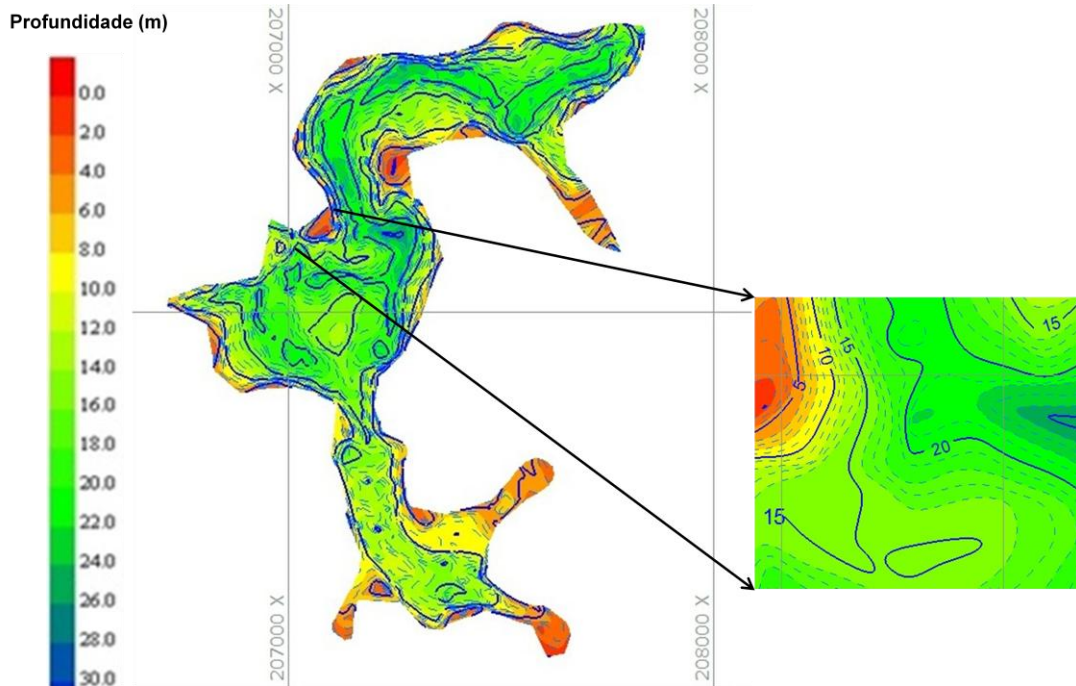


Figura 40 - Curvas de nível do reservatório da PCH Pipoca, MG, geradas pelo software HYPACK.

O MDE gerado pelo *software* HYPACK não foi utilizado para cálculo do volume de sedimento depositado e na geração da curva cota x área x volume do reservatório. Isto se deve ao fato do levantamento batimétrico não contemplar completamente a área do reservatório, por não ser possível chegar com o equipamento bem próximo das margens e do eixo da barragem. Desta maneira, para uma estimativa mais apurada, exportaram-se os pontos xyz do *software* HYPACK para o *software* ArcGis, onde foi gerado um novo MDE com a verdadeira borda do reservatório, criada manualmente a partir de uma imagem de satélite.

4.3.2. Produtos finais do segundo levantamento batimétrico

Assim como foi realizado no primeiro levantamento batimétrico, os dados brutos coletados, durante o segundo levantamento batimétrico, foram interpolados pelo *software* HYPACK por meio do método TIN (Figura 41).

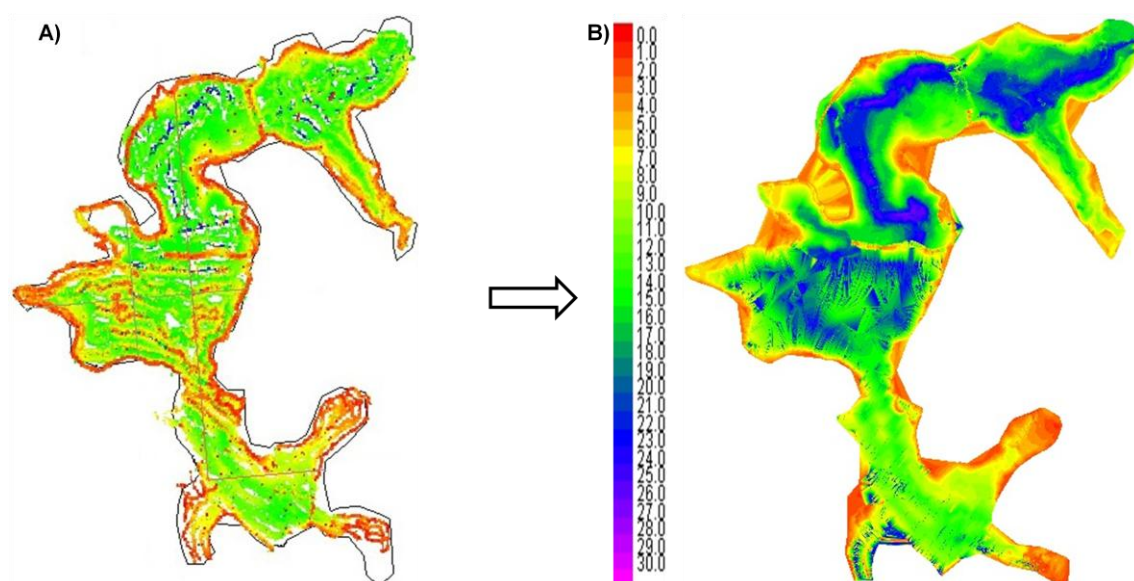


Figura 41 - Imagens da segunda batimetria geradas no *software* HYPACK. A) Dados brutos coletados e B) Imagem 2D do reservatório da PCH Pipoca, MG.

A imagem B), da Figura 41, representa o MDE do reservatório da PCH Pipoca, com maior nível de detalhe quando comparado ao MDE gerado após o primeiro levantamento batimétrico realizado no reservatório. Este fato já era esperado, pois foi utilizado um ecobatímetro multifeixe na coleta dos dados.

Uma imagem 3D do reservatório pode ser visualizada na Figura 42. Se dividirmos o reservatório em duas partes, pode-se observar que a porção mais próxima ao eixo da barragem, apresentou uma qualidade melhor nos dados coletados, ao contrário da segunda porção, mais próxima do remanso.

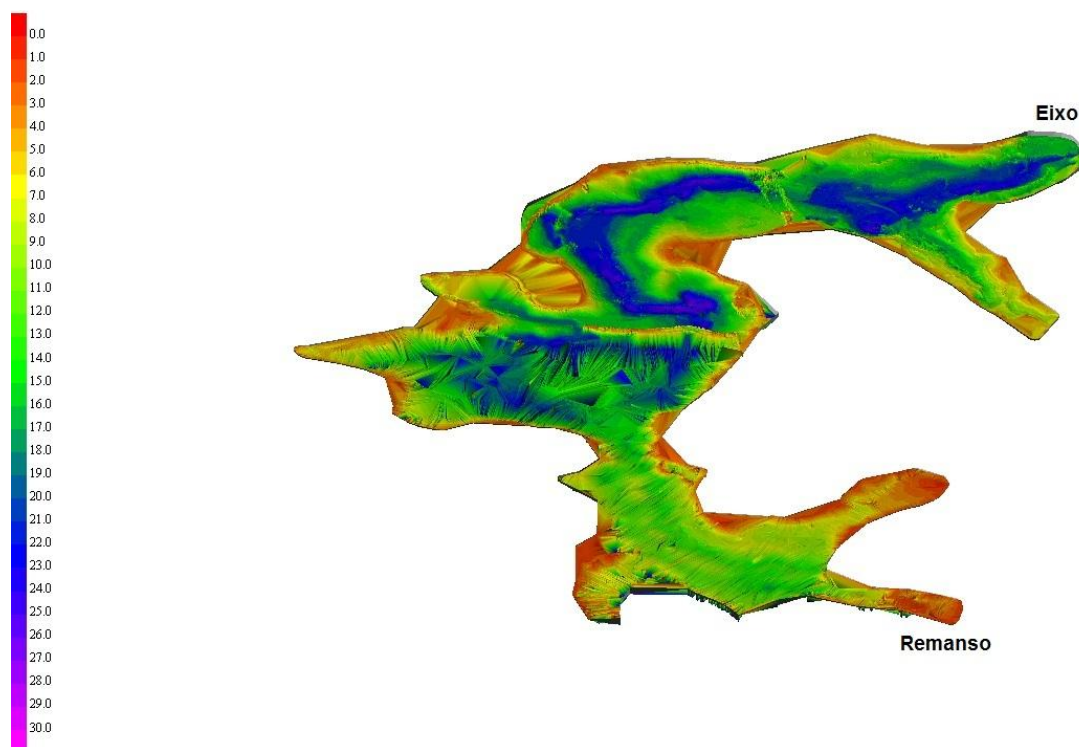


Figura 42 - Imagem 3D do reservatório da PCH Pipoca, MG, produzida pelo software HYPACK.

Assim como foi feito com os dados do primeiro levantamento batimétrico, exportaram-se os pontos xyz do software HYPACK para o software ArcGIS, que foram utilizados para a geração do MDE do reservatório.

4.4. Geração dos MDEs e CAVs

4.4.1. MDE e CAV anterior ao enchimento do reservatório

De posse do levantamento topográfico realizado antes do enchimento do reservatório, das seções batimétricas, medidas e propostas, e do contorno da área de estudo, gerou-se o MDE do reservatório anterior ao seu enchimento (Figura 43).

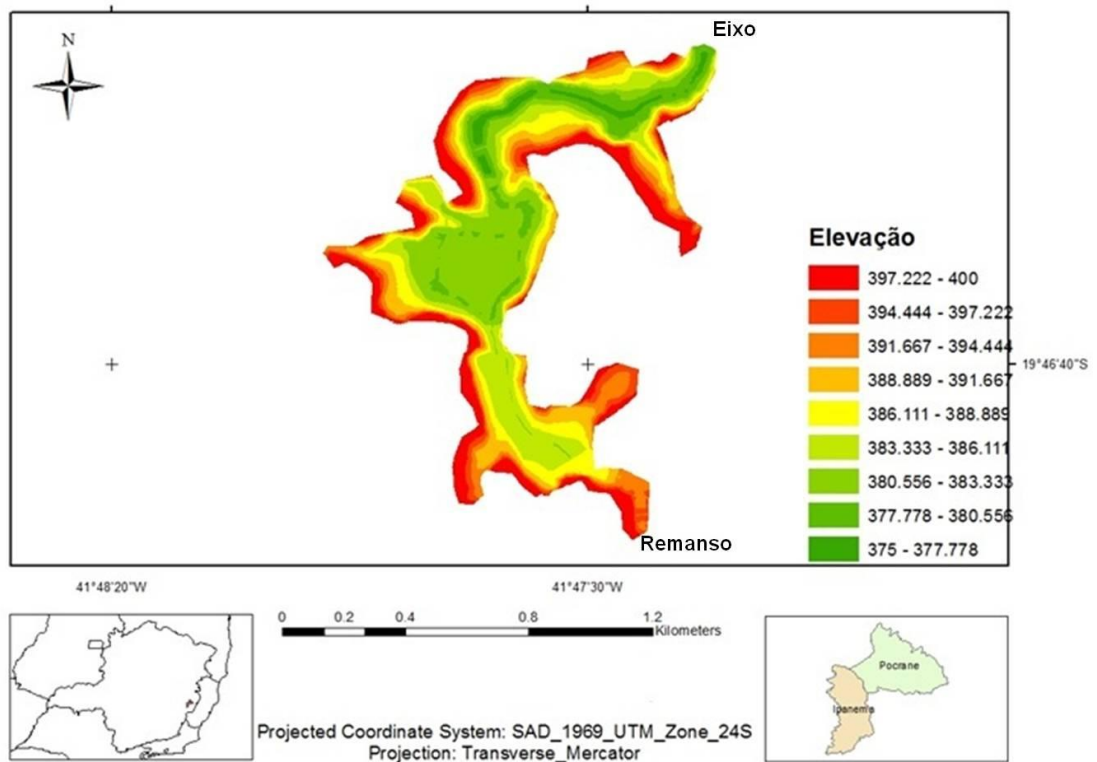


Figura 43 - MDE anterior ao enchimento do reservatório da PCH Pipoca - MG, 2006.

Como não foi realizado um levantamento batimétrico logo após o enchimento do reservatório, foi necessária a geração deste MDE a partir das informações disponibilizadas. Isto foi realizado para posterior comparação com os MDEs gerados nas batimetrias do reservatório.

A partir dos dados deste MDE gerou-se um gráfico com a curva CAV, representativa para a região do reservatório da PCH Pipoca no ano de 2006 (Gráfico 7).

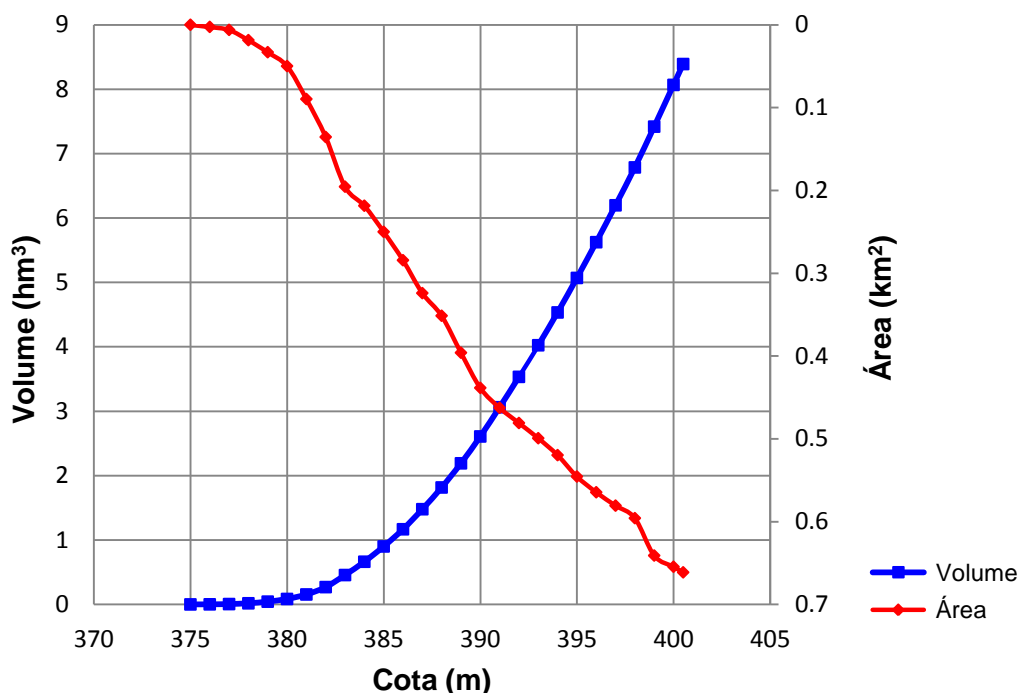


Gráfico 7 - CAV anterior ao enchimento do reservatório da PCH Pipoca - MG, 2006.

4.4.2. MDE e CAV do primeiro levantamento batimétrico

Com os dados coletados no primeiro levantamento batimétrico e o limite real do reservatório gerou-se o MDE e a curva CAV posteriores ao seu enchimento (Figura 44 e Gráfico 8). Este MDE representa o terreno do reservatório após seis anos do início de sua construção.

Quando comparado ao MDE gerado pelo *software* HYPACK, o MDE obtido pelo *software* ArcGIS apresentou maior nível de detalhe da morfologia do terreno e profundidades menores na região mais próxima ao remanso e braços. O MDE gerado pelo *software* ArcGIS, a partir do método TIN, é amplamente utilizado em estudos de avaliação do assoreamento de reservatórios.

Por motivos de segurança, durante o levantamento batimétrico, não é permitida grande aproximação da embarcação até o eixo da barragem. Portanto, a região entre a área levantada pela batimetria e o eixo da barragem é interpolada durante a geração do MDE. Esta interpolação não fornece a real profundidade da região próxima ao eixo e à tomada d'água da barragem.

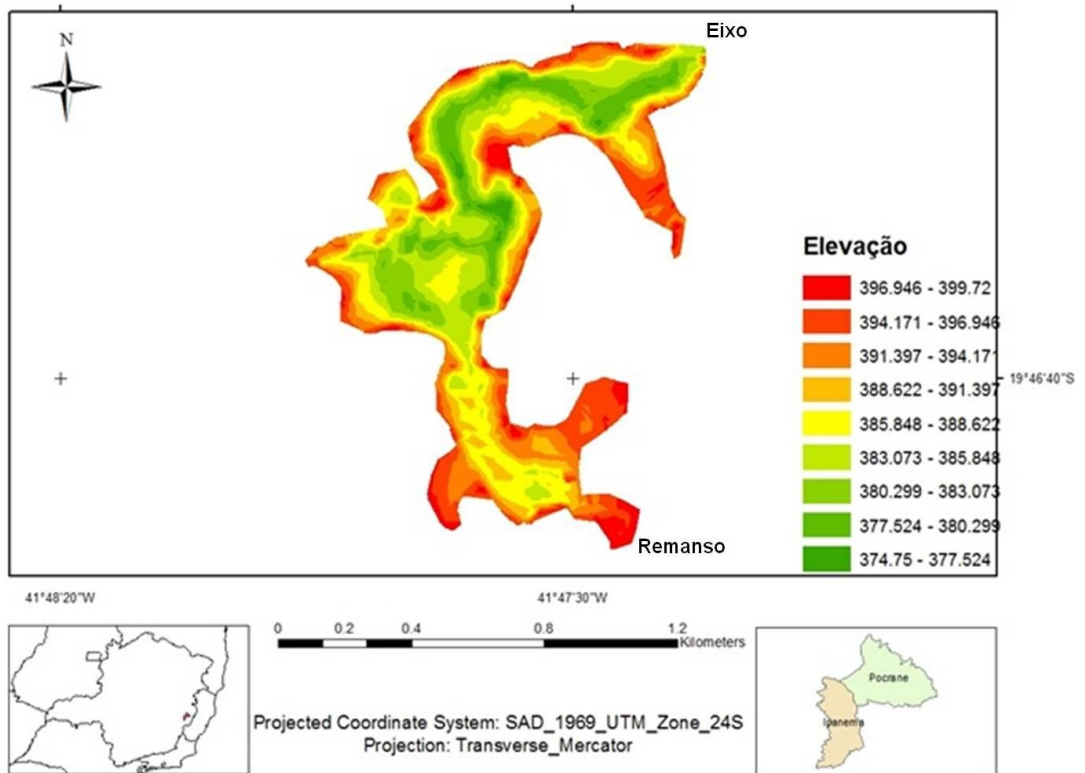


Figura 44 - MDE posterior ao enchimento do reservatório da PCH Pipoca, MG, oriundo do primeiro levantamento batimétrico, 2012.

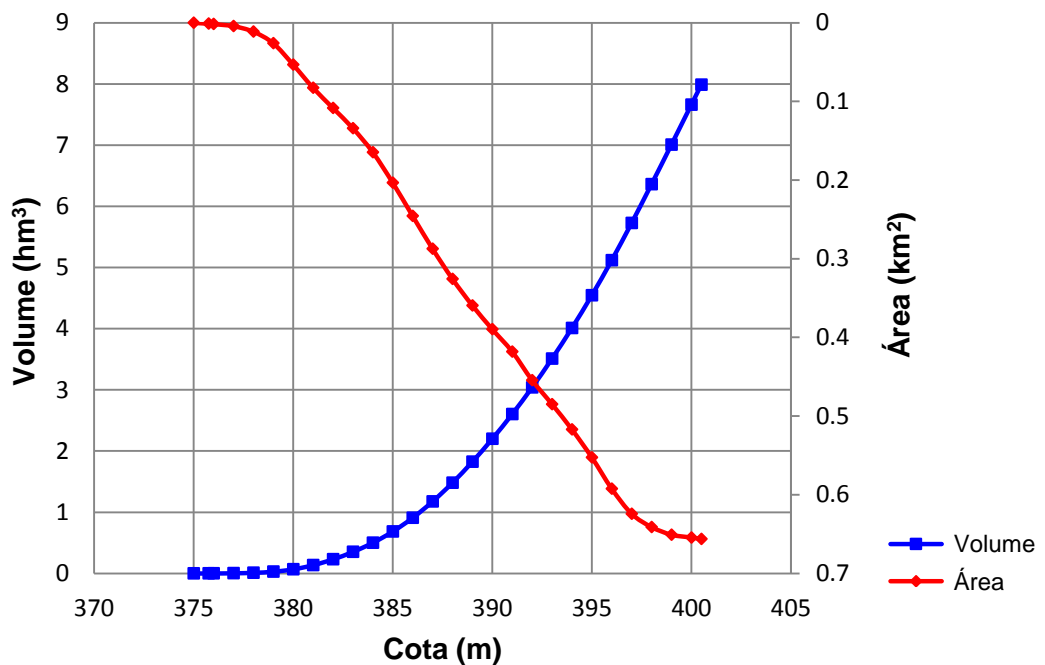


Gráfico 8 – Curva CAV do primeiro levantamento batimétrico do reservatório da PCH Pipoca, MG, 2012.

No MDE da Figura 44 observa-se que próximo ao eixo da barragem os sedimentos estão aproximadamente entre as cotas 383,0 e 385,8 m. Porém, de acordo com o projeto básico do empreendimento, a soleira da tomada d'água encontra-se localizada na cota 384 m. Dessa maneira, se levarmos este fator em consideração, a tomada d'água já estaria praticamente assoreada, com os sedimentos alcançando a sua cota. Porém, não é possível afirmar este fato com exatidão, já que o levantamento batimétrico não foi possível de ser realizado até bem próximo à região da tomada d'água. Além disso, um dique submerso foi implantado próximo à entrada do canal de adução com crista na cota 386 m, para evitar que os sedimentos alcancem o circuito de adução da usina. Há uma hipótese do levantamento batimétrico ter alcançado a região deste dique, indicando a presença de menores profundidades.

4.4.3. MDE e CAV do segundo levantamento batimétrico

Gerou-se o MDE e a curva CAV, do segundo levantamento batimétrico, da mesma maneira utilizada no primeiro levantamento, ou seja, a partir dos pontos xyz importados do *software* HYPACK e do limite real do reservatório (Figura 45 e Gráfico 9).

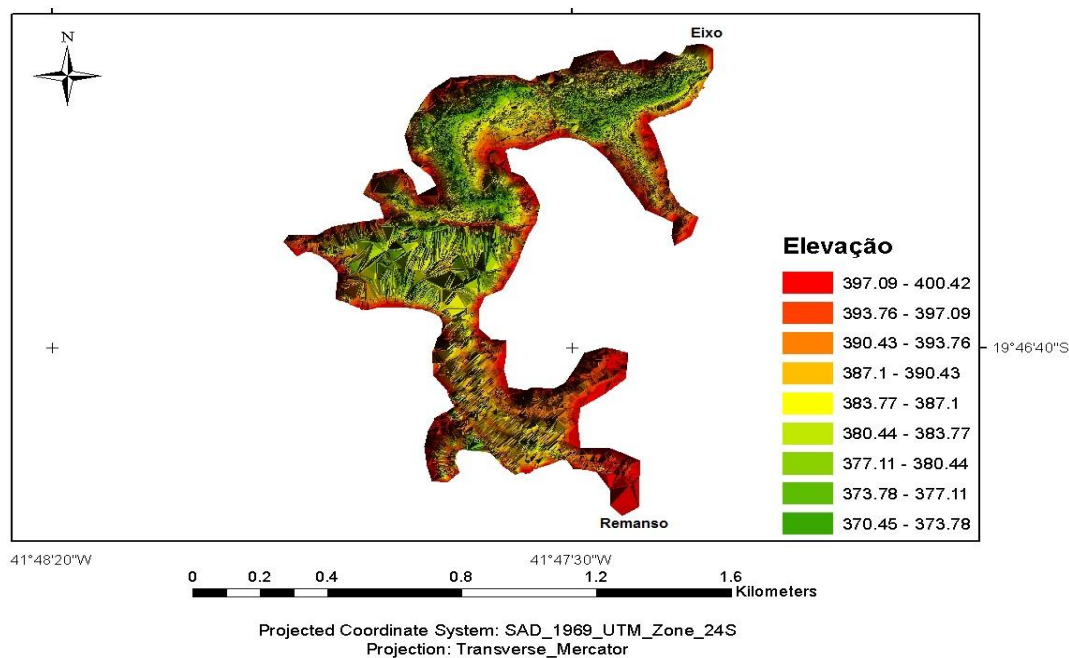


Figura 45 - MDE posterior ao enchimento do reservatório da PCH Pipoca, MG, oriundo do segundo levantamento batimétrico, 2013.

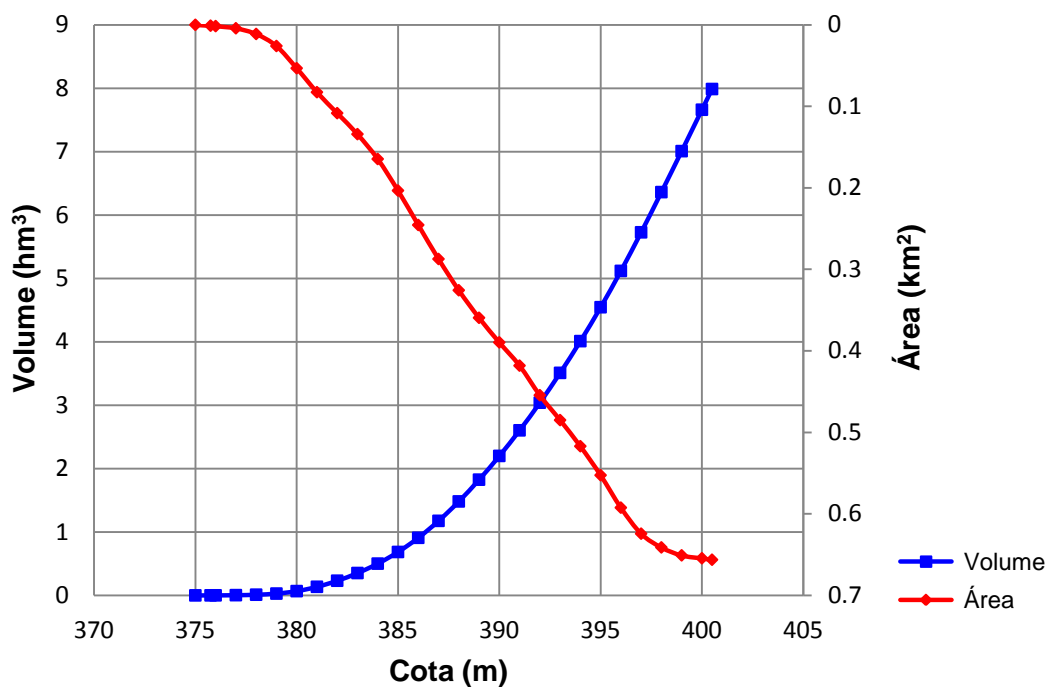


Gráfico 9 - Curva CAV do segundo levantamento batimétrico do reservatório da PCH Pipoca, MG, 2013.

Quando comparado ao MDE gerado pelo *software* HYPACK e o MDE gerado no primeiro levantamento batimétrico, este MDE apresentou um maior nível de detalhamento. Com base em um maior número de dados coletados e um levantamento mais detalhado da área submersa ao reservatório, este MDE apresentou profundidades maiores quando comparado ao MDE da primeira batimetria, cerca de 4 m superiores.

4.5. Volume de sedimento depositado a partir da comparação entre curvas CAV

O Gráfico 10 representa a variação do volume do reservatório em 2006, antes do enchimento, em 2012, após o primeiro levantamento batimétrico e em 2013, após o segundo levantamento batimétrico.

Considerando a cota 400,5 m, referente ao nível d'água máximo normal do reservatório, a Tabela 11 apresenta o volume do reservatório (Vol. reservatório), o volume de sedimento depositado (Vol. sed. depositado) e a taxa média anual de assoreamento do reservatório (Tx. assoreamento). Estas

características são apresentadas de acordo com os anos antes do enchimento do reservatório (2006) e do primeiro (2012) e segundo levantamento batimétrico (2013). A diferença encontrada no valor do volume de sedimento depositado é função do tipo de equipamento utilizado em cada levantamento batimétrico.

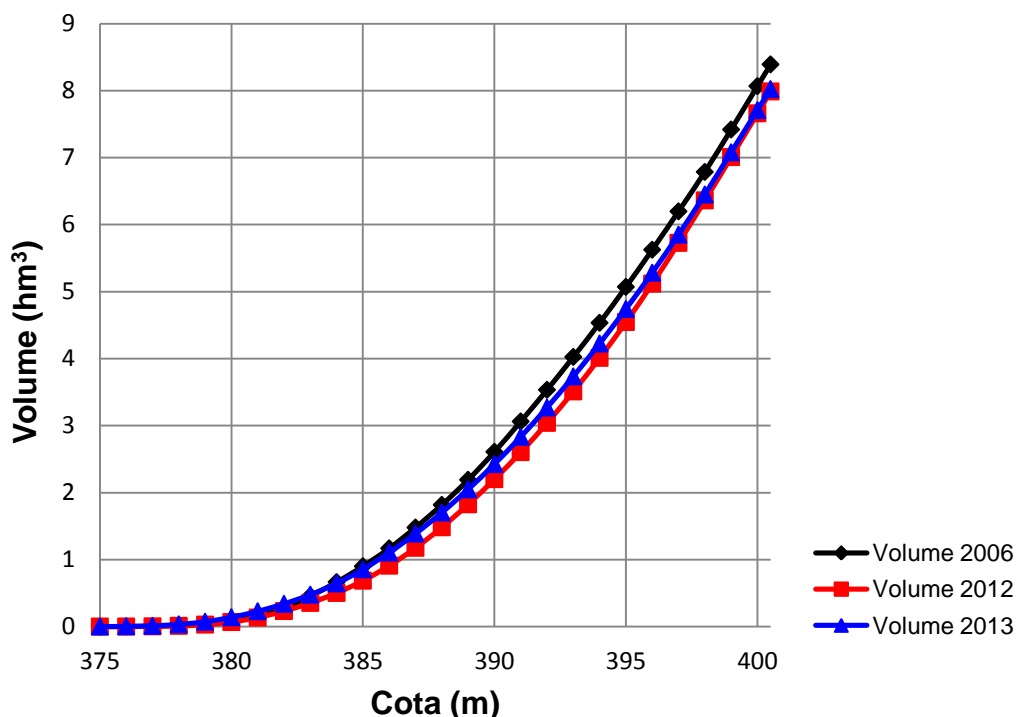


Gráfico 10 - Volume do reservatório para os anos 2006 (antes do enchimento), 2012 (primeira batimetria) e 2013 (segunda batimetria).

Tabela 11 - Volume do reservatório, volume de sedimento depositado e taxa média anual de assoreamento do reservatório, para os anos 2006 (antes do enchimento), 2012 (primeira batimetria) e 2013 (segunda batimetria).

Ano	Vol. reservatório (hm ³)	Vol. sed. depositado (hm ³)	Tx. Assoreamento (%)
2006	8,390	-	-
2012	7,986	0,404	0,80
2013	8,021	0,369	0,63

4.6. Produtos finais do *software* SEDIMENT

4.6.1. Cenários para a estimativa do volume de sedimento depositado

Para a estimativa do volume de sedimentos depositado no reservatório da PCH Pipoca, um primeiro cenário foi criado partir de dados disponíveis no projeto básico do empreendimento, com exceção dos valores referentes à granulometria dos sedimentos. Os resultados desta primeira simulação, realizada pelo *software* SEDIMENT, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado do cenário 1, *software* SEDIMENT.

Tempo [anos]	Vsól. depos. [hm ³]	Vsól. efluente [hm ³]	Er [%]	Gama ap. [t/m ³]	Qsól. afluyente [t/ano] x10 ³	Qsól. efluente [t/ano] x10 ³	Vs depos. / Vtotal reserv.
1	0.031	0.028	69.143	0.860	38.62	11.92	0.004
2	0.060	0.040	69.074	0.897	39.01	12.06	0.007
3	0.088	0.053	69.006	0.919	39.40	12.21	0.011
4	0.116	0.065	68.939	0.935	39.79	12.36	0.014
5	0.143	0.078	68.872	0.948	40.19	12.51	0.018
6	0.171	0.090	68.804	0.959	40.59	12.66	0.021
7	0.198	0.103	68.737	0.968	41.00	12.82	0.024
8	0.226	0.115	68.669	0.976	41.41	12.97	0.028
9	0.253	0.128	68.600	0.983	41.82	13.13	0.031
10	0.281	0.141	68.531	0.990	42.24	13.29	0.034
50	1.530	0.771	64.928	1.092	62.89	22.06	0.187
100	3.655	2.176	56.568	1.137	103.43	44.92	0.447

Assim como nos estudos do projeto básico da PCH Pipoca, o *software* SEDIMENT também utilizou o método empírico de redução de área de Borland & Miller para o cálculo do volume de sedimento depositado. Porém, apesar de se basearem na mesma metodologia, os estudos do projeto básico e as análises realizadas no *software* encontraram resultados divergentes.

Os estudos do projeto básico do empreendimento indicaram que após 50 anos de operação o volume de sedimento depositado no reservatório seria de aproximadamente 0,9 hm³, alcançando a cota 380,7 m. Após 100 anos de operação, este mesmo volume seria de aproximadamente 1,7 hm³, chegando até a cota 381,5 m, bem abaixo da cota da soleira da tomada d'água. Porém, o *software* SEDIMENT indicou para este primeiro cenário que após 50 e 100 anos de operação, os volumes de sedimento depositado seriam de 1,530 hm³ e 3,655 hm³, respectivamente. Os valores estimados pelo *software* foram significativamente maiores do que aqueles definidos no projeto básico, 67% após 50 anos e 118% após 100 anos de operação.

Após 6 anos de operação, o *software* estimou o volume de sedimento depositado como sendo igual a 0,171 hm³, referente ao ano de 2012 quando foi realizada a primeira batimetria no reservatório. Em 2013, ano em que foi realizado a segunda batimetria este volume seria igual a 0,198 hm³.

O segundo cenário foi feito com alguns dados do projeto básico e outros atuais obtidos a partir do presente estudo. Os resultados desta segunda simulação são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado do cenário 2, *software* SEDIMENT.

Tempo [anos]	Vsól. depos. [hm ³]	Vsól. efluente [hm ³]	Er [%]	Gama ap. [t/m ³]	Qsól. afluyente [t/ano] x10 ³	Qsól. efluente [t/ano] x10 ³	Vs depos. / Vtotal reserv.
1	0.034	0.021	76.483	0.860	38.62	9.08	0.004
2	0.066	0.031	76.408	0.897	39.01	9.20	0.008
3	0.097	0.040	76.349	0.919	39.40	9.32	0.012
4	0.128	0.050	76.293	0.935	39.79	9.43	0.016
5	0.159	0.059	76.236	0.948	40.19	9.55	0.019
6	0.189	0.069	76.179	0.959	40.59	9.67	0.023
7	0.220	0.078	76.121	0.968	41.00	9.79	0.027
8	0.250	0.088	76.064	0.976	41.41	9.91	0.031
9	0.281	0.098	76.005	0.983	41.82	10.04	0.034
10	0.311	0.107	75.947	0.990	42.24	10.16	0.038
50	1.703	0.593	72.807	1.092	62.89	17.10	0.208
100	4.105	1.720	63.595	1.137	103.43	37.65	0.501

Os resultados do cenário 2 foram similares aos apresentados no cenário 1, porém um pouco superiores. Após 6 (2012) e 7 (2013) anos de operação o *software* estimou o volume de sedimento depositado como sendo igual a 0,189 hm³ e 0,220 hm³, respectivamente. Para 50 e 100 anos de operação os volumes de sedimento depositado seriam de 1,703 hm³ e 4,105 hm³, respectivamente.

4.6.2. Cenários do estudo paramétrico

Os resultados dos cenários 3, 4, 5 e 6, citados no item 3.3.10., utilizados na realização do estudo paramétrico do *software* SEDIMENT, são apresentados nas Tabela 17, Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17, respectivamente.

Tabela 14 - Resultado do cenário 3, software SEDIMENT.

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm ³)	Vsól. efluente (hm ³)	Er (%)	Gama ap. (t/m ²)	Qsól. afluente (t/ano) x10 ³	Qsól. efluente (t/ano) x10 ³	Vs depos. / Vtotal reserv.
1	0.035	0.020	78.233	0.860	38.62	8.41	0.004
2	0.068	0.028	78.169	0.897	39.01	8.52	0.008
3	0.100	0.037	78.106	0.919	39.40	8.63	0.011
4	0.131	0.046	78.043	0.935	39.79	8.74	0.015
5	0.162	0.055	77.980	0.948	40.19	8.85	0.018
6	0.193	0.064	77.917	0.959	40.59	8.96	0.021
7	0.225	0.073	77.854	0.968	41.00	9.08	0.025
8	0.256	0.082	77.790	0.976	41.41	9.20	0.028
9	0.287	0.091	77.726	0.983	41.82	9.32	0.032
10	0.318	0.100	77.661	0.990	42.24	9.44	0.035
50	1.742	0.553	74.686	1.092	62.89	15.92	0.194
100	4.234	1.587	67.005	1.137	103.43	34.13	0.470

Tabela 15 - Resultado do cenário 4, software SEDIMENT.

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm ³)	Vsól. efluente (hm ³)	Er (%)	Gama ap. (t/m ²)	Qsól. afluente (t/ano) x10 ³	Qsól. efluente (t/ano) x10 ³	Vs depos. / Vtotal reserv.
1	0.034	0.022	75.008	0.860	38.62	9.65	0.004
2	0.065	0.033	74.948	0.897	39.01	9.77	0.008
3	0.095	0.043	74.888	0.919	39.40	9.89	0.012
4	0.126	0.053	74.829	0.935	39.79	10.02	0.015
5	0.156	0.063	74.770	0.948	40.19	10.14	0.019
6	0.185	0.073	74.710	0.959	40.59	10.27	0.023
7	0.215	0.083	74.651	0.968	41.00	10.39	0.026
8	0.245	0.093	74.591	0.976	41.41	10.52	0.030
9	0.275	0.104	74.530	0.983	41.82	10.65	0.034
10	0.305	0.114	74.469	0.990	42.24	10.78	0.037
50	1.669	0.629	71.220	1.092	62.89	18.10	0.204
100	4.011	1.815	61.888	1.137	103.43	39.42	0.490

Tabela 16 - Resultado do cenário 5, software SEDIMENT.

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm ³)	Vsól. efluente (hm ³)	Er (%)	Gama ap. (t/m ²)	Qsól. afluente (t/ano) x10 ³	Qsól. efluente (t/ano) x10 ³	Vs depos. / Vtotal reserv.
1	0.038	0.023	76.474	0.860	42.48	9.99	0.005
2	0.073	0.034	76.395	0.897	42.91	10.13	0.009
3	0.107	0.044	76.332	0.919	43.34	10.26	0.013
4	0.141	0.055	76.269	0.935	43.77	10.39	0.017
5	0.174	0.065	76.206	0.948	44.21	10.52	0.021
6	0.208	0.076	76.143	0.959	44.65	10.65	0.025
7	0.241	0.086	76.080	0.968	45.10	10.79	0.029
8	0.275	0.097	76.016	0.976	45.55	10.92	0.034
9	0.308	0.108	75.952	0.983	46.00	11.06	0.038
10	0.342	0.118	75.887	0.990	46.46	11.20	0.042
50	1.868	0.658	72.361	1.092	69.18	19.12	0.228
100	4.464	1.946	61.420	1.137	113.78	43.89	0.545

Tabela 17 - Resultado cenário 6, software SEDIMENT.

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm ³)	Vsól. efluente (hm ³)	Er (%)	Gama ap. (t/m ²)	Qsól. afluente (t/ano) x10 ³	Qsól. efluente (t/ano) x10 ³	Vs depos. / Vtotal reserv.
1	0.034	0.022	75.748	0.860	38.62	9.37	0.004
2	0.066	0.032	75.688	0.897	39.01	9.48	0.008
3	0.096	0.041	75.630	0.919	39.40	9.60	0.012
4	0.127	0.051	75.572	0.935	39.79	9.72	0.015
5	0.157	0.061	75.514	0.948	40.19	9.84	0.019
6	0.187	0.071	75.455	0.959	40.59	9.96	0.023
7	0.217	0.081	75.397	0.968	41.00	10.09	0.027
8	0.248	0.091	75.338	0.976	41.41	10.21	0.030
9	0.278	0.101	75.279	0.983	41.82	10.34	0.034
10	0.308	0.111	75.219	0.990	42.24	10.47	0.038
50	1.686	0.611	72.024	1.092	62.89	17.59	0.206
100	4.058	1.767	62.750	1.137	103.43	38.53	0.496

Para avaliar as quatro simulações criou-se a Tabela 18 para a interpretação dos resultados e a análise da sensibilidade dos parâmetros de entrada. A sensibilidade foi avaliada a partir da diferença percentual do volume de sedimento depositado nas quatro simulações, após 100 anos de operação, em relação ao volume de sedimento depositado obtido no cenário 2 (4,105 hm³).

Tabela 18 - Avaliação da sensibilidade de parâmetros de entrada do *software* SEDIMENT.

Cenário	Parâmetro avaliado	V _{sól.} depos. (hm ³) após 100 anos	Módulo do coeficiente de sensibilidade (%)
3	Volume do reservatório	4,234	3,14
4	Descarga líquida	4,011	2,29
5	Descarga sólida	4,464	8,75
6	Comprimento do reservatório	4,058	1,15

Entre os quatro parâmetros de entrada avaliados, aquele que apresentou sensibilidade de maior magnitude, em relação à variação dos resultados finais foi a descarga sólida. Quanto maior o valor da descarga sólida, maior será a quantidade de sedimentos afluente ao reservatório e, conseqüentemente, maior a possibilidade da deposição destes sedimentos. O comprimento do reservatório apresentou a sensibilidade de menor magnitude, apresentando um volume de sedimento depositado mais próximo ao volume encontrado no cenário 2.

4.7. Produtos finais do *software* DPOSIT

Utilizou-se o *software* DPOSIT para estimar a distribuição de sedimentos depositados, ao longo do tempo, no reservatório da PCH Pipoca. Deu-se continuidade às simulações iniciadas no *software* SEDIMENT feitas para os cenários 1 e 2.

Assim como no projeto básico do empreendimento, a simulação do *software* DPOSIT, para ambos os cenários, classificou o reservatório como sendo do tipo III, “reservatório em região montanhosa” (Tabela 19).

Tabela 19 - Classificação do tipo de reservatório pelo software DPOSIT para cada cenário.

Cenário	Incidência (%)				Tipo adotado
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	
1	8	44	48	0	III
2	8	44	48	0	III

Os resultados das curvas cota x área x volume são apresentados de forma comparativa entre os cenários simulados. Na Figura 46 apresentam-se as curvas originais dos cenários, na Figura 47 as curvas anuais para os primeiros 10 anos e, na Figura 48, as curvas de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 anos. Estas figuras apresentam a evolução das características de área e volume ao longo dos anos de operação, para o reservatório da PCH Pipoca, devido à deposição de sedimentos. As curvas, para ambos os cenários, foram muito semelhantes, apresentando poucas diferenças.

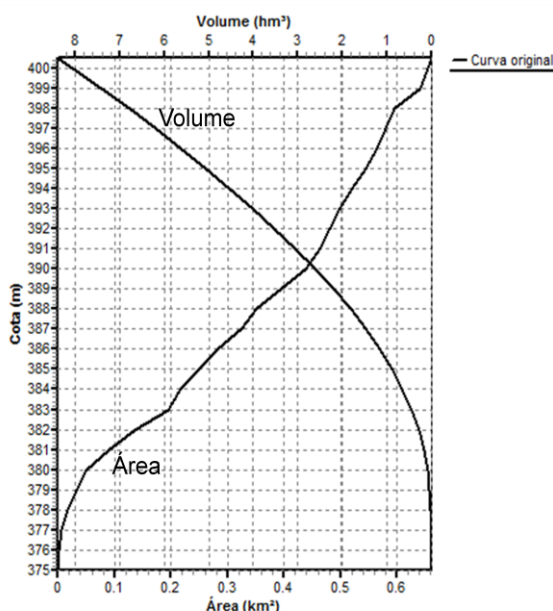


Figura 46 - Curvas cota x área x volume originais para os cenários 1 e 2, computadas de *software* DPOSIT para o reservatório da PCH Pipoca.

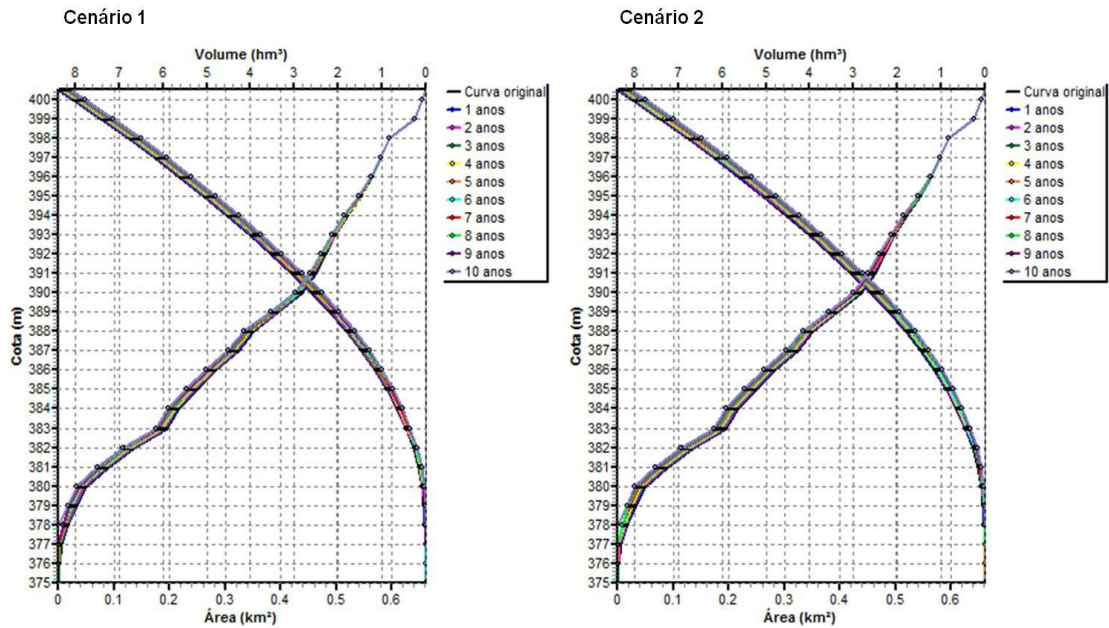


Figura 47 - Curvas cota x área x volume dos cenários 1 e 2, de 1 até 10 anos, computadas de *software* DPOSIT para o reservatório da PCH Pipoca.

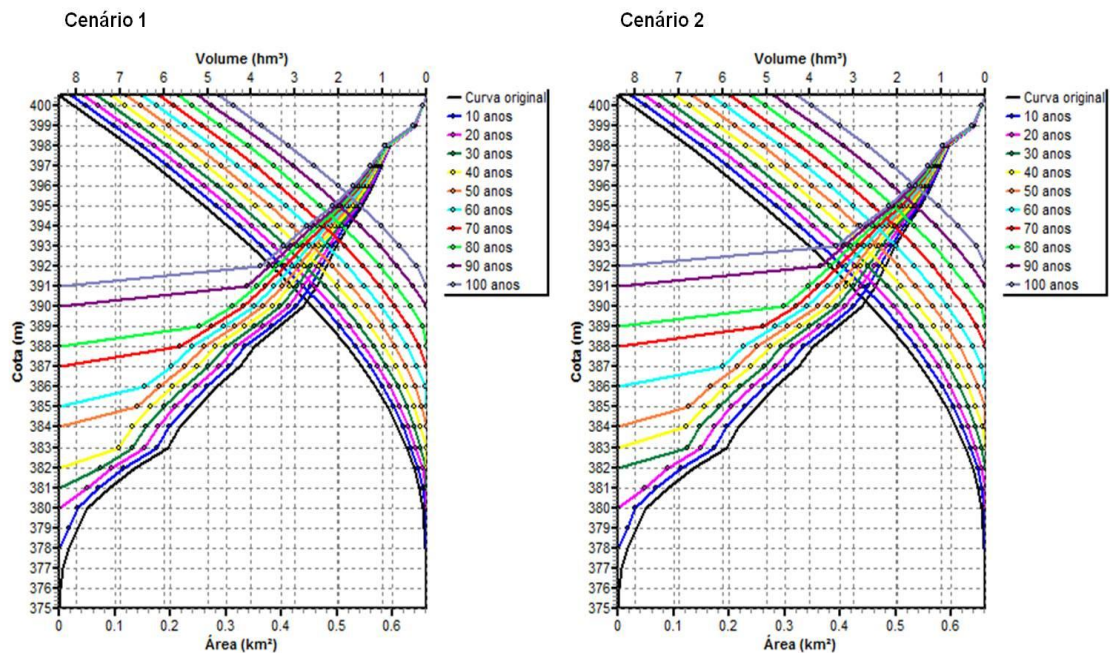


Figura 48 - Curvas cota x área x volume dos cenários 1 e 2, para 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 anos, computadas de *software* DPOSIT para o reservatório da PCH Pipoca.

O Gráfico 11 apresenta a comparação entre a curva CAV do cenário 2, para 6 anos, com a curva CAV obtida na primeira batimetria (2012). Da mesma

maneira, o Gráfico 12 apresenta a comparação entre a curva CAV do cenário 2, para 7 anos, com a curva CAV obtida na segunda batimetria (2013). Nos dois gráficos observa-se um comportamento semelhante entre as curvas de área e entre as curvas de volume, mas as comparações feitas na segunda batimetria, realizada com o ecobatímetro multifeixe, são melhores, como era de se esperar.

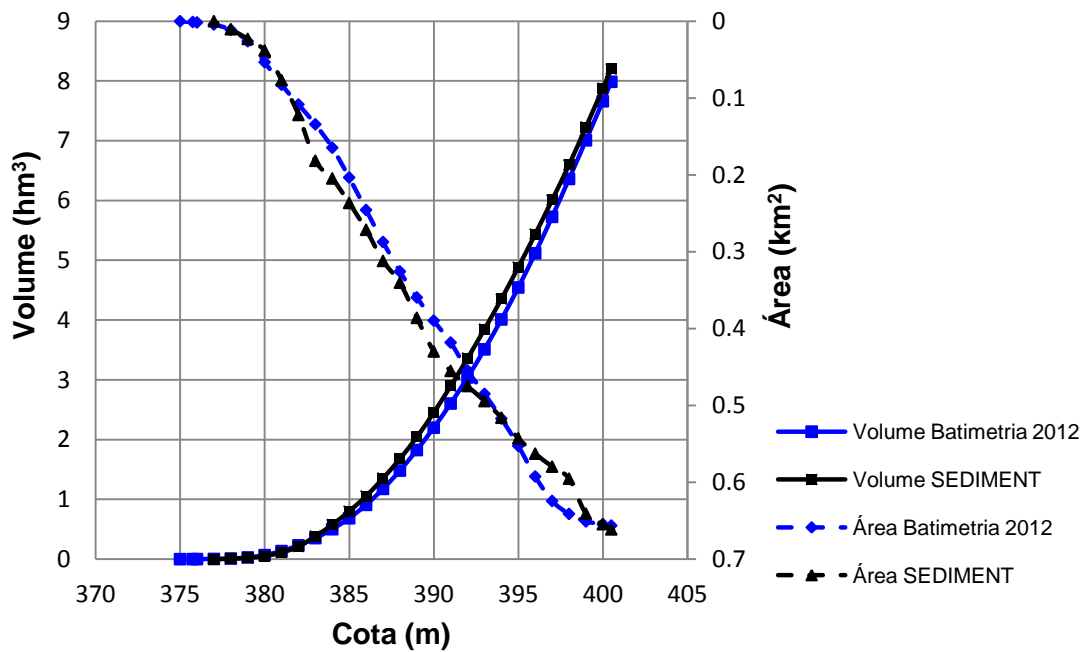


Gráfico 11 - Comparação das curvas CAV do cenário 2 (6 anos) com a primeira batimetria (2012).

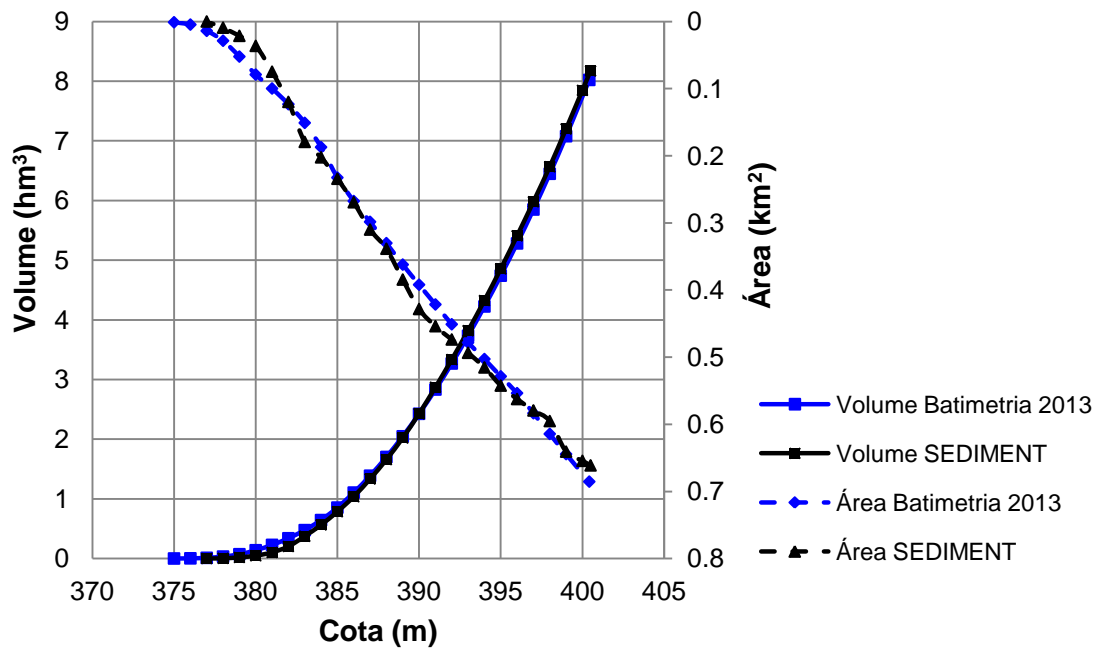


Gráfico 12 - Comparação das curvas CAV do cenário 2 (7 anos) com a segunda batimetria (2013).

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi avaliado o processo de assoreamento do reservatório da PCH Pipoca, MG, através da realização de dois levantamentos batimétricos, da caracterização de sedimentos do leito do reservatório e de métodos empíricos automatizados em dois *softwares* (SEDIMENT e DPOSIT).

As amostras dos sedimentos depositados no leito do reservatório apresentaram, em sua maioria, uma quantidade maior da fração argila, seguida da fração silte e da fração areia. Desta forma, os sedimentos foram caracterizados como argilo siltosos. Apenas a amostra coletada no remanso do reservatório apresentou em sua composição 100% de areia. Possivelmente, no reservatório da PCH Pipoca isto não aconteceu porque no reservatório da PCH Neblina, que está próxima e a montante de Pipoca, os sedimentos mais grossos ficam retidos e só uma pequena quantidade destes e os sedimentos mais finos extravasam, rumo ao reservatório da PCH Pipoca.

A massa específica das partículas não apresentou uma variação expressiva entre as amostras de sedimento coletadas ao longo do reservatório (valor médio em torno de $2,66 \text{ g.cm}^{-3}$), exceto em relação à amostra do remanso ($2,72 \text{ g.cm}^{-3}$).

Como o reservatório não possui medições de vazão afluente utilizou-se o ADCP na realização de uma medição de vazão no remanso do reservatório. O valor encontrado pelo equipamento ($13,672 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) foi próximo ao valor de vazão defluente da PCH Neblina ($15,21 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), localizada a montante do reservatório.

Foram realizados dois levantamentos batimétricos no reservatório. No primeiro, com um ecobatímetro monofeixe, a montagem dos equipamentos, a preparação inicial e o processamento dos dados coletados foram mais simples e menos trabalhosos do que no segundo levantamento, feito com um ecobatímetro multifeixe. O segundo levantamento proporcionou um melhor levantamento do terreno, devido a uma varredura mais abrangente da área e a maior quantidade de dados coletados.

O volume de sedimentos encontrado com o primeiro levantamento batimétrico foi maior do que com o segundo. Isto pode ser justificado porque quando se usa o ecobatímetro monofeixe, mesmo fazendo um grande número de seções, só se consegue levantar menos de 10% da área total. Portanto, o cálculo do volume é feito a partir de muita interpolação entre os resultados efetivamente medidos. O ecobatímetro multifeixe é capaz de realizar o mapeamento de quase 100% da área, demandando pouca interpolação entre os dados coletados. Além disso, a precisão das medições feitas com o ecobatímetro multifeixe é maior do que a de um monofeixe. Por fim, no trabalho conduzido nesta dissertação o ecobatímetro multifeixe gerou resultados com melhor resolução e mais precisos.

Com relação às análises realizadas no *software* SEDIMENT, as estimativas de volume de sedimento depositado nos cenários 1 e 2 foram superiores àquelas previstas no projeto básico do empreendimento, o que acarretaria em um tempo de assoreamento do reservatório menor do que o esperado.

Os valores encontrados na estimativa do volume de sedimento depositado no reservatório, a partir dos dois levantamentos batimétricos, foram diferentes, mas foram próximos. No primeiro levantamento o volume encontrado foi de 0,404 hm³, maior do que no segundo levantamento, onde o volume encontrado foi de 0,369 hm³, e superior ao volume estimado pelo *software* SEDIMENT, de 0,189 hm³ (cenário 2). No segundo levantamento o volume de sedimento depositado foi menor do que no primeiro levantamento e superior ao volume estimado pelo *software* SEDIMENT, de 0,220 hm³ (cenário 2).

As taxas médias de deposição anual estimadas em ambas as batimetrias, 0,80% na primeira e 0,63% na segunda, foram próximas aos valores encontrados na literatura, sugeridas por Carvalho (2008) para os reservatórios brasileiros.

Na análise paramétrica do *software* SEDIMENT, destinada à avaliação da sensibilidade dos resultados mediante alterações em alguns parâmetros de entrada, a descarga sólida apresentou maior sensibilidade. Assim, quanto maior for o valor deste parâmetro, maior será a quantidade de sedimentos

afluente ao reservatório e, conseqüentemente, maior a possibilidade da deposição destes sedimentos.

Continuando as simulações realizadas nos cenários 1 e 2, utilizou-se também o *software* DPOSIT para estimar a distribuição de sedimentos depositados, ao longo do tempo, no reservatório da PCH Pipoca. Pode-se observar maiores diferenças entre as curvas CAV, geradas pelo *software*, partir de 30 anos de operação.

O gráfico comparativo entre a curva CAV do cenário 2, para 7 anos, e a curva CAV do segundo levantamento batimétrico (2013), apresentou um comportamento mais semelhante entre as curvas de área e entre as curvas de volume, do que o gráfico comparativo entre a curva CAV do cenário 2, para 6 anos, e a curva CAV do primeiro levantamento batimétrico (2012).

6. BIBLIOGRAFIA

ANA – Agência Nacional de Águas. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília: ANA, SGH, 2011.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução nº 652, 09 de Dezembro de 2003**. Estabelece os critérios para o enquadramento de aproveitamento hidrelétrico na condição de Pequena Central Hidrelétrica (PCH).

ANEEL/ANA - Agência Nacional de Energia Elétrica / Agência Nacional de Águas. **Resolução Conjunta nº03, 10 de Agosto de 2010**. Estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências.

ARCGIS HELP 10.1, 2011. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//00qn0000001p000000>. Acesso em: 20 junho 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

BLAKE, A.C., CHADWICK, D.B., WHITE, P.J., JONES, C.A. **User's guide for assessing sediment transport at navy facilities**. SSC San Diego, San Diego, CA, USA, 2007.

BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. Dissertação de mestrado, UFSM, Santa Maria, 1998. 118 p.

BRASIL. Projeto RADAMBRASIL. MME/SG. Volume 32: **Levantamento de recursos naturais. Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória**. Rio de Janeiro, 1983.

BRITO, G.M. **Processo de assoreamento da PCH Cachoeirão**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013. 107p.

BRUK, S. **Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs**. UNESCO. Paris, França, 1985.

CAMPOS, R. **Three-dimensional reservoir sedimentation model**. Tese de doutorado, Newcastle University, England, UK, 2001. 132 p.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**. CPRM, ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

CARVALHO, N.O., FILIZOLA, N.P.J., SANTOS, P.M.C., LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação do assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 2000. 140 p.

COLBY, B.R. **Fluvial sediments – a summary of source, transportation, deposition, and measurement of sediment discharge**. In: Contributions to general geology. Geological Survey Bulletin 1181. U.S. Department of the Interior. Washington D.C., USA, 1963.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Texto, mapas & SIG. Brasília, DF, 2003. 18p.

CUPOLILLO, F. **Diagnóstico hidroclimatológico da bacia do rio Doce**. Tese Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008. 153 p.

EDWARDS, T.K., GLYSSON, G.D. **Field methods for measurement of fluvial sediment**. In: Applications of hydraulics. USGS. Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey. TWRI 3 – C2. Arlington. VA, 1998. 89 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed., 2009.

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

FERRARI, R., COLLINS, K. Chapter 9: Reservoir survey and data analysis. In: YANG, C.T. (Organized). **Erosion and sedimentation manual**. Denver, Colorado, USA. U.S. Department of the Interior. Washington D.C., USA, 2006.

HERNANI, L. C., FREITAS, P.L., PRUSKI, F.F., DE MARIA, I.C., CASTRO FILHO, C., LANDERS, J.C. **A erosão e seu impacto**. In: MANZATTO, C.V., FREITAS JÚNIOR, E., PERES, J.R.R. Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2002. 174 p.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Plano de ação de recursos hídricos da unidade de planejamento e gestão D06**. Belo Horizonte, MG, 2010a. Consórcio ECOPLAN - LUME. 99p.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do rio Doce.** Consórcio ECOPLAN - LUME. volume I. Belo Horizonte, MG, 2010b. 478 p.

JANSEN, R.B. **Dams and public safety.** U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1980.

JEPSEN, R., ROBERTS, J. LICK, W. **Effects of Particle Size and Bulk Density on Erosion of Quartz Particles.** Journal of Hydraulic Engineering 124(12): 1261–1267, 1997.

JI, U., JULIEN, P.Y., PARK, S.K. **Sediment flushing at the Nakdong river estuary barrage.** Case Study. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2011. 1522-1535 p.

JOTHIPRAKASH, V., GARG, V. **Re-look to conventional techniques for trapping efficiency estimation of a reservoir.** International Journal of Sediment Research 23, p. 76-84, 2008.

LAQUINI, J.P. **Modelagem determinístico-estocástica da dinâmica de sedimentos em reservatórios de água e de rejeitos de mineração.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009. 183 p.

LEE, M. **Rivers.** In: FOOKES, P.G., LEE, M., MILLIGAN, G. Geomorfology for engineers. Whittles Publishing, Scotland, UK, 2005. 851p.

LIMIAR. **Desenhos EIA.** 2000. Não publicado.

LIMIAR. **Relatório de processo de outorga “aproveitamento de potencial hidrelétrico”. PCH Pipoca.** Belo Horizonte, MG, 2008. Não publicado.

LOPES, A.V. **Aplicação de métodos de previsão de assoreamento de reservatórios.** Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1993. 127 p.

MATOS, A. J. S. **Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional “CAV-NH”.** Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2012. 137 p.

MENDES, A.B. **Análise sinérgica da vida útil de um complexo hidrelétrico: caso do rio Araguaia, Brasil.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005. 98p.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation.** National Soil Resource Institute, 2005.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and danagement of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable Use.** Eletronic Ver. 1.04. McGraw-Hill. New York, 2010.

NOCE, C.M., PEDROSA-SOARES, A.C., SILVA, L.C., ALKMIM, F.F. **O embasamento arqueano e paleoproterozóico do orógeno araçuai.** *Geonomos* 15(1): 17–23, 2007.

NOVO, T.A. **Caracterização do complexo pocrane, magmatismo básico mesoproterozóico e unidades neoproterozóicas do sistema araçuai-ribeira , com ênfase em geocronologia U-Pb (shrimp e la-icp-ms).** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013. 193 p.

OLIVEIRA, A.M.S., BRITO, S.N.A. **Geologia de engenharia.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. 587 p.

OMEGA, ENERGIA RENOVÁVEL S.A. **Relatório de sustentabilidade.** Belo Horizonte, MG, 2010.

PEREIRA, M. B. **Sedimentação em reservatórios.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1998. 206 p.

SEABEAM INSTRUMENTS. **Multibeam sonar theory of operation.** East Walpole, MA, USA. 2000.

SIAM - Sistema de Informações Geográficas para Mineração. Disponível em: <<http://www2.siam.mg.gov.br/webgis/mineracao/viewer.htm>> Acesso em: 15 Junho 2013.

SNIRH - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/home/>>. Acesso em: 17 Junho 2013.

SPEC Planejamento, Engenharia, Consultoria Ltda. **Relatório do Projeto Básico Consolidado.** Volume 1 – Texto. Belo Horizonte, MG, 2007. Não publicado.

STRAND, R.I. Reservoir Sedimentation. In: **Design of small dams.** U.S. Department of Interior. Washington: Bureau of Reclamation, 1987. p.529-564.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. **Engineering and design: Sedimentation investigations of rivers and reservoirs.** Número da publicação: 1110-2-4000, Washington, D.C, USA, 1989.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. **Engineering and design: Hydrographic Surveying.** Número da publicação: 1110-2-1003, Washington, D.C, USA, 2002.

USGS – U.S. Geological Survey. **Policy and technical guidance on discharge measurements using acoustic Doppler current profilers,** 2002b.

USGS – U.S. Geological Survey. **Office of Surface Water Technical Memorandum 2002.02.** 2001 Disponível em: <<http://hydroacoustics.usgs.gov/memos/OSW2002-02.pdf>> Acesso em: 20 junho 2013.

USGS – U.S. Geological Survey. **Procedural Documentation and Accuracy Assessment of Bathymetric Maps and Area/Capacity Tables for Small Reservoirs.** Scientific Investigations Report 5208, 2006.

VERSTRAETEN, G., POESEN, J. **Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield.** Progress in Physical Geography 24,2 (2000) pp. 219–251.

WMO - World Meteorological Organization. **Guide to hydrological practices.** WMO-No. 168. Geneva, Suíça. 5. ed., 1994.

YANG, X. **Manual on sediment management and measurement.** World Meteorological Organization, Operational Hydrology Report No. 47, WMO-No. 948., Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2003.

ANEXO

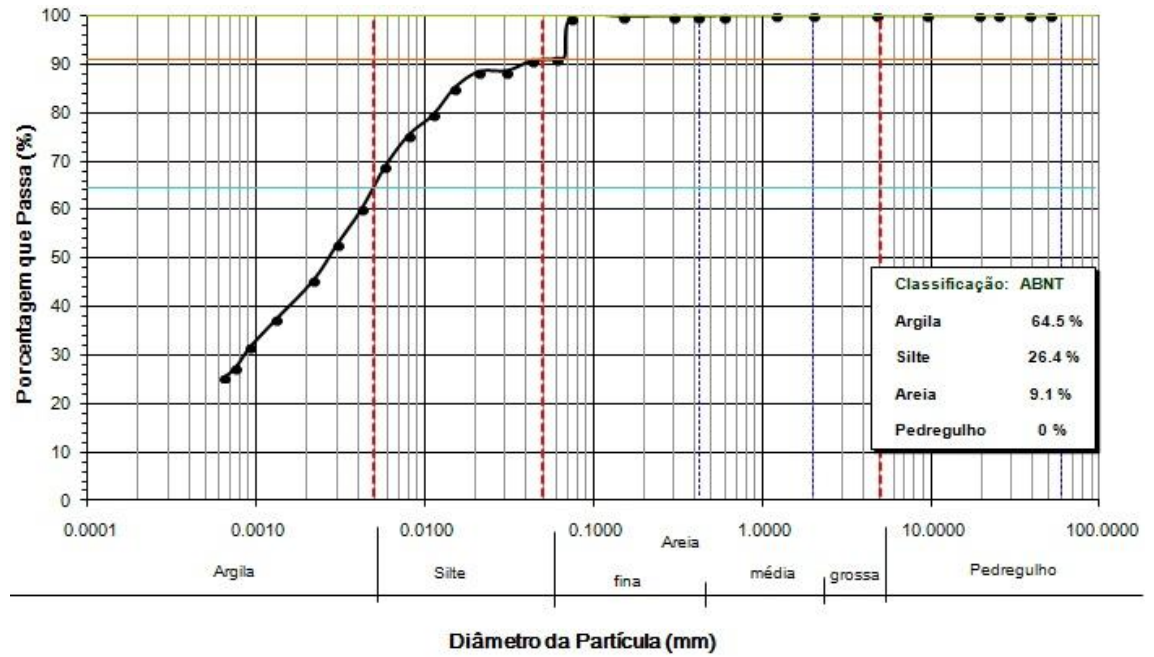


Gráfico 13 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 1.

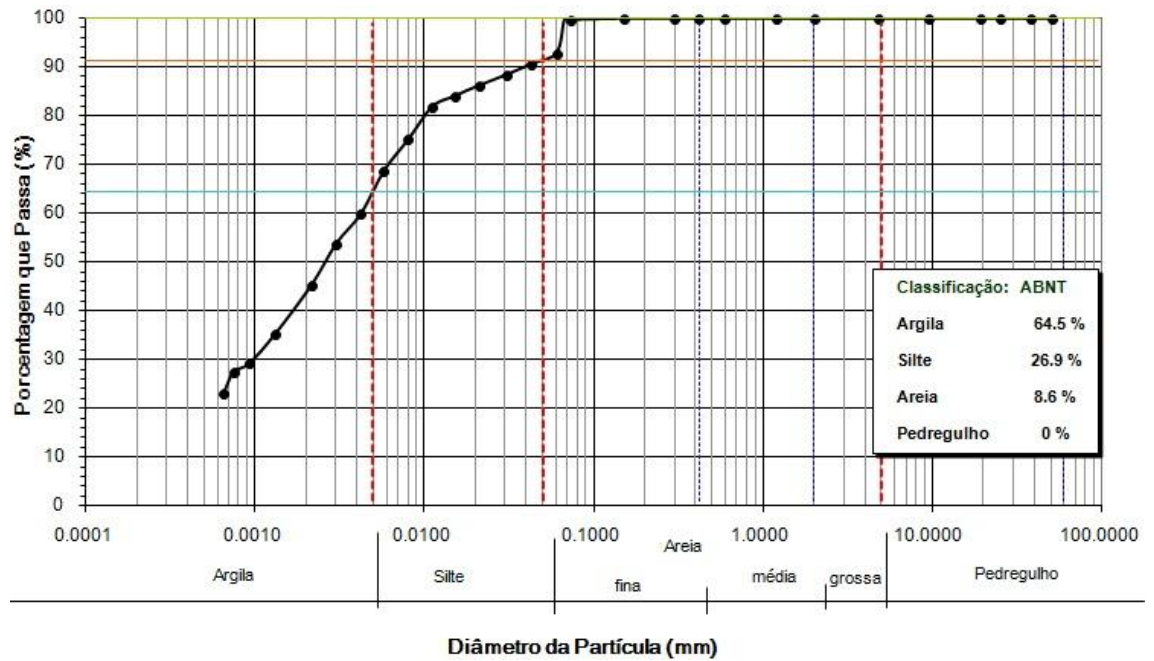


Gráfico 14 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 2.

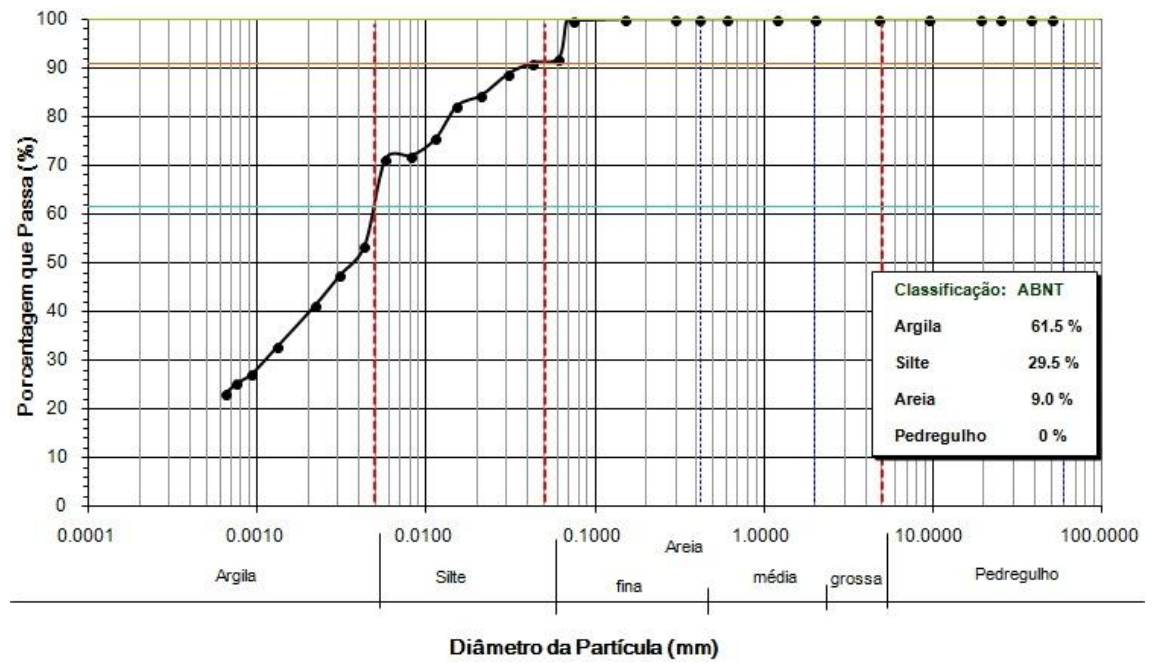


Gráfico 15 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 3.

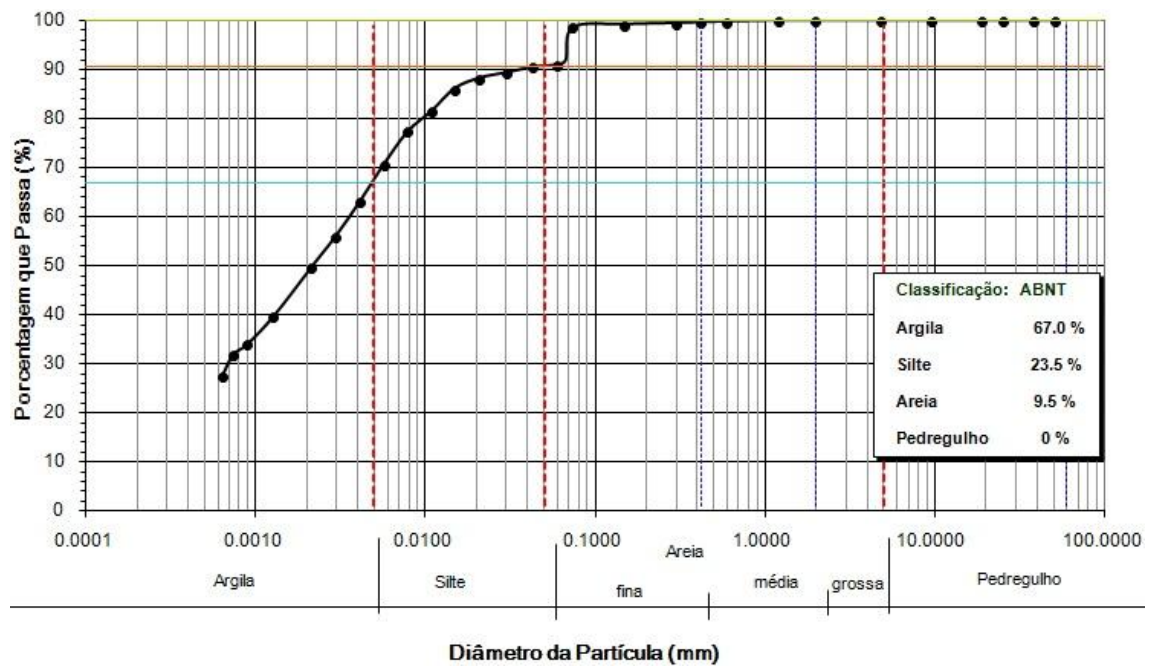


Gráfico 16 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 4.

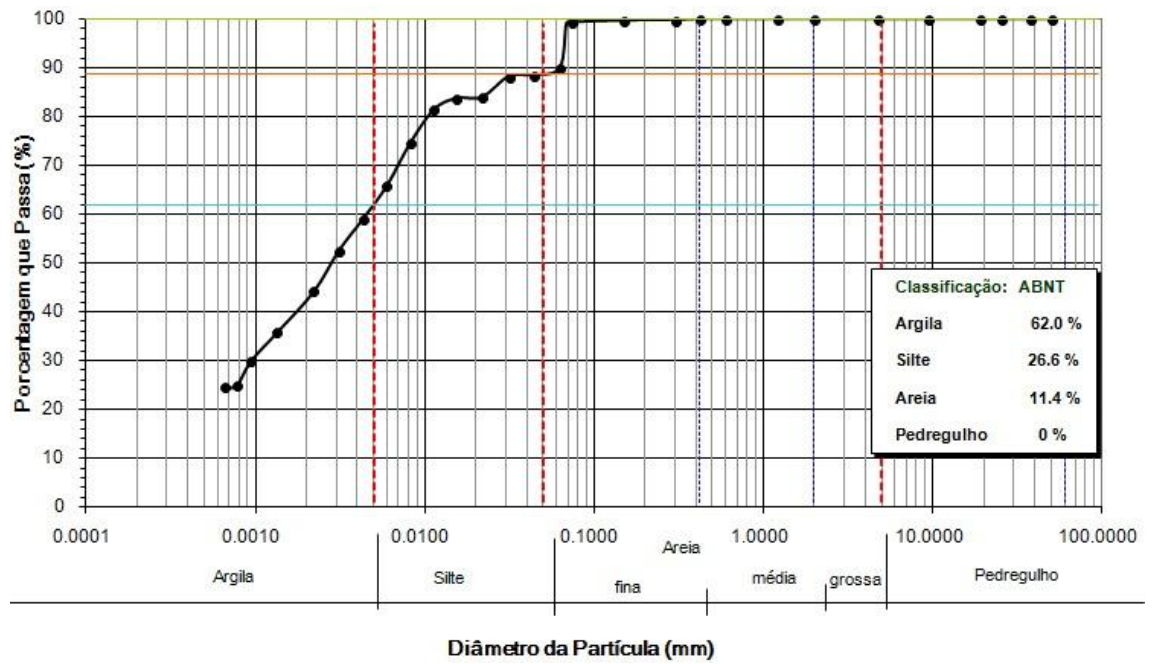


Gráfico 17 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 5.

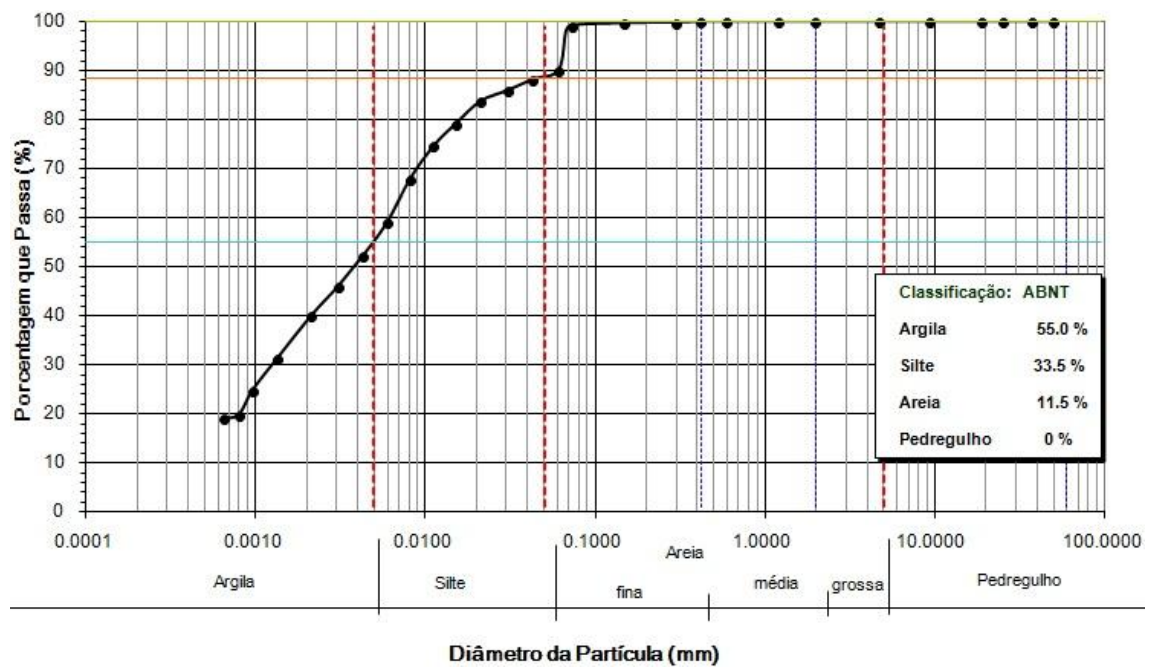


Gráfico 18 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 6.

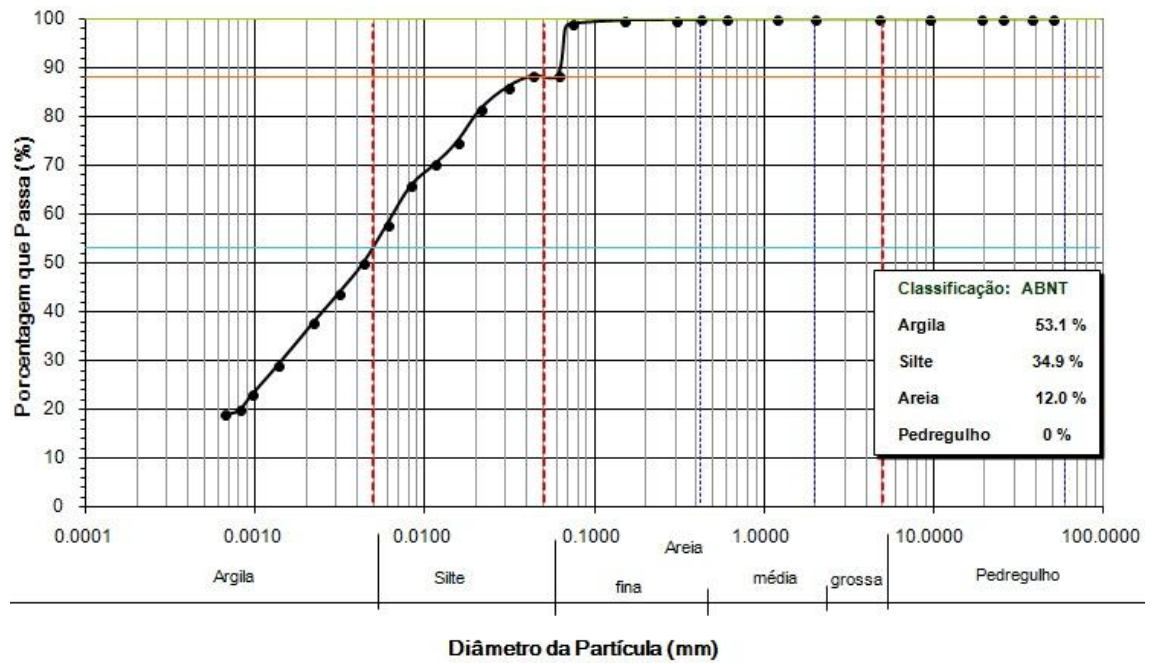


Gráfico 19 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 7.

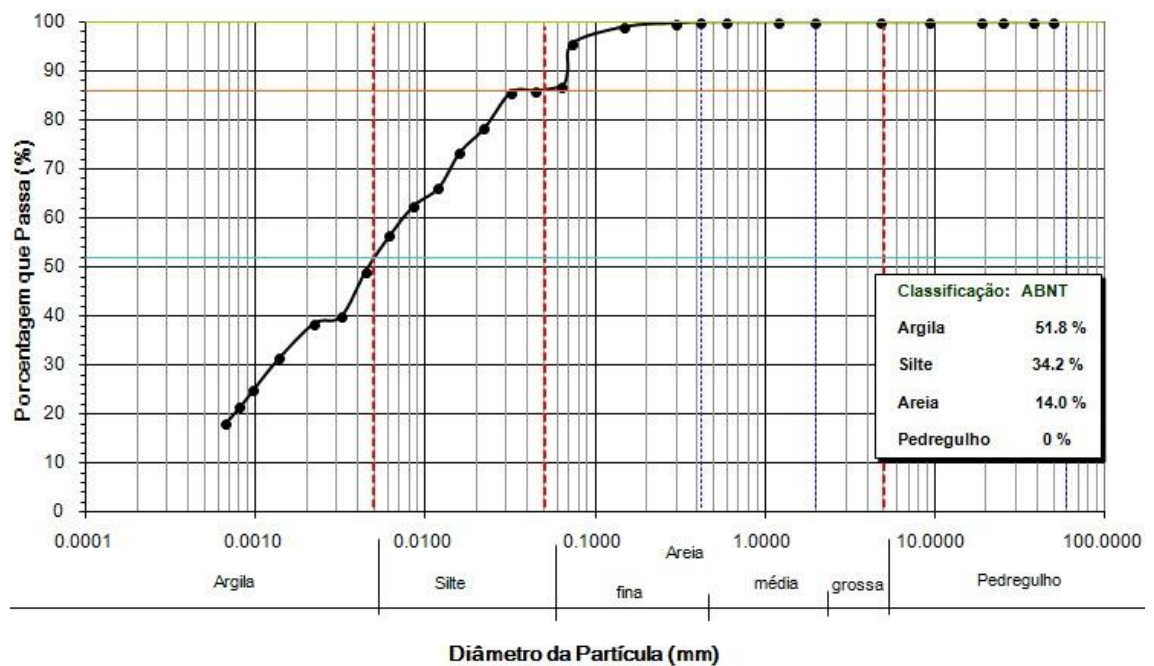


Gráfico 20 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 8.

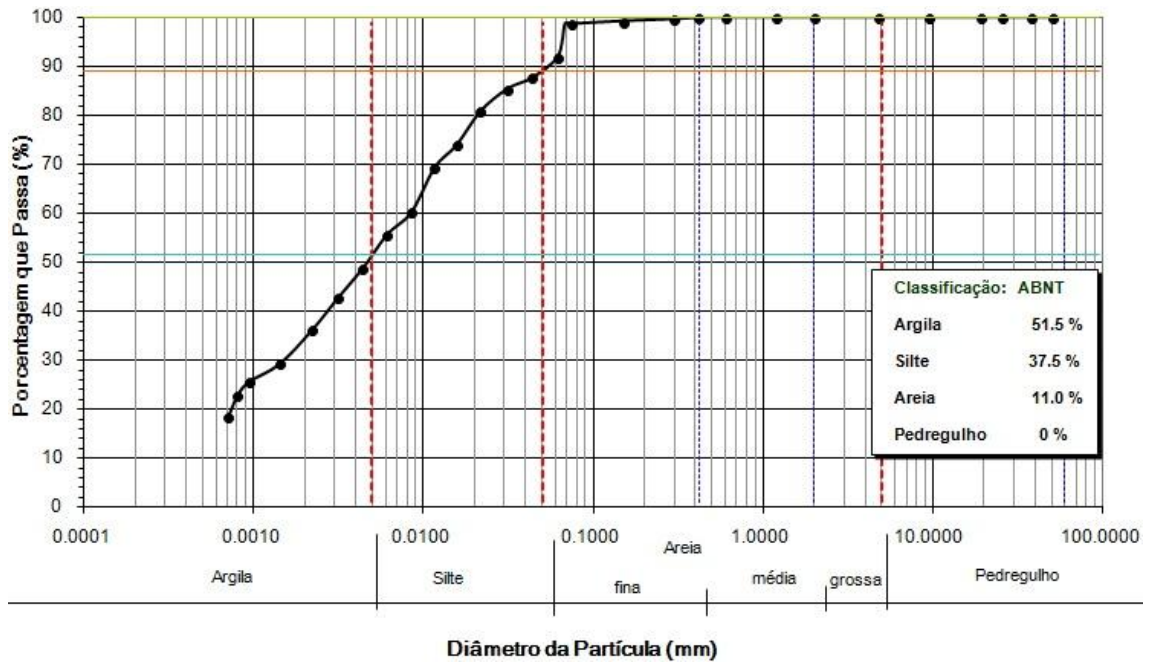


Gráfico 21 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 9.

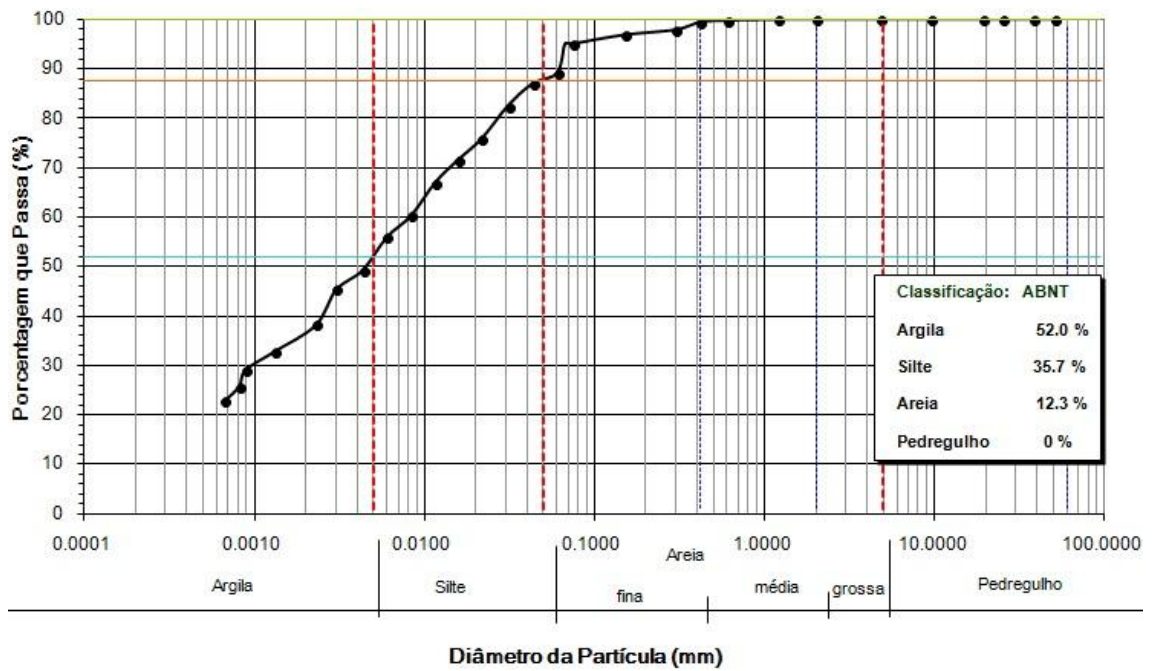


Gráfico 22 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 10.

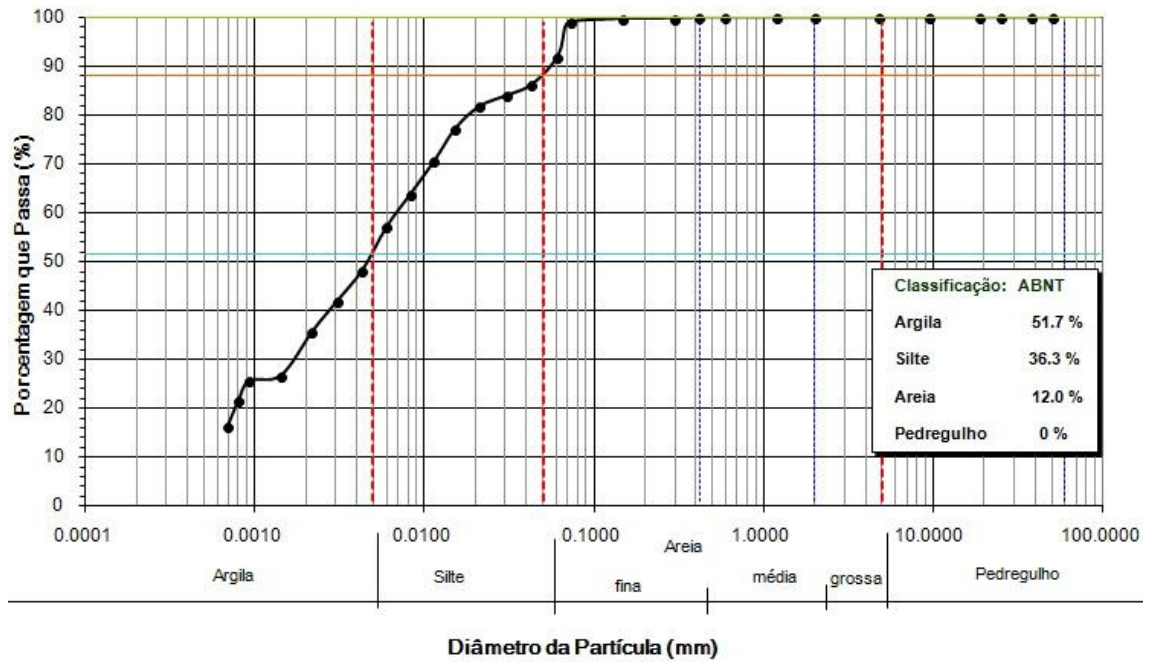


Gráfico 23 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 11.

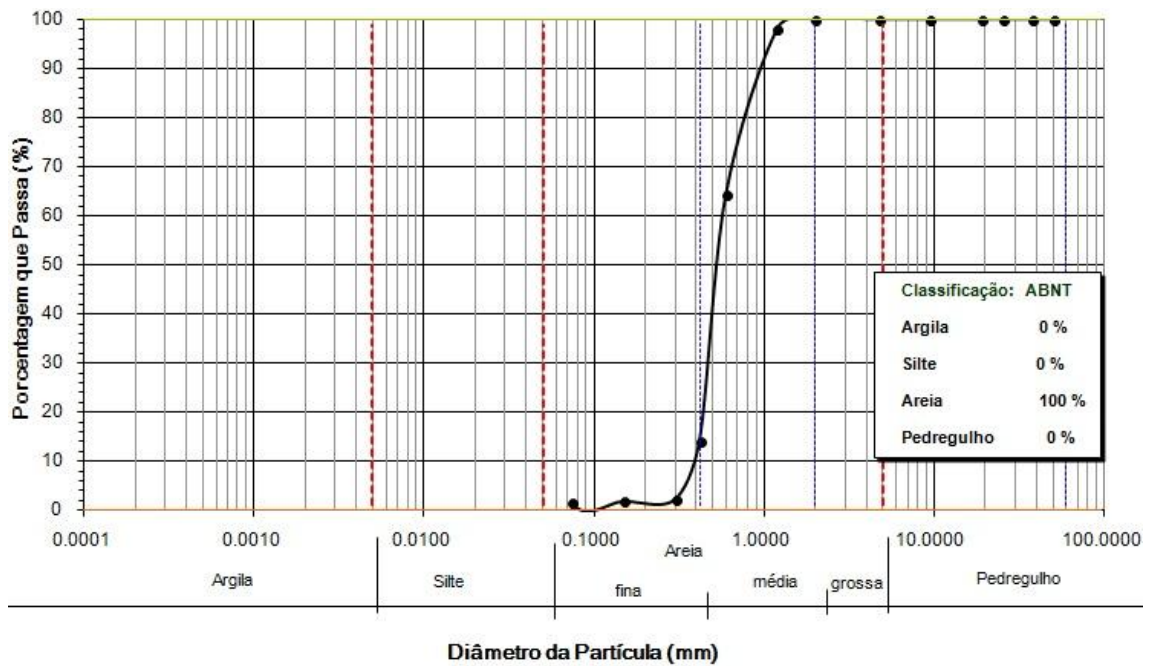


Gráfico 24 - Curva granulométrica dos sedimentos do ponto 12.

