

GEANNE MOREIRA BRITO

**DETERMINAÇÃO DO ASSOREAMENTO DO  
RESERVATÓRIO DA PCH CACHOEIRÃO**

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

Brito, Geanne Moreira, 1987-

B862d  
2013

Determinação do assoreamento do reservatório da PCH  
Cachoeirão / Geanne Moreira Brito. – Viçosa, MG, 2013.  
x, 100f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.84-90.

1. Reservatórios. 2. Sedimentação e depósitos. 3. Transporte  
de sedimentos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento  
de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil. II. Título.

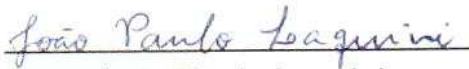
CDD 22 ed. 624.151

GEANNE MOREIRA BRITO

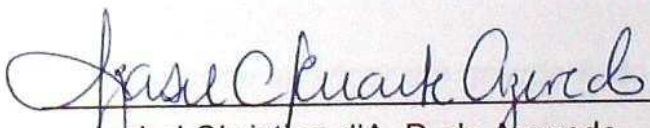
## DETERMINAÇÃO DO ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO DA PCH CACHOEIRÃO

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*.

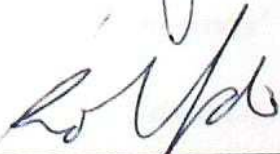
APROVADA: 21 de Junho de 2013.



João Paulo Laquini



Izabel Christina d'A. D. de Azevedo  
(Coorientadora)



Roberto Francisco de Azevedo  
(Orientador)

*“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos”*

*Friedrich Nietzsche*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial:

À Universidade Federal de Viçosa, pela estrutura e excelência.

À Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, pela concessão de bolsa de estudos e financiamento do projeto.

Ao meu orientador Professor Roberto Francisco de Azevedo, pela orientação, confiança e amizade.

À grande amiga Renata Minhoni, companheira de todos os momentos.

Ao Eduardo Roman, pela parceria na realização deste trabalho e grande ajuda na utilização dos *softwares* ArcGIS e Hypack.

Ao Ivan Sérgio Carneiro, pela paciência, apoio e auxílio na execução deste projeto.

Aos funcionários e professores do Departamento de Engenharia Civil, em especial à Professora Izabel Azevedo, pela co-orientação e auxílio na elaboração final deste trabalho, e ao Professor Eduardo Marques, pela amizade e contribuição para a minha formação profissional e pessoal.

Ao José Rodrigues, do Corpo de Bombeiros da UFV, pela disponibilidade e auxílio na realização dos trabalhos de campo.

Ao Paulo Capelão e ao Eduardo Souza, pelo auxílio na realização dos trabalhos laboratoriais.

Ao Dr. João Paulo Laquini, pela participação na defesa desta dissertação, pelas sugestões e considerações que contribuíram muito para este trabalho.

Aos amigos da Engenharia Ambiental 2006 e de Viçosa, pela amizade e pelos ótimos momentos vividos ao longo desses sete anos de UFV. Em especial, às amigas: Ana Bicalho, Carolina Melo, Luíza Betim e Thaís Felicori.

Às queridas moradoras da república Boas Moças, pela amizade e companheirismo de todas as horas.

Ao Mirko Schneider, por estar sempre ao meu lado, enchendo os meus dias de alegria.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, Angela e José Júnior, e às minhas irmãs, Hérica e Jéssica, pelo amor, carinho e compreensão em todos os momentos da minha vida. Vocês são as minhas referências!

Muito obrigada!

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVAS .....	4
3. OBJETIVOS .....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
4.1. Matriz energética brasileira e as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).....	6
4.2. Legislação Brasileira .....	9
4.2.1. Resolução ANEEL nº 396/1998.....	9
4.2.2. Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010 .....	9
4.3. Dinâmica dos sedimentos .....	11
4.3.1. Erosão .....	12
4.3.2. Transporte de sedimentos .....	13
4.3.3. Deposição de sedimentos .....	14
4.4. Assoreamento de reservatórios.....	16
4.4.1. Previsão do assoreamento de reservatórios .....	18
4.4.1.1. Método de Borland e Miller.....	18
4.4.1.2. Curva de Brune .....	20
4.4.1.3. Curva de Churchill .....	21
4.4.1.4. <i>Softwares</i> SEDIMENT e DPOSIT .....	22
4.4.2. Medição do assoreamento de reservatórios.....	23
4.4.2.1. Método do levantamento do contorno .....	24
4.4.2.2. Método do levantamento de seções topobatimétricas.....	24
4.4.2.3. Determinação do Modelo Digital de Elevação do reservatório utilizando o modelo TIN ( <i>Triangulated Irregular Network</i> ) .....	26
4.5. Medidas preventivas e corretivas para o controle do assoreamento de reservatórios.....	27
5. MATERIAL E MÉTODOS .....	30
5. 1. Caracterização da área de estudo .....	30
5.1.1. O empreendimento.....	30
5.1.3. Clima .....	36
5.1.5. Geologia .....	39

5.1.6. Pedologia .....	41
5.1.7. Uso e ocupação do solo .....	42
5.1.8. Focos Erosivos .....	46
5.2. Determinação do limite do reservatório .....	50
5.3. Reservatório antes de seu enchimento .....	51
5.3.1. Leito do rio Manhuaçu antes do enchimento do reservatório .....	51
5.3.2. Validação da metodologia proposta .....	56
5.3.3. Obtenção do MDE do reservatório antes de seu enchimento (1999) .....	58
5.4. Levantamento ecobatimétrico .....	58
5.4.1. Obtenção do MDE a partir dos dados da batimetria (2012) .....	61
5.5. Determinação das curvas cota x área x volume do reservatório .....	62
5.6. Coleta e caracterização dos sedimentos de fundo .....	63
5.7. <i>Software</i> SEDIMENT e DPOSIT .....	65
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	68
6.1. MDEs gerados a partir de dados anteriores (1999) e posteriores (2012) ao enchimento do reservatório .....	68
6.2. Determinação das curvas cota x área x volume (CAV) .....	71
6.3. Caracterização dos sedimentos de fundo .....	74
6.4. Determinação do assoreamento e da distribuição de sedimentos no reservatório utilizando os <i>softwares</i> SEDIMENT e DPOSIT.....	77
6.5. Comparação entre os resultados obtidos em campo e pelo modelo empírico.....	79
7. CONCLUSÃO .....	82
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	84
9. ANEXOS.....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de PCHs (ELETROBRAS, 2000).....	8
Tabela 2 - Classificação do tipo de reservatório pelo método de Borland & Miller (CARVALHO, 2008).....	19
Tabela 3 - Frequência de levantamentos recomendada para reservatórios (ANEEL, 2000).....	24
Tabela 4 - Dados operacionais da PCH Cachoeirão. ....	30
Tabela 5- Características da bacia do rio Manhuaçu.....	34
Tabela 6 - Temperatura e precipitações médias mensais para a região de estudo. ....	36
Tabela 7 - Estações de monitoramento pluviométrico (CEMIG, 2012). ....	38
Tabela 8 - Estações de monitoramento fluviométrico (CEMIG, 2012). ....	38
Tabela 9- Determinação do Grau de Risco (AUGUSTO FILHO, 1992). ....	46
Tabela 10 - Processos erosivos instalados no entorno do reservatório da PCH Cachoeirão.....	47
Tabela 11 - Seção batimétrica do rio Manhuaçu em 1999.....	53
Tabela 12 - Comparação dos resultados da área proposta e levantada em 1999.....	57
Tabela 13 – Nível d’água no reservatório durante a realização da batimetria. .	61
Tabela 14 - Tipo de operação do reservatório ( <i>Software</i> SEDIMENT - Adaptado de: Design of Small Dams, U.S. Bureau of Reclamation). ....	66
Tabela 15 - Informações extraídas das curvas CAV.....	72
Tabela 16 - Perda de capacidade de armazenamento de reservatórios brasileiros. ....	74
Tabela 17 - Resultados das amostras de sedimentos analisadas. ....	75
Tabela 18 - Resultados gerados pelo <i>software</i> Sediment.....	77
Tabela 19 - Valores de área e volume para a cota 231,8m, gerados a partir da batimetria e do <i>Software</i> Dposit. ....	79

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema dos volumes de um reservatório.....	2
Figura 2 - Diagrama modificado de Hjuström (RIBEIRO, 2000).....	11
Figura 3 - Formação de depósitos nos reservatórios e principais problemas decorrentes (CARVALHO, 2008).....	15
Figura 4 – Tipos de reservatórios segundo o método de Borland & Miller (STRAND, 1974 <i>apud</i> CARVALHO,2008). .....	18
Figura 5 - Curvas de eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, segundo método de Brune (1953 <i>apud</i> CARVALHO, 2008).....	20
Figura 6 - Curva da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, segundo Churchill (VANONI, 1977 <i>apud</i> CARVALHO, 2008).....	22
Figura 7 - Esquema do levantamento topobatimétrico utilizando ecobatímetro monofeixe (FIPAI, 2009 <i>apud</i> MIRANDA, 2011).....	26
Figura 8 - Localização da PCH Cachoeirão.....	31
Figura 9 - Vertedouro de superfície da barragem. ....	32
Figura 10 - Casa de força da PCH.....	32
Figura 11 - Delimitação da bacia hidrográfica do rio Manhuaçu (CBH, 2010). .	33
Figura 12 - Centrais hidrelétricas instaladas na bacia do rio Manhuaçu (Adaptado de CBH, 2010).....	35
Figura 13 - Localização das estações fluviométricas da PCH Cachoeirão (LIMIAR, 2012).....	37
Figura 14 – Estação hidrometeorológica no entorno da PCH Cachoeirão (LIMIAR, 2012).....	38
Figura 15 - Afloramentos rochosos e matas ciliares no entorno do lago da PCH Cachoeirão.....	43
Figura 16 - Criação de bovinos e plantação de milho às margens do reservatório.....	43
Figura 17 - Mapa de uso e ocupação do solo no entorno do reservatório da PCH Cachoeirão (LIMIAR, 2012).....	45
Figura 18 - Focos erosivos no entorno do reservatório da PCH Cachoeirão (LIMIAR, 2012).....	48
Figura 19 - Evolução do desprendimento de solo observado no ponto 4, em 2009 (A) e em 2012 (B). ....	49
Figura 20 - Evolução do desprendimento de solo observado no ponto 6, em 2009 (A) e em 2012 (B). ....	50
Figura 21 - Imagem de satélite empregada na determinação do contorno do reservatório (INPE, 2013). ....	50
Figura 22 - Disposição das seções batimétricas realizadas em 1999 no reservatório da PCH Cachoeirão. ....	52
Figura 23 - Seção batimétrica do rio Manhuaçu, levantada em 1999. ....	52

Figura 24 - Seções batimétricas existentes e criadas a partir do levantamento planialtimétrico realizado em 1999 na PCH Cachoeirão.....	53
Figura 25 - Resultado da intersecção das curvas de nível e as seções propostas.....	54
Figura 26 – Seção 45 (remanso) em 1999 e 2012 da PCH Cachoeirão.....	56
Figura 27 - Seção 10 (meio) em 1999 e 2012 da PCH Cachoeirão.....	56
Figura 28 - Seção 6 (barragem) em 1999 e 2012 d PCH de Cachoeirão. ....	57
Figura 29 - Esquema do arranjo dos equipamentos utilizados no levantamento batimétrico. A) DGPS e B) ecobatímetro monofeixe.....	58
Figura 30 - Planejamento das seções batimétricas do reservatório da PCH Cachoeirão.....	59
Figura 31 - Ocorrência de picos nas seções levantadas pelo ecobatímetro. ....	60
Figura 32 - Suavização das seções após tratamento dos dados no Hypack. ....	60
Figura 33 - Coleta de Sedimentos utilizando a draga de Petersen. ....	63
Figura 34 - Pontos de coleta de sedimentos realizada na PCH Cachoeirão. ...	64
Figura 35 - Entrada de dados no <i>software</i> SEDIMENT. ....	66
Figura 36 - Layout do <i>software</i> DPOSIT.....	67
Figura 37 - TIN gerado a partir dos dados planialtimétricos e das seções batimétricas levantadas em 1999. ....	69
Figura 38 - TIN gerado a partir da batimetria realizada em 2012.....	70
Figura 39 - Curva CAV da PCH Cachoeirão, obtida através do TIN gerado com dados de 2012. ....	71
Figura 40 - Curva CAV da PCH Cachoeirão, obtida a partir do TIN gerado com dados de 1999. ....	71
Figura 41 - Comparação dos volumes totais do reservatório em 1999 e 2012. 73	
Figura 42 - Formação de banco de areia na parte final do reservatório. ....	76
Figura 43 - Curva granulométrica da amostra representativa do sedimento de fundo do reservatório. ....	77
Figura 44- Curva CAV gerada pelo <i>Software</i> Dposit.....	78
Figura 45 - Curvas Cota x Volume geradas pela batimetria e pelo <i>software</i> Dposit.....	80

## RESUMO

BRITO, Geanne Moreira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Junho de 2013. **Determinação do assoreamento do reservatório da PCH Cachoeirão.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Coorientadores: Izabel Christina d'A. D. de Azevedo e Eduardo Antônio Gomes Marques.

Reservatórios formados por barragens estão sujeitos ao processo de assoreamento. O acúmulo de sedimentos reduz o volume útil do reservatório e provoca alterações em suas curvas cota x área x volume (CAV), que devem ser atualizadas periodicamente. Nesse contexto, este estudo objetivou avaliar o processo de assoreamento no reservatório da PCH Cachoeirão e atualizar os seus dados operacionais. A metodologia empregada consistiu na comparação dos resultados obtidos antes e depois do enchimento do reservatório, com a utilização de Modelo Digital de Elevação (MDE) e função TIN (*Triangulated irregular network*), que possibilitou gerar as CAV, e identificar volumes de sedimentos totais e níveis de sedimentos na tomada d'água. A partir dessa comparação, determinou-se que em 13 anos de operação o volume de sedimento depositado no lago da PCH Cachoeirão foi de 0,866 hm<sup>3</sup>. Esse valor representa uma redução de 15,9% na capacidade de armazenamento original do reservatório. Os *softwares* Sediment e Dposit também foram utilizados para avaliar o assoreamento da PCH Cachoeirão e seus resultados indicaram uma subestimativa do volume de sedimentos depositado, em relação aos resultados observados em campo. Os sedimentos acumulados no fundo do reservatório apresentaram distribuição granulométrica variável, desde partículas na fração areia, depositadas próximas ao início do remanso, até partículas na fração argila, depositadas próximas ao eixo da barragem. O estudo permitiu concluir que a vida útil esperada para o reservatório não deverá ser alcançada se medidas preventivas, que reduzam a quantidade de sedimentos que adentra o reservatório, não forem tomadas.

## ABSTRACT

BRITO, Geanne Moreira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2013. **Determination of siltation in the SHP Cachoeirão reservoir.** Advisor: Roberto Francisco de Azevedo. Co-advisors: Izabel Christina d'A. D. de Azevedo and Eduardo Antônio Gomes Marques.

All reservoirs formed by dams are subject to the process of sedimentation. Sediment accumulation reduces reservoir's useful volume and causes modifications in its elevation x area x volume (EAV) curves, which must be periodically updated. In this context, this study aims to evaluate the siltation process in SHP (Small Hydropower Plant) Cachoeirão reservoir and to update its operational data. The methodology consisted of comparing the results obtained before and after the reservoir filling, using Digital Elevation Model (DEM) and the function TIN (Triangulated irregular network), allowing to generate the EAV curves and to identify the total volumes of sediment deposited in the reservoir and the sediment level in the water intake. From this comparison, it was determined that, during 13 years of operation, the volume of sediment deposited on Cachoeirão's lake was equal to 0.866 hm<sup>3</sup>. This value represents a reduction of 15.9% in the original storage capacity of the reservoir. The *softwares* Sediment and Dposit were also used to assess the siltation process in SHP Cachoeirão and their results indicated an underestimation of the deposited sediments volume, in comparison to field results. The sediments accumulated at the bottom of the reservoir presented a variable grain size distribution, ranging from sand size observed in particles deposited closer to the start of backwater, until clay size, observed in particles deposited near to the dam axis. The study also concluded that the expected useful lifetime of the reservoir should not be achieved, unless preventive measures are taken to reduce the amount of sediment that enters the reservoir.

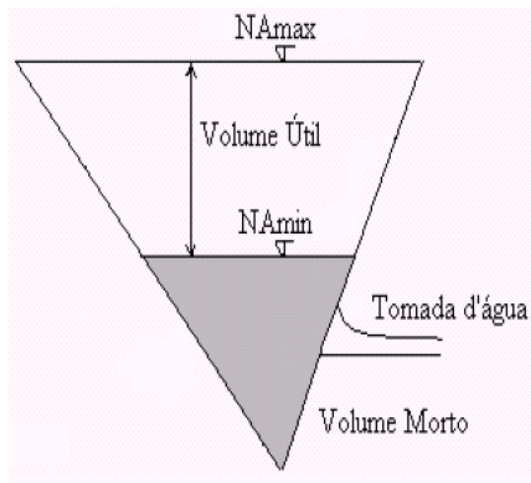
## 1. INTRODUÇÃO

A energia fornece apoio mecânico, elétrico e térmico às atividades antrópicas e é, por isso, um fator determinante no desenvolvimento econômico e social de uma região. No contexto atual, que revela uma economia global altamente competitiva e uma crescente demanda por desenvolvimento sustentável, a busca por fontes de energia de baixo custo e que produzam menos impactos no meio ambiente, tornou-se uma necessidade para todos os países.

A água é uma das poucas fontes para a geração de energia que é renovável e que não contribui, teoricamente, para a emissão de gases do efeito estufa, que provocam o aquecimento global. Em princípio, este recurso era utilizado por civilizações antigas para gerar energia mecânica - nas instalações para moagem de grãos, por exemplo. A partir do final do século XIX, quando foi construída a primeira usina hidrelétrica do mundo, a energia hidráulica começou a ser empregada, quase que exclusivamente, para a geração de energia elétrica (ANEEL, 2008).

A construção de uma barragem para a formação de um reservatório de uma usina hidrelétrica altera o balanço hidráulico-sedimentológico do corpo hídrico e propicia condições favoráveis à sedimentação do material sólido transportado pela água. A quantidade de sedimentos que é aportada ao reservatório depende do montante de sedimentos produzido na bacia hidrográfica.

Ao alcançar o reservatório, os sedimentos podem se acumular em seu volume útil, ou em cotas inferiores, reduzindo seu volume morto e sua vida útil. O volume útil corresponde ao volume efetivamente destinado à operação do reservatório, compreendido entre os níveis d'água mínimo e máximo operacionais. O volume morto corresponde ao volume do reservatório compreendido abaixo do nível d'água mínimo operacional, destinado ao acúmulo de sedimentos ao longo da vida útil do reservatório. Uma representação esquemática dos volumes útil e morto de um reservatório é apresentada na Figura 1.



**Figura 1 - Esquema dos volumes de um reservatório.**

A deposição de sedimentos no volume útil do reservatório altera a vazão regularizada e interfere em sua capacidade de geração de energia elétrica, reduzindo o faturamento da concessionária de energia. A carga excessiva de sedimentos na água do reservatório também pode causar desgastes em turbinas, tubulações, válvulas e comportas, acarretando em custos adicionais à administração da usina.

A realização de estudos sedimentológicos em reservatórios em geral, e em especial nos empreendimentos de geração de energia elétrica, é uma ferramenta fundamental para o planejamento e operação adequados dos mesmos, pois permite avaliar o acúmulo de sedimentos ao longo do reservatório e determinar a sua vida útil, além de fornecer informações necessárias para a elaboração e execução de medidas preventivas e de controle do assoreamento.

O Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL afirma que estudos sedimentológicos devem ser realizados em todas as fases do aproveitamento, desde o planejamento (inventário, estudo de viabilidade e projeto básico) até a operação do reservatório (ANEEL, 2000).

Entretanto, observa-se na prática que esses estudos não recebem, em geral, a devida atenção no Brasil, que apesar de possuir uma matriz energética amplamente baseada na energia hidráulica, apresenta uma rede de monitoramento sedimentométrico bastante precária. Muitos reservatórios são

operados com base em dados desatualizados, que não correspondem às suas características morfométricas atuais, o que pode comprometer a eficácia das políticas de gestão e operação empregadas nestes reservatórios.

A criação de normas regulamentadoras sobre a obrigatoriedade do monitoramento do processo de assoreamento em reservatórios destinados ao aproveitamento energético tem contribuído para reverter essa situação. A Resolução Conjunta nº03 (ANA/ANEEL, 2010), por exemplo, estabelece que os concessionários e autorizados de geração de energia devem realizar o monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico e sedimentométrico de seus empreendimentos e reforça a obrigatoriedade de avaliação do processo de assoreamento nos reservatórios, através da atualização periódica de suas curvas CAV. Com isso, as empresas do setor hidrelétrico têm investido na implantação e operação de estações hidrométricas e na realização periódica de levantamentos batimétricos em seus reservatórios, para avaliar a ocorrência do processo de assoreamento e atualizar os dados operacionais de seus empreendimentos, que devem ser reportados periodicamente à Agência Nacional de Águas – ANA.

Com este enfoque, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o processo de assoreamento ocorrido na PCH Cachoeirão, localizada na região Leste de Minas Gerais e atualizar os seus dados operacionais.

## 2. JUSTIFICATIVAS

Essa dissertação 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.

O projeto avaliará o processo de assoreamento de duas Pequenas Centrais Hidrelétricas localizadas no rio Manhuaçu, a PCH Cachoeirão e a PCH Pipoca, e de uma Grande Central Hidrelétrica, a UHE Irapé, localizada no rio Jequitinhonha.

O projeto desenvolverá também uma metodologia para estudar o assoreamento de reservatórios de água, através de um modelo matemático automatizado em um programa de computador - SIMSED (LAQUINI, 2009).

Em sua tese de doutorado, João Paulo Laquini desenvolveu um modelo matemático determinístico capaz de representar os fenômenos físicos envolvidos no processo de acúmulo de sedimentos em reservatórios: o transporte, a deposição, a erosão e o adensamento dos sedimentos. O modelo considera a variação granulométrica dos sedimentos que entram no reservatório e dos que são depositados. A automatização deste modelo deu origem ao *software* SIMSED, que foi escrito em linguagem orientada a objeto, Delphi 5, e executado em plataforma Windows.

Os resultados obtidos nas PCHs Cachoeirão e Pipoca e na UHE Irapé fornecerão os dados de entrada para o SIMSED, possibilitando a sua calibração e a realização dos ajustes necessários para que o *software* determine adequadamente o cálculo da sedimentação e adensamento de sedimentos em reservatórios de água de pequeno e grande porte.

### 3. OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação é estudar o processo de assoreamento de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) em Minas Gerais, através de levantamento batimétrico em campo e análises computacionais.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Atualizar a curva cota x área x volume (CAV) do reservatório da PCH Cachoeirão, revisando suas características morfométricas.
- Analisar a deposição de sedimentos ao longo do reservatório desde o início de sua operação, por meio da comparação das curvas CAV geradas a partir da carta topobatimétrica anterior ao enchimento do reservatório (1999) e dos dados levantados na batimetria realizada em Maio de 2012.
- Determinar a taxa média anual de perda da capacidade de armazenamento do reservatório.
- Caracterizar o sedimento depositado no fundo do reservatório, determinando sua distribuição granulométrica e peso específico.
- Avaliar o assoreamento e a vida útil do reservatório por meio da modelagem empírica de Borland & Miller, utilizando os *softwares* SEDIMENT e DPOSIT.
- Analisar comparativamente se a estimativa do assoreamento e a vida útil do reservatório obtidas por meio dos *softwares* correspondem aos valores observados em campo.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1. Matriz energética brasileira e as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)**

O Brasil é agraciado por condições naturais (localização geográfica privilegiada, dimensões continentais e grande disponibilidade de recursos, em especial hídricos) que favorecem uma ampla utilização de fontes renováveis em sua matriz energética, que é uma das mais limpas do mundo. As fontes renováveis têm mais de 45% de participação na matriz nacional, enquanto no mundo esse percentual não passa de 13% (PORTAL BRASIL, 2012a).

A grande disponibilidade de recursos hídricos e as condições adequadas para sua exploração representam um alto potencial para geração de energia para o país. Segundo o Plano Eletrobrás 2015, o potencial hidrelétrico brasileiro é um dos maiores do mundo e está estimado em cerca de 260 GW. No entanto, apenas cerca de 30% desse potencial é atualmente utilizado. A exploração limitada desse recurso se deve a sua distribuição não uniforme, concentrada, principalmente, na Bacia Hidrográfica dos rios Amazonas e Tocantins/Araguaia, que detém cerca de 70% desse potencial (ANEEL, 2008). E, embora o potencial hidrelétrico ainda não seja plenamente aproveitado, a energia hidráulica possui papel de destaque na geração de energia do país, correspondendo a mais de 65% da matriz energética nacional (ANEEL, 2012).

A primeira usina hidrelétrica brasileira foi construída em Diamantina no final do século XIX, durante o reinado de D. Pedro II, e contava com uma potência de 0,5 MW. Com o passar dos anos, as tecnologias empregadas evoluíram e a potência instalada das usinas aumentou significativamente, chegando a 14.000 MW produzidos pela hidrelétrica de Itaipu, a maior usina geradora do mundo, construída pelo governo brasileiro em parceria com o Paraguai nas décadas de 1970 e 1980 (ANEEL, 2008).

Devido ao crescimento e desenvolvimento experimentados pelo Brasil nos últimos anos, há uma crescente demanda por energia e este setor se encontra em plena expansão. Segundo o Banco de Informação de Geração (BIG) da ANEEL, o Brasil possui atualmente 2.715 empreendimentos de geração de

energia elétrica em operação, que correspondem a uma potência instalada de 128.125.892 kW. E, para os próximos anos, está prevista a adição de 47.407.708 kW na capacidade de geração do País, proveniente dos 186 empreendimentos atualmente em construção e mais 545 outorgados (ANEEL,2012).

As PCHs têm participação cada vez mais relevante nesse cenário e são responsáveis por cerca de 3,5% da potência total fiscalizada atualmente no país, produzida por 428 empreendimentos em operação, que geram 4.166.783 kW (ANEEL, 2012).

A Resolução da ANEEL nº 652/2003 determina que os aproveitamentos com características de PCH são aqueles que têm potência entre 1 e 30 MW, destinado a produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma, com área total do reservatório inferior a 3,0 km<sup>2</sup>. O empreendimento que não atender ao requisito de área, respeitados os limites de potência e modalidade de exploração, pode ser ainda enquadrado como PCH, caso uma das seguintes condições seja verificada:

- Atendimento à inequação:

$$A \leq \frac{14,3 \times P}{H_b}$$

P = potência elétrica instalada em (MW);

A = área do reservatório em (km<sup>2</sup>);

H<sub>b</sub> = queda bruta em (m), definida pela diferença entre os níveis d'água máximo normal de montante e normal de jusante;

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

A Eletrobrás também determinou diretrizes para o estudo e projeto de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Segundo o documento publicado em 2000, as PCHs são classificadas quanto a sua capacidade de regularização, tipos de sistema de adução, potência instalada e altura de queda de projeto.

Com relação à capacidade de regularização, as PCHs podem ser denominadas: a fio d'água e de acumulação, com regularização diária ou mensal do reservatório. Os empreendimentos a fio d'água são empregados em situações em que a descarga necessária à potência instalada da usina é menor ou igual que as vazões de estiagem. Entretanto, quando essa descarga for maior que as vazões do período seco, PCHs de acumulação, com regularização diária, devem ser implementadas. Adicionalmente, estudos de regularização devem ser realizados para determinação da vazão regularizada, que será alcançada graças à vazão adicional fornecida pelo reservatório. Quando são consideradas as vazões médias mensais no dimensionamento de uma PCH, pressupõe-se que uma regularização média mensal da vazão será promovida pelo reservatório (ELETROBRAS, 2000).

Quanto ao sistema de adução, são considerados dois tipos de PCHs: adução em baixa pressão com escoamento livre em canal/alta pressão em conduto forçado e adução em baixa pressão por meio de tubulações/alta pressão em conduto forçado.

A classificação de PCHs, quanto à potência instalada e queda de projeto, é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1 - Classificação de PCHs (ELETROBRAS, 2000).**

CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	POTÊNCIA - P (kW)	QUEDA DE PROJETO - $H_d$ (m)		
		BAIXA	MÉDIA	ALTA
<b>MICRO</b>	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
<b>MINI</b>	$100 < P < 1.000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
<b>PEQUENAS</b>	$1.000 < P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

A maioria dos pequenos aproveitamentos hidrelétricos em operação localiza-se nas regiões Sul e Sudeste, nas bacias do Paraná e do Atlântico Sudeste, próximos dos grandes centros consumidores de energia elétrica, uma vez que esses empreendimentos geralmente procuram atender demandas próximas aos centros de carga, em áreas periféricas ao sistema de transmissão (ANEEL, 2002).

## **4.2. Legislação Brasileira**

A criação de normas regulamentadoras sobre a obrigatoriedade do monitoramento de estações fluviométricas e pluviométricas em reservatórios destinados ao aproveitamento energético no país é muito recente. A primeira norma a abordar o tema foi a Resolução nº396, promulgada em 1998 pela Agência Nacional de Energia. Atualmente, a norma em vigor é a Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 3, promulgada em 2010.

### **4.2.1. Resolução ANEEL nº 396/1998**

Em quatro de dezembro de 1998, a ANEEL estabeleceu que os empreendimentos hidrelétricos brasileiros deveriam implantar e operar estações fluviométricas e pluviométricas, a fim de realizar atualizações periódicas da curva cota-volume de seus reservatórios (ANEEL, 1998). A Resolução resolve:

*“Art. 1º Estabelecer que, em todos os aproveitamentos hidrelétricos, os Concessionários e os Autorizados ficam obrigados a instalar, manter e operar estações fluviométricas e pluviométricas na região do empreendimento, nas condições previstas nesta Resolução.”*

*“Art. 2º Os concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica deverão manter atualizadas as curvas de descarga das estações fluviométricas associadas aos aproveitamentos hidrelétricos, informando à ANEEL essas atualizações, bem como as curvas Cota-Volume dos reservatórios dos aproveitamentos.”*

### **4.2.2. Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010**

Em dez de agosto de 2010, a Agência Nacional de Águas e a Agência Nacional de Energia Elétrica promulgaram a Resolução Conjunta nº03 (ANA/ANEEL, 2010), que aperfeiçoa as normas e instrumentos estabelecidos pela Resolução ANEEL nº396/ 1998, determinando que parâmetros limnimétricos, sedimentométricos e de qualidade da água também sejam monitorados e reforça a obrigatoriedade de avaliação do processo de assoreamento em

reservatórios, através da atualização das curvas cota-área-volume, conforme estabelecido no artigo oitavo:

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

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

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

*§ 1º A proposta do método e dos procedimentos a serem utilizados na atualização das curvas cota-área-volume deverá ser encaminhada previamente, pelo concessionário ou autorizado à ANA para avaliação.*

*§ 2º O concessionário ou autorizado deverá encaminhar à ANA, para avaliação, um relatório técnico detalhado contendo o método e os procedimentos utilizados, bem como as tabelas cota x área e cota x volume, e os respectivos dados eletrônicos e polinômios.*

*§ 3º Em casos excepcionais, a ANEEL, mediante fundamentação, poderá determinar que a avaliação do processo de assoreamento do reservatório seja realizada com periodicidade inferior a 10 anos.*

Nesse contexto, as empresas do setor hidrelétrico, em atendimento à legislação, têm investido na implantação e operação de estações hidrométricas e na realização periódica de levantamentos batimétricos em seus reservatórios, além de investir em projetos de pesquisa sobre o tema.

### 4.3. Dinâmica dos sedimentos

A dinâmica dos sedimentos é um fenômeno geológico natural que atua na modelagem e transformação da superfície terrestre. As rochas e solos presentes na crosta terrestre estão sujeitos a processos intempéricos de desagregação e decomposição que, seguidos pelo transporte e deposição dos fragmentos produzidos, dão origem a diferentes tipos de solos e às rochas sedimentares.

A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica é afetada, principalmente, pelos seguintes fatores: duração, intensidade e frequência das precipitações; geologia e pedologia; uso e ocupação do solo; topografia; densidade da rede de drenagem e escoamento superficial.

A ocorrência dos processos de erosão, transporte e deposição de partículas é influenciada pela velocidade de corrente de água e pelo tamanho dos grãos, conforme representado pelo diagrama de Hjustrom (Figura 2). A análise do gráfico indica que quanto maior a velocidade do fluxo, maior será a tendência à erosão. Também é possível inferir que camadas de partículas de mesmo diâmetro, porém sujeitas a forças coesivas, necessitam de uma velocidade de fluxo maior para romperem essa força e serem transportadas. Para partículas de um mesmo material, quanto maior o diâmetro, maior será o seu peso e, conseqüentemente, maior será a resistência ao transporte. (RIBEIRO, 2000).

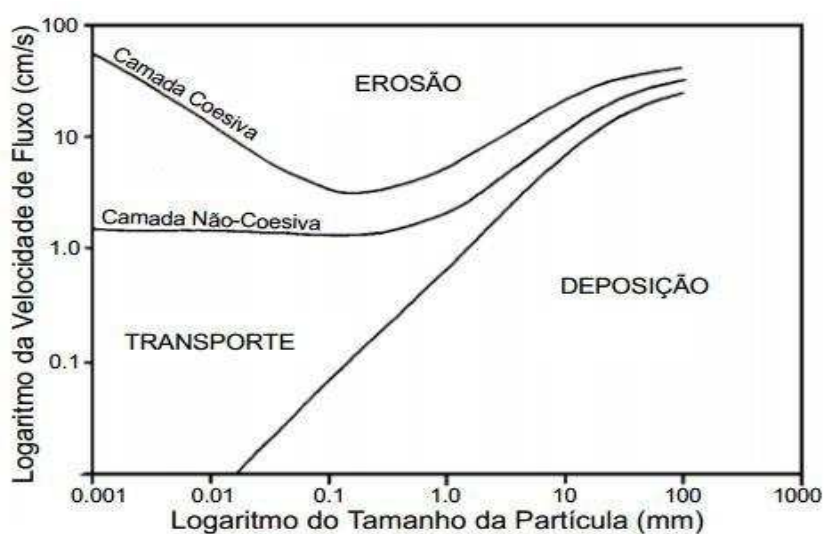


Figura 2 - Diagrama modificado de Hjustrom (RIBEIRO, 2000).

A construção de uma barragem para a formação de um reservatório provoca alterações significativas no balanço hidráulico-sedimentológico de um corpo hídrico, propiciando condições favoráveis à sedimentação do material sólido transportado devido à redução da velocidade que ocorre no curso d'água quando este encontra o remanso formado pelo reservatório.

#### **4.3.1. Erosão**

A erosão é um fenômeno que ocorre naturalmente no meio ambiente e pode ser definida como o desgaste e/ou arrastamento de partículas de rochas e solos, por ação da água, do gelo, do vento, de organismos vivos (plantas e animais) e também da ação humana. A intensidade e a taxa de erosão podem ser muito ampliadas devido às atividades antrópicas, especialmente aquelas relacionadas ao uso e ocupação do solo.

A remoção da cobertura vegetal expõe o solo a diversos tipos de intempéries, em especial à ação da água, que é a principal causa de degradação de solos em ambientes tropicais ou subtropicais, como o Brasil. A água da chuva, que anteriormente infiltrava lentamente ao longo do perfil do solo, começa agora a escoar superficialmente. O poder erosivo da água depende do potencial de erosividade da chuva, das condições de infiltração e escoamento superficial, além da declividade e comprimento do talude. Fatores relacionados ao solo, como desagregabilidade e erodibilidade, também interferem no processo erosivo (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006).

Carvalho (2008) classifica a erosão hídrica superficial em três tipos principais: erosão pluvial, erosão laminar e erosão linear (sulco, ravina e voçoroca).

A erosão pluvial é provocada pelo impacto das gotas de chuva ao caírem sobre superfícies descobertas e pode ocorrer em locais planos ou com declividade. Ao atingir o solo, as gotas afetam primeiramente a estrutura de sua capa superficial, causando um desprendimento de partículas, que dependendo da intensidade da chuva, serão transportadas pelo escoamento.

A erosão laminar é caracterizada pela remoção uniforme da camada superficial do solo e ocorre durante fortes precipitações, quando a capacidade de infiltração de água no terreno é excedida.

A erosão linear constitui uma sequência de evolução natural dos processos erosivos. Não existe um limite que caracterize o final da erosão laminar e o início da erosão linear, na qual ocorre a formação de sulcos, ravinas e voçorocas. Nesta fase, filetes de água se ramificam em braços que se infiltram após percorrer determinada distância, ocasionando o depósito das partículas transportadas (CARVALHO, 2008). De acordo com Camapum de Carvalho *et al.* (2001) os sulcos são pequenos canais com até 10 cm de profundidade, gerados pelo escoamento da água no terreno. O aumento do volume de água escoado em determinados sulcos pode dar origem às ravinas (canais com profundidade máxima de 50 cm) e posteriormente às voçorocas, que correspondem ao estágio mais avançado e complexo do processo erosivo.

A erosão do solo provoca diversos problemas econômicos e ambientais, dentre os quais podem ser citados: a remoção da camada fértil e empobrecimento dos solos em áreas agrícolas; o aumento do risco de desertificação; o desprendimento e escorregamento de solos e taludes podem provocar muitas perdas, que vão desde a danificação de obras até a morte de civis. A erosão também provoca grandes modificações no relevo, e conseqüentemente, no escoamento da água superficial e na calha dos rios (CARVALHO, 2008).

#### **4.3.2. Transporte de sedimentos**

O material particulado produzido pelos processos erosivos é transportado até os corpos hídricos através do escoamento superficial formado durante fortes precipitações. Os sedimentos que atingem o curso d'água podem ser transportados então por tração (ou arraste), saltação e em suspensão.

O transporte por arraste está relacionado com as tensões, tangenciais ao longo do fundo da corrente, provocadas pela movimentação da água, e está restrito ao leito fluvial. Por isso, este tipo de transporte é mais sensível a variações de velocidade e turbulência que os demais (SUGUIO, 1990).

O transporte por saltação pode ser considerado como uma fase intermediária entre o transporte por tração e por suspensão. As partículas que não são suficientemente grandes para se manter no leito, nem pequenas para serem

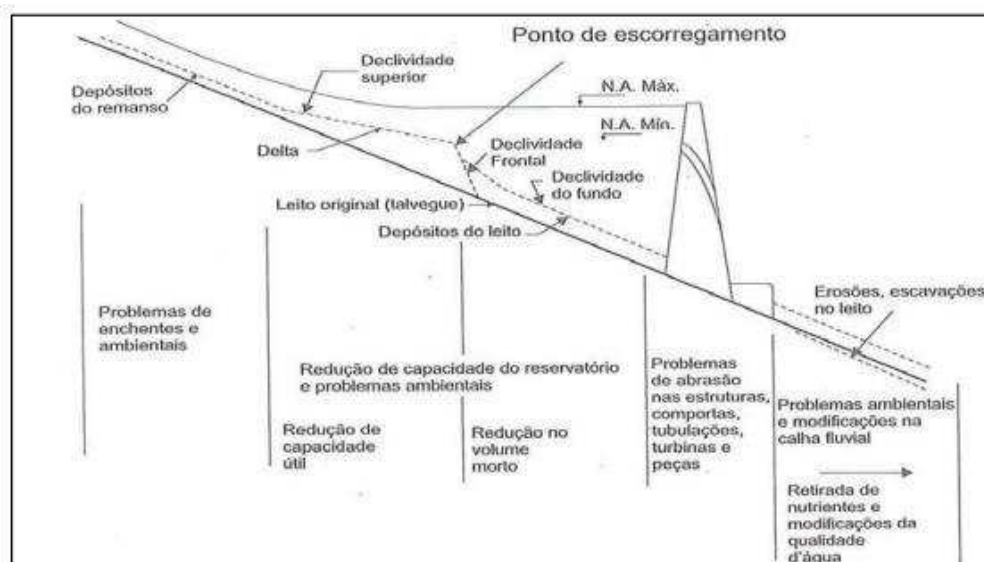
transportadas em suspensão, avançam ao longo do leito fluvial através de uma série de saltos curtos (SUGUIO, 1990).

O transporte por suspensão ocorre quando a intensidade de turbulência for maior que a velocidade de deposição das partículas movimentadas pelas tensões tangenciais e pelas forças de ascensão. No transporte em suspensão, as partículas por serem suficientemente pequenas e pouco pesadas, são carregadas independentemente do leito fluvial, subindo e descendo na corrente acima do leito (GARCIA, 2008).

Os principais problemas relacionados ao transporte de sedimentos em cursos d'água são: alteração da qualidade da água devido ao aumento da turbidez e consequente redução de penetração de luz e calor, alterando o equilíbrio ecológico do ecossistema aquático; o sedimento atua como portador de poluentes químicos e biológicos; as partículas em suspensão podem danificar turbinas, máquinas e comportas, reduzindo sua eficiência ou inutilizando a peça (CARVALHO, 2008).

#### **4.3.3. Deposição de sedimentos**

A deposição de sedimentos é a etapa seguinte ao transporte dos sedimentos e ocorre quando a força do agente transportador (água) é superada pela força da gravidade do sedimento transportado ou quando ocorre a supersaturação do meio de transporte (INFANTI e FORNASARI, 1998). A velocidade de deposição do material transportado em um meio fluido depende de fatores inerentes à partícula em decantação, tais como o tamanho, forma e peso específico; e também, daqueles relativos ao meio fluido (água), como viscosidade, peso específico e velocidade do fluxo (SUGUIO, 1990). Portanto, esse processo não é uniforme, e dentro de um mesmo reservatório pode ocorrer a formação de diferentes tipos de depósitos, conforme ilustrado na Figura 3.



**Figura 3 - Formação de depósitos nos reservatórios e principais problemas decorrentes (CARVALHO, 2008).**

Os depósitos de remanso ocorrem na entrada do reservatório e são constituídos geralmente por material de maior granulometria. Esse tipo de depósito não interfere diretamente na redução do volume útil do reservatório, mas pode ocasionar problemas ambientais, como enchentes. Os depósitos delta são aqueles formados dentro do reservatório por sedimentos de diversas granulometrias e têm como consequência principal a redução da capacidade útil do reservatório. Por sua vez, o depósito de leito se situa em locais mais próximos ao eixo da barragem e são formados por materiais de granulometria mais fina (siltes e argilas), que são transportados por maiores distâncias devido ao menor peso das partículas. Os principais problemas causados pelos depósitos de leito são a redução do volume morto e aqueles relativos à operação do reservatório (abrasão de componentes, tubulações, turbinas) (CARVALHO, 2008).

Segundo Maia (2006), o acúmulo de sedimentos na região correspondente ao volume útil do reservatório pode provocar os seguintes problemas operacionais:

- Diminuição da vazão regularizada, que é afetada pela redução da capacidade de acumulação de água do reservatório. E como a geração de energia elétrica em uma usina depende da vazão regularizada, uma redução nesse parâmetro implicará em uma redução no potencial energético da mesma;

- Assoreamento das tomadas d'água, que pode causar dificuldades operacionais em sistemas de abastecimento e, também, danos aos equipamentos e componentes da usina;
- Redução da vida útil do reservatório, que pode resultar em prejuízos econômicos.

A deposição de sedimentos não provoca alterações apenas na região a montante da barragem. Segundo Carvalho (2008), a jusante do reservatório podem ocorrer erosões de leito e de margens do canal, devido à baixa concentração de sedimentos na água e às modificações no regime de vazão do curso d'água.

#### 4.4. Assoreamento de reservatórios

Problemas relacionados ao acúmulo de sedimentos em obras hidráulicas já eram conhecidos há mais de 4.000 anos por civilizações antigas na China, Egito e Mesopotâmia (CARVALHO, 2008). Entretanto, somente a partir de 1930, com as publicações de Fiock<sup>1</sup> (1934), Grover e Howards<sup>2</sup> (1938) e Eakin<sup>3</sup> (1938), começou haver maior regularidade nas investigações e publicações sobre o tema (CABRAL, 2006).

Um dos estudos mais relevantes sobre o assoreamento de reservatórios foi realizado pelo Banco Mundial em 1987 (MAHMOOD, 1987), que mostrou que a vida útil média dos reservatórios existentes em todo o mundo decresceu de 100 para 22 anos, além de estimar que a perda média anual de capacidade de reservatórios, em decorrência do assoreamento, era de 1%. Segundo Carvalho (2008) a perda do volume anual da barragem de Hoover (EUA), de 1935, tem sido de 0,3% e a de Sanmexia (China), cerca de 1,7%, enquanto no reservatório Warsak, essa perda chega a 18%.

No Brasil, um estudo realizado em 1994 pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS para a Eletrobrás indicou uma perda de capacidade de armazenamento de 0,5% ao ano para os reservatórios do país (CARVALHO,

<sup>1</sup> FIOCK, L. R. (1934). **Records of silt carried by the Rio Grande and its accumulation in elephant butte reservoir**. American Geophysical. Union Trans, v15, p. 468-473.

<sup>2</sup> GROVER, H G.; HOWARDS, C. S. (1938). **The passage of turbid water through lake mead**. Tran ASCE, 103, p 720 – 736.

<sup>3</sup> EAKIM, H. M. (1939). **Silting of Reservoirs**. Washington, DC: United States Department of Agriculture. Tech Bulletin, 524, p 90 – 167.

2008). Entretanto, na maioria dos trabalhos publicados na literatura especializada, a perda encontrada foi superior à estabelecida por esse estudo.

Um estudo realizado por Paiva *et al.* (1998) no reservatório de Vacacaí – Mirim (RS) concluiu que, entre o início de sua operação em 1972 e o ano de 1997, houve uma redução de 22,87% na capacidade de armazenamento original do reservatório, o que representa uma perda anual de 0,9% do volume. Posteriormente, Dill (2002) realizou outro estudo no local e constatou um aumento significativo da taxa de assoreamento do lago de Vacacaí – Mirim. Em 4 anos (entre 1997 e 2001), o volume útil do reservatório foi reduzido em cerca de 6,84%, correspondendo a uma perda de capacidade 1,71% ao ano. O autor atribuiu o grande aumento na deposição de sedimentos no reservatório ao manejo inadequado da bacia hidrográfica.

Cabral (2006) conduziu um estudo no reservatório de Cachoeira Dourada (GO) e constatou que o volume original da represa, que em 1959 era de  $504 \times 10^6 \text{m}^3$ , foi reduzido em 2005 para  $310 \times 10^6 \text{m}^3$ , o que representou uma perda volume de 38%, ou equivalente a 0,68% ao ano.

Vilhena *et al.* (2003) apresentaram um estudo relativo ao reservatório de Funil (RJ), que teve seu volume reduzido em 22,93% ao longo de 23 anos de operação (entre 1969 e 1992), que corresponde a uma perda de armazenamento anual de quase 1%.

Um estudo de caso realizado no reservatório de Três Irmãos (SP) por Miranda (2011), com base em dados de um levantamento batimétrico realizado em 2008 e os dados fornecidos pela concessionária de energia de 1975, constatou que o reservatório sofreu uma perda de 14,5% de seu volume útil ao longo de 33 anos operação. A taxa de redução da capacidade de armazenamento desse reservatório (0,43% ao ano) foi a menor encontrada entre as demais fontes pesquisadas.

Carvalho (2008) afirma que o Brasil possui muitos reservatórios parcial ou totalmente assoreados e lista mais de 40 empreendimentos nessas situações, localizados, principalmente, nas bacias do Atlântico-Leste e do Paraná. O autor afirma também que, apesar da importância dos estudos sedimentológicos para países com matriz energética predominantemente hidrelétrica como o Brasil, as

informações sobre o assoreamento dos reservatórios do país ainda são limitadas, devido à falta de levantamentos batimétricos sistemáticos e a divulgação de seus resultados.

#### 4.4.1. Previsão do assoreamento de reservatórios

A avaliação do assoreamento de um reservatório pode ser estimada através de modelos, que podem ser divididos em empíricos, baseados em observações, e em matemáticos, obtidos teoricamente através de equações matemáticas. Neste trabalho, será dada maior ênfase ao método empírico de Borland & Miller, que é o mais utilizado para estimar a distribuição de sedimentos em reservatórios.

##### 4.4.1.1. Método de Borland e Miller

O método de Borland & Miller (1960), também denominado “método empírico de redução de área”, foi desenvolvido com base em um levantamento de 30 reservatórios pelo *U.S. Bureau of Reclamation* e outros órgãos americanos. O método reconhece que a distribuição dos sedimentos depende: da forma de operação e geometria do reservatório; do tamanho da partícula depositada; e do volume de sedimentos acumulado. Dentre essas variáveis, a geometria do reservatório foi considerada a mais relevante e empregada na elaboração de curvas de classificação de reservatórios apresentadas na Figura 4 (RANDLE *et al.*, 2006).

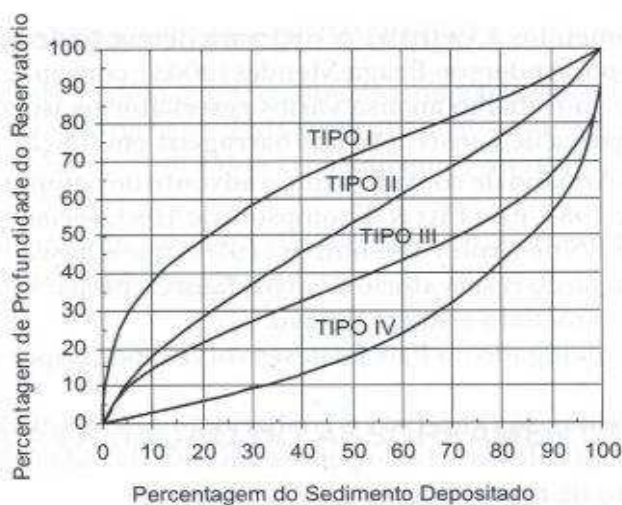


Figura 4 – Tipos de reservatórios segundo o método de Borland & Miller (STRAND, 1974 *apud* CARVALHO, 2008).

Segundo o método, existe uma relação entre a forma do reservatório e a percentagem dos sedimentos depositados que permite a classificação dos reservatórios em quatro tipos diferentes, apresentados na Tabela 2. O tipo de reservatório pode ser relacionado ao valor recíproco da declividade (M), que é obtido por meio da plotagem em escala log-log da profundidade do reservatório no eixo das ordenadas e da sua capacidade no eixo das abscissas (Van Rijn, 2013).

**Tabela 2 - Classificação do tipo de reservatório pelo método de Borland & Miller (CARVALHO, 2008).**

Tipo de reservatório	m	Classificação
I	3,5 a 4,5	De zonas planas
II	2,5 a 3,5	De zonas de inundação a
III	1,5 a 2,5	Montanhoso
IV	1,0 a 1,5	De gargantas profundas

Nos reservatórios de zonas planas (tipo lago) a maior parte dos sedimentos é depositada na parte superior do reservatório, enquanto nos reservatórios de gargantas profundas, a maior parte dos sedimentos é depositada em seu volume morto.

Neste trabalho, a aplicação do método de Borland & Miller foi realizada através dos *softwares* SEDIMENT e DPOSIT, além de contar com o emprego das curvas de Brune (1953 *apud* Morris & Fan, 1998) e Churchill (1948) para a determinação da eficiência de retenção de sedimentos no reservatório.

A eficiência de retenção de sedimentos em um reservatório ( $E_r$ ) é determinada pela relação entre o sedimento depositado e o fluxo total de sedimentos afluente. Esse parâmetro depende da velocidade de sedimentação das partículas, da velocidade do fluxo d'água, e também das características do reservatório (tamanho, forma, profundidade e modo de operação) (RANDLE *et al.*, 2006).

O método de Brune é o mais utilizado para a determinação da  $E_r$  em médios e grandes reservatórios, enquanto a curva de Churchill é a mais adequada aos reservatórios de pequeno porte. Como o presente estudo objetiva analisar o

processo de assoreamento em uma PCH, optou-se por utilizar a curva de Churchill.

#### 4.4.1.2. Curva de Brune

Brune (1953) desenvolveu uma relação empírica para estimativa da eficiência de retenção de sedimentos de longo-termo em reservatórios. Essa relação é baseada na correlação entre a capacidade de afluência (CA), que corresponde ao volume do reservatório (V) dividido pelo volume afluente médio anual ( $V_w$ ), e a eficiência de retenção observada em reservatórios do Tennessee Valley Authority (Figura 5). Segundo Van Rijn (2013) eficiência de retenção independe das propriedades do sedimento (tamanho e velocidade de deposição). A curva de Brune pode ser representada (com imprecisão de cerca de dez por cento) por:

$$E_{res} = \frac{\left[0,000085 + \left(\frac{V}{V_w}\right)^{1,1}\right]}{\left[0,0085 + \left(\frac{V}{V_w}\right)^{1,1}\right]} \text{ para } \frac{V}{V_w} > 0,03$$

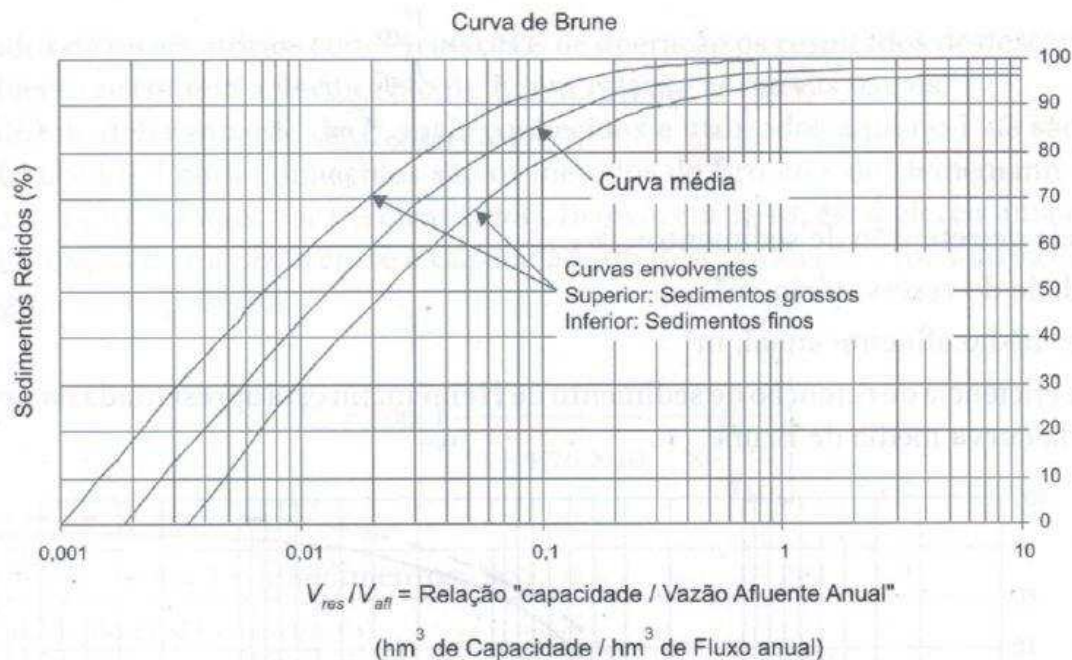


Figura 5 - Curvas de eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, segundo método de Brune (1953 *apud* CARVALHO, 2008).

O método de Brune é provavelmente o mais utilizado para estimar a retenção de sedimentos em reservatórios, e fornece resultados a partir de dados muitos

limitados (dados para o cálculo da capacidade de afluência). Uma das limitações desse método consiste na sua aplicabilidade somente para condições de médias de longo-prazo.

#### 4.4.1.3. Curva de Churchill

Utilizando dados de reservatórios do *Tennessee Valley Authority*, Churchill desenvolveu uma relação entre a porcentagem de sedimento afluente que passa pelo reservatório (SE) e o índice de sedimentação (IS), que pode ser calculado através da equação:

$$IS = \frac{V_{res}^2}{Q^2 \times L}$$

Em que:

IS = índice de sedimentação do reservatório (s<sup>2</sup>/m)

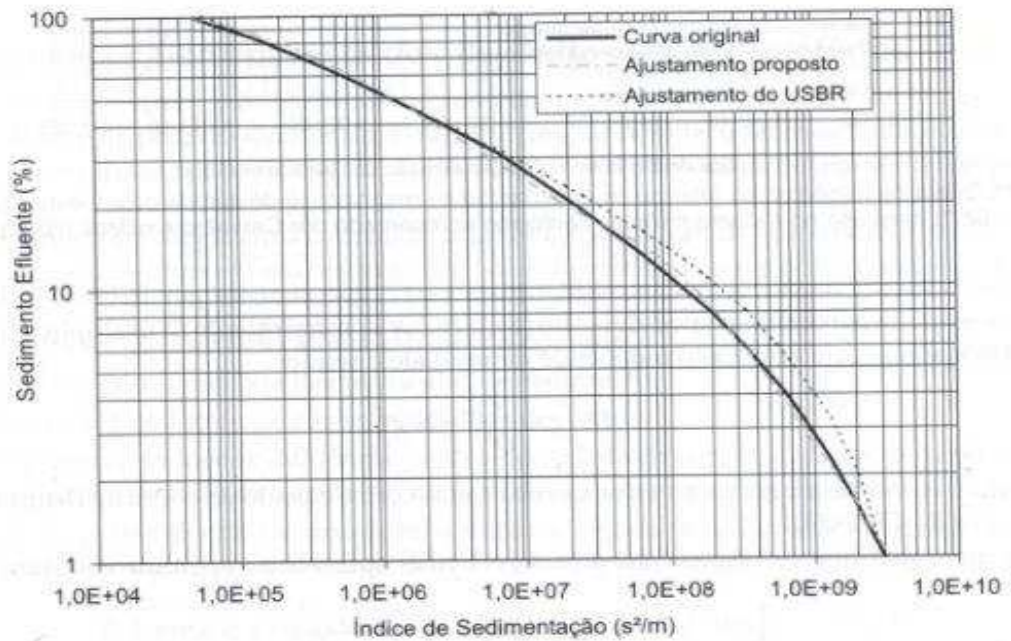
V<sub>res</sub> = volume do reservatório no nível médio de operação (m<sup>3</sup>)

Q = vazão média afluente diária durante o período de estudo (m<sup>3</sup>/s)

L = comprimento do reservatório (m)

Segundo explicado por Carvalho (2008), na Figura 6 a linha pontilhada corresponde à curva da equação ajustada pelo USBR (*United States Bureau of Reclamation*), em unidades do sistema métrico:

$$SE = 100 - (112 - 1.013,4 \times IS^{-0,2})$$



**Figura 6 - Curva da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, segundo Churchill (VANONI, 1977 *apud* CARVALHO, 2008).**

Resultados mais aproximados da curva original podem ser obtidos por meio das equações (CARVALHO, 2008):

$$SE = 6.650 \times (IS + 137.000)^{-0,347} \text{ para } 4,21 \times 10^4 < IS \leq 2,14 \times 10^7$$

$$SE = 90.400.000 \times (IS + 78.000.000)^{-0,835} \text{ para } 2,14 \times 10^7 < IS \leq 3,3 \times 10^9$$

Segundo Van Rijn (2013) a curva de Churchill pode ser representada (com imprecisão de cerca de cinco por cento) através da equação:

$$E_{res} = \frac{[-20 + (0,95 \times SI)^{0,63}]}{[7500 + SI^{0,63}]} \text{ para } SI > 6 \times 10^4$$

#### **4.4.1.4. Softwares SEDIMENT e DPOSIT**

Os *softwares* SEDIMENT e DPOSIT foram desenvolvidos pelo engenheiro Anderson Mendes, da Usina Hidrelétrica Binacional de Itaipu, a partir do método de Borland & Miller e têm como objetivo avaliar o assoreamento e a vida útil de reservatórios de água. SEDIMENT utiliza as metodologias de Lara & Pemberton, para calcular o peso específico aparente, de Borland & Miller, para determinar o assoreamento do reservatório e as curvas de Brune e Churchill para estimar a sua eficiência na retenção de sedimentos. Esse

*software* calcula os volumes assoreados do reservatório, mas não determina a distribuição dos depósitos no mesmo, sendo essa função desempenhada pelo DPOSIT (MENDES, 2006).

Ao utilizar o SEDIMENT é necessário conhecer os seguintes dados:

- Tipo de operação do reservatório;
- Volume do reservatório no N.A. máximo normal ( $\text{hm}^3$ );
- Volume assoreado para  $t=0$  ( $\text{hm}^3$ )
- Descarga líquida média anual afluyente ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- Descarga sólida média anual afluyente ( $\text{t}/\text{ano}$ );
- Taxa de aumento da descarga sólida ( $\%/ \text{ano}$ );
- Eficiência de retenção ( $E_r$ ) de sedimentos (pode-se inserir a  $E_r$  inicial ou utilizar as curvas de Brune e Churchill dentro do programa).

O *software* DPOSIT utiliza os dados gerados pelo SEDIMENT (volumes depositados no reservatório ao longo do tempo) e também a curva cota x área x volume original (antes do início do enchimento do reservatório) (MENDES, 2006).

#### **4.4.2. Medição do assoreamento de reservatórios**

A determinação do grau de assoreamento de um reservatório pode ser realizada basicamente através de dois métodos: o levantamento do contorno do reservatório e o levantamento de seções topobatimétricas. A escolha do procedimento mais adequado depende da finalidade do estudo, da disponibilidade de mapas topográficos anteriores ao levantamento, das dimensões do reservatório e da precisão desejada (CARVALHO, 2008).

A frequência de realização dos levantamentos depende principalmente da capacidade total do reservatório, da carga sólida afluyente e da disponibilidade de recursos financeiros para execução dessa atividade, que é, geralmente, onerosa. Uma estimativa da frequência desejável de levantamentos é apresentada na Tabela 3 (ANEEL, 2000).

**Tabela 3 - Frequência de levantamentos recomendada para reservatórios (ANEEL, 2000).**

<b>Tamanho do reservatório</b>	<b>Classificação em volume (10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)</b>	<b>Frequência</b>
Pequeno Médio Grande	< 10 Entre 10 e 100 > 100	A cada 2 anos A cada 5 anos A cada 10 anos

#### **4.4.2.1. Método do levantamento do contorno**

Esse método consiste na realização do levantamento topográfico do reservatório em diferentes níveis (incluindo os muito baixos, próximos ao esvaziamento) por meio de aerofotogrametria (MATOS, 2012). As informações sobre a geometria do reservatório, relacionadas à lâmina d'água (área, perímetro e largura máxima), são obtidas a partir da interpretação de fotografias aéreas, tiradas em diferentes períodos de operação do reservatório, com níveis variáveis de profundidade.

Devido ao elevado custo e à necessidade de deplecionamento do reservatório, este método é mais indicado para pequenos reservatórios ou para aqueles com altas taxas de variação do nível d'água (BRUK, 1985 *apud* CARVALHO, 2008).

#### **4.4.2.2. Método do levantamento de seções topobatimétricas**

O levantamento topobatimétrico consiste na determinação da topografia de regiões submersas e é um importante mecanismo de monitoramento do assoreamento de um reservatório, pois permite atualizar os seus dados operacionais, como as curvas cota x área x volume, que muitas vezes estão defasadas devido ao acúmulo de sedimentos e não representam as condições atuais do reservatório (MIRANDA, 2011).

Basicamente, este método consiste em levantar seções transversais bem definidas ao longo do reservatório, que serão empregadas na construção do novo mapa topobatimétrico da área. Posteriormente, este mapa será comparado com outros levantamentos realizados anteriormente para a determinação do volume de sedimentos depositados no reservatório ao longo do período de tempo em questão.

A precisão desse método está relacionada ao número de seções batimétricas. Quanto maior a proximidade dos perfis levantados, maior será a precisão do levantamento. A Agência Nacional das Águas sugere uma equidistância das linhas levantadas para o corpo do reservatório de acordo com as equações (ANA, 2011):

- Para PCHs:

$$E_{ST} = \frac{0,25 \times A^{0,25}}{D}$$

- Para UHEs:

$$E_{ST} = \frac{0,70 \times A^{0,35}}{D}$$

Em que:

$E_{ST}$  = Equidistância das seções transversais (km)

A = Área do reservatório em seu nível máximo maximorum (ha)

D = Comprimento do reservatório (km)

Para o levantamento de tributários, estreitamentos e canais, é recomendado utilizar um espaçamento equivalente à metade do utilizado para o corpo do reservatório.

Existem diversas tecnologias utilizadas para a realização de levantamentos topobatimétricos e a escolha daquela mais adequada dependerá das características do reservatório e dimensões das seções a serem levantadas, e também dos recursos financeiros disponíveis para a execução do trabalho (ANEEL, 2000). Neste estudo foi utilizado um DGPS (*Differential Global Positioning System*) acoplado a um ecobatímetro monofeixe digital.

O DGPS é um receptor de alta precisão que opera com o processamento contínuo de correção de sinais. O seu funcionamento se baseia na hipótese de que o erro na determinação de um ponto é o mesmo para todos os receptores situados em um raio de centenas de quilômetros. A eliminação desse erro permite uma redução significativa do erro total presente. O DGPS fornece dados com uma precisão de 20 milímetros a 5 metros, dependendo da qualidade do receptor e do sinal de correção utilizados (LIMA *et al.*, 2006)

O funcionamento do ecobatímetro se baseia na emissão de ondas sonoras para determinação da profundidade da lâmina d'água. Através da diferença de tempo entre a emissão e a recepção do sinal pelo transdutor, conhecida a velocidade de propagação da onda no meio, pode-se calcular a profundidade em determinado ponto (Figura 7) (MATOS, 2012).

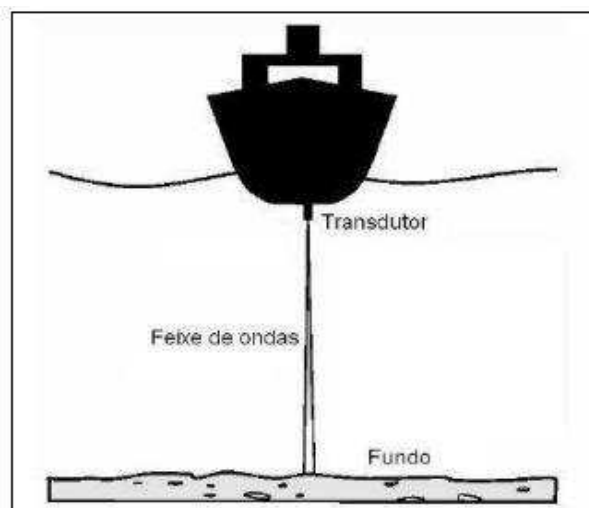


Figura 7 - Esquema do levantamento topobatimétrico utilizando ecobatímetro monofeixe (FIPAI, 2009 *apud* MIRANDA, 2011).

#### 4.4.2.3. Determinação do Modelo Digital de Elevação do reservatório utilizando o modelo TIN (*Triangulated Irregular Network*)

Existem vários métodos para o cálculo de volume em reservatórios. Com a evolução da capacidade de processamento dos computadores e o desenvolvimento de ferramentas de geoprocessamento os métodos tradicionais foram sendo gradualmente substituídos por métodos automáticos.

O Serviço Geológico Americano (USGS) utiliza um *software* hidrográfico para processar os dados do ecobatímetro e do GPS e compila todos os dados no ARCGIS gerando o MDE por meio do método TIN (WILSON; RICHARDS, 2006).

O TIN (*Triangulated Irregular Network*) é uma estrutura de dados vetoriais, em forma de triângulos não sobrepostos, que representa uma superfície geográfica. Existem muitos métodos de obtenção da superfície TIN, dentre os quais destaca-se o *Constrained Delaunay Triangulation*, disponível no ArcGIS, considerado por diversos autores como o melhor método de modelagem de

feições de fundo de vale, drenagens, divisores de água e também o fundo de reservatórios (MATOS, 2012).

#### **4.5. Medidas preventivas e corretivas para o controle do assoreamento de reservatórios**

Os reservatórios estão sujeitos ao processo de assoreamento, independente de suas características e finalidades. Entretanto, podem-se minimizar os problemas gerados pela afluência e deposição de sedimentos nos reservatórios através de medidas de controle preventivas e corretivas.

As medidas preventivas são mais eficientes e econômicas que as medidas corretivas, por isso devem ser previstas e adotadas em todas as fases do empreendimento, desde o planejamento até a operação do reservatório. As medidas corretivas são implantadas somente quando o planejamento e previsão do assoreamento não forem adequados e a deposição dos sedimentos estiver comprometendo a função e operação do reservatório (CARVALHO, 2008).

Uma das principais medidas preventivas, realizada durante a fase de inventário, é o estudo e seleção do melhor local para a construção da barragem. Ao defini-lo é importante priorizar, sempre que possível, áreas com menores taxas de produção de sedimentos. A determinação de um volume morto que atenda às necessidades do empreendimento ao longo de sua vida útil também é uma importante medida de prevenção do assoreamento de reservatórios (MIRANDA, 2011).

Outra medida preventiva importante é o controle das fontes de produção de sedimentos, ou seja, o controle da erosão na bacia de contribuição do reservatório. Muller (1995) enfatiza que o controle de erosão na bacia é a medida mais eficiente na redução do assoreamento de reservatórios. Entretanto, esse é o método mais difícil de ser implementado, pois se estende às áreas fora do domínio da empresa responsável pelo empreendimento e seus resultados só podem ser observados no médio e longo prazo.

O controle da erosão em uma bacia hidrográfica está relacionado à conservação e ao manejo adequado do solo, principalmente em áreas

agrícolas, que podem ser realizados através de técnicas como o terraceamento, a rotação de culturas, o cultivo em curvas de nível e o sistema de plantio em faixas, entre outras. O controle de sedimentos em estradas e nas zonas rural e urbana por meio de medidas de contenção e proteção de taludes, obras de drenagem e contenção de ravinas e voçorocas, e a proteção das margens dos cursos d'água e do reservatório com vegetação ciliar ou proteções estruturais, também são importantes ferramentas para reduzir o assoreamento de reservatórios.

Algumas medidas preventivas estão relacionadas ao controle da afluência de sedimentos ao reservatório, que podem ser realizadas através das seguintes estruturas: pequenas barragens a montante do empreendimento, condutos e canais de derivação (em *bypass*) e a retenção por barreira ou rede de vegetação (VICENT, 2003 *apud* MAIA, 2006).

As medidas corretivas são caracterizadas pela retirada do sedimento acumulado no reservatório ou pela minimização de seu efeito, e são realizadas quando os depósitos de sedimentos afetam a operação e vida útil do reservatório. Visando minimizar os efeitos causados pelo assoreamento, podem ser efetuadas a remoção de sedimentos por meio de descarregadores de fundo ou dragagem e o alteamento da barragem (MAIA, 2006).

Os descarregadores de fundo são estruturas hidráulicas no corpo da barragem que permitem a expulsão de sedimentos depositados no fundo do lago. Segundo Yon (1992), a remoção de sedimentos pode ser classificada como: *sluicing*, quando a liberação do sedimento ocorre antes da sua deposição, e *flushing*, que consiste na remoção de sedimentos já depositados, com ou sem o rebaixamento do nível d'água do reservatório.

A dragagem é um processo de remoção mecânica dos sedimentos depositados. É um meio muito oneroso, por isso só deve ser utilizada quando outros métodos não puderem ser empregados. Além do elevado custo, a dragagem também demanda o uso de energia, e gera uma grande quantidade de resíduos, que necessitam de destinação adequada. O material dragado de granulação grosseira (areia) poderia ser utilizado em construção civil, enquanto os sedimentos mais finos, contendo nutrientes poderiam ser destinados a fins

agrícolas. Entretanto, grande parte desse material não pode ser utilizado economicamente devido a custos diversos e outros fatores (possível caráter contaminante dos sedimentos e custos de transporte), e por isso devem ser dispostos em local adequado (ANEEL, 2000).

A dragagem é uma atividade que pode provocar impactos negativos no meio ambiente e por isso está sujeita ao licenciamento ambiental. A Resolução CONAMA nº 454/2012 estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras.

O alteamento da barragem também pode ser adotado para recuperação do volume de água perdido devido ao acúmulo de sedimentos no reservatório. Entretanto, essa medida é indicada apenas em situações em que é possível aumentar a área do reservatório com custos reduzidos de desapropriação e sem grandes impactos ambientais resultantes (CARVALHO, 2008).

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5. 1. Caracterização da área de estudo

#### 5.1.1. O empreendimento

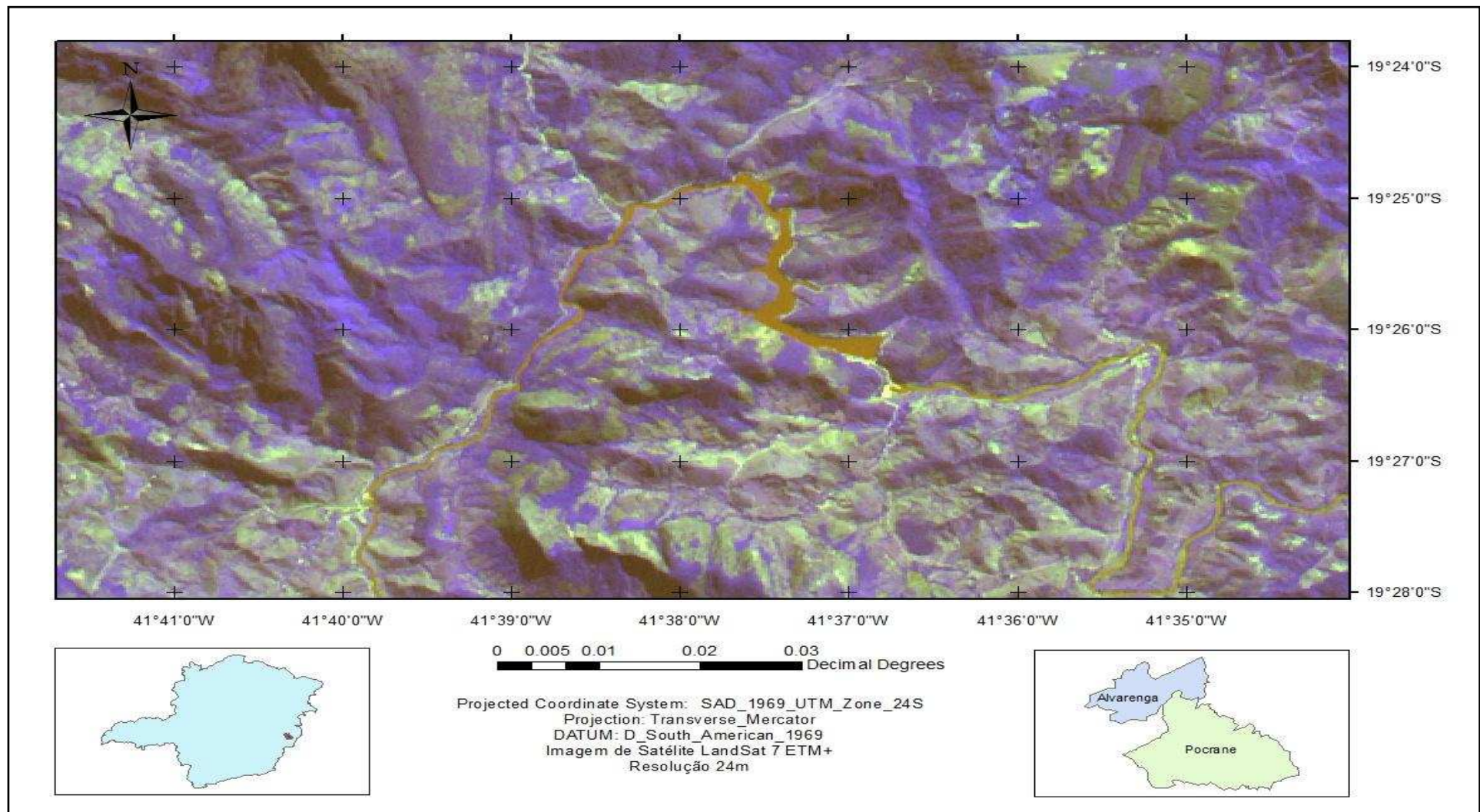
A PCH Henrique Nunes Coutinho (PCH Cachoeirão) é o primeiro empreendimento a ser viabilizado pelo Programa Minas PCH e está localizada no limite dos municípios de Pocrane e Alvarenga, região leste de Minas Gerais, nas coordenadas geográficas aproximadas 19°26'S e 41°37'WGr (Figura 8).

O arranjo geral da PCH Cachoeirão apresenta um vertedouro com soleira livre no leito do rio (Figura 9), com crista na cota 232,00m, correspondente ao N.A. Máximo Normal, e um vertedouro controlado com Comportas Segmento, com crista na cota 236,00m. O fechamento das ombreiras se dá por Barragem de Terra Homogênea com crista na cota 236,00m. O reservatório da PCH possui uma capacidade de armazenamento de 10,53 hm<sup>3</sup> e área alagada de 1,02 km<sup>2</sup>.

A usina possui potência instalada de 27 MW, com 3 geradores de 9 MW cada (Figura 10). Sua operação teve início em julho de 2009, em parceria da CEMIG com a Santa Maria Energética, através da constituição de uma SPE – Sociedade de Propósito Específico. Os dados operacionais do empreendimento estão apresentados na Tabela 4:

**Tabela 4 - Dados operacionais da PCH Cachoeirão.**

<b>Cota Operativa Mínima (m)</b>	<b>Volume Operativo Mínimo (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Área Operativa Mínima (km<sup>2</sup>)</b>
229,00	3,84	0,66
<b>Cota Operativa Máxima (m)</b>	<b>Volume Operativo Máximo (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Área Operativa Máxima (km<sup>2</sup>)</b>
232,00	6,37	1,02
<b>Cota Max Maximorum (m)</b>	<b>Volume Max Maximorum (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Área Max Maximorum (km<sup>2</sup>)</b>
235,30	10,50	1,47
<b>Volume Total (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Útil (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Morto (hm<sup>3</sup>)</b>
6,37	2,53	3,84
<b>Cota Crista Vertedouro (m)</b>	<b>Cota Coroamento (m)</b>	<b>Área Drenagem (km<sup>2</sup>)</b>
232,00	237,00	3.489,00



**Figura 8 - Localização da PCH Cachoeirão.**



**Figura 9 - Vertedouro de superfície da barragem. Figura 10 - Casa de força da PCH.**

### **5.1.2. Hidrografia**

A PCH Cachoeirão, cuja área de drenagem total é de 3.489,09 km<sup>2</sup> e área incremental de 779,20 km<sup>2</sup>, está localizada no rio Manhuaçu, que constitui num dos principais tributários da margem esquerda do Rio Doce, e integra a Bacia do Atlântico-Trecho Leste. A bacia hidrográfica do rio Manhuaçu ocupa uma área de 8.826 km<sup>2</sup> e é formada pelas sub-bacias dos rios Manhuaçu, Mutum, São Luís, Pocrane, Itueto, José Pedro e Capim, além de ribeirões e rios de menor porte (Figura 11) (CBH, 2010).

O rio Manhuaçu nasce na Serra da Seritinga, divisa dos municípios de Divino e São João do Manhuaçu, desenvolve-se por cerca de 347 km até desaguar no rio Doce, acima da cidade de Aimorés, do qual é um dos principais afluentes pela margem direita (CBH,2010).

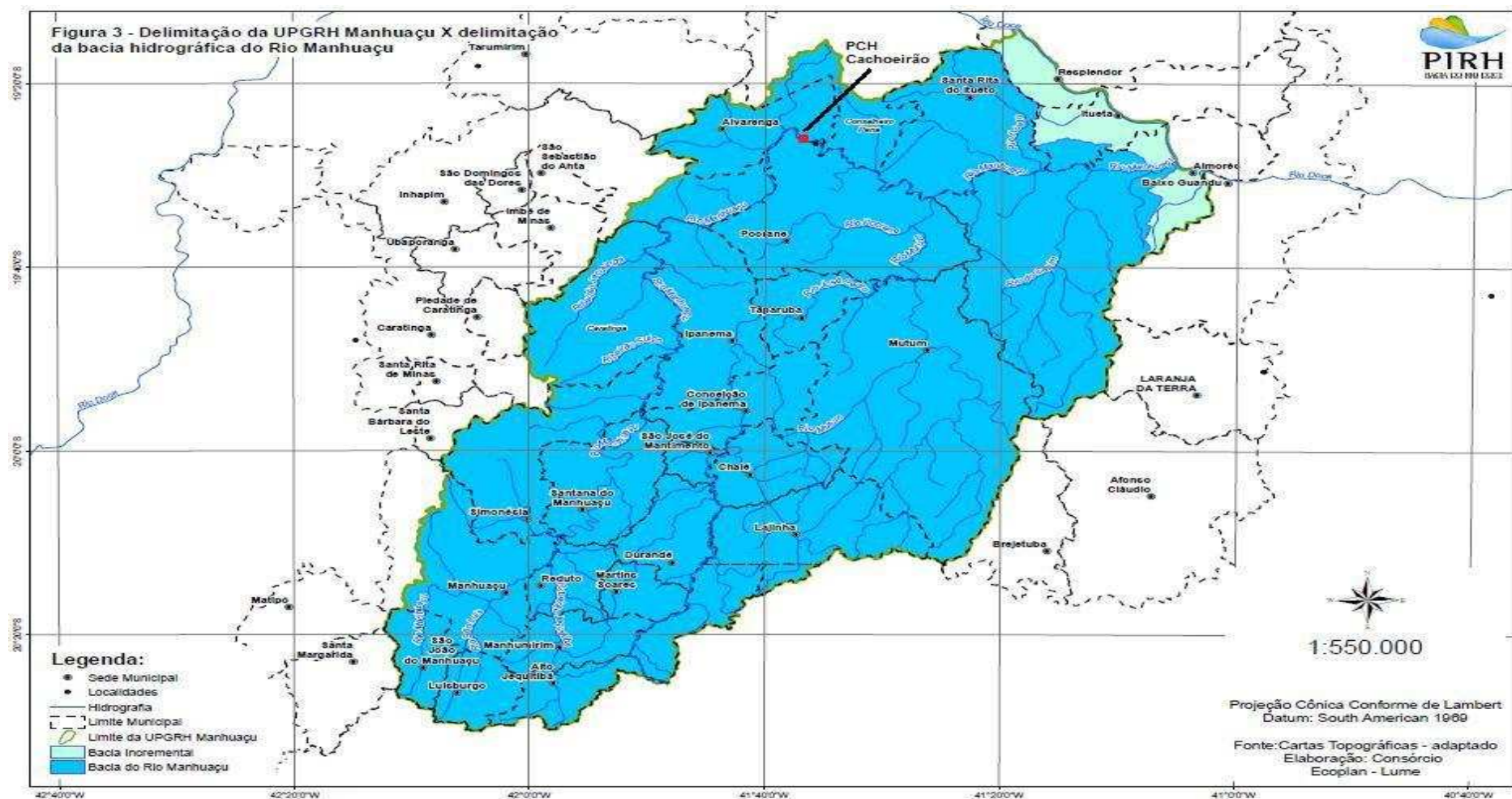


Figura 11 - Delimitação da bacia hidrográfica do rio Manhuaçu (CBH, 2010).

A bacia do rio Manhuaçu drena terrenos pré-cambrianos e desta forma é comum a ocorrência de corredeiras e cachoeiras, devido ao controle estrutural das unidades litológicas. O padrão de drenagem deste rio é subdendrítico, porém devido ao controle estrutural, são observados trechos retilíneos profundamente entalhados, que produzem em muitos casos o encachoeiramento do leito do rio. Devido à atuação de tectônica rúptil, a drenagem adquire muitas vezes o padrão subparalelo, o qual também é evidenciado por saltos e corredeiras, que na realidade indicam o desnivelamento brusco do curso fluvial (CEMIG, 2012). As principais características fisiográficas da bacia do rio Manhuaçu estão resumidas na Tabela 5.

**Tabela 5- Características da bacia do rio Manhuaçu.**

Área de drenagem	8.826 km <sup>2</sup>
Comprimento	347 km
Cota nascente	700 m
Cota foz	90 m
Declividade média	1,76 m / km
Largura média	31 km
Índice de Compacidade	1,45
Fator de forma	0,11

Devido às suas condições naturais, a bacia do rio Manhuaçu possui um potencial para a geração de energia elétrica que é explorado através de usinas hidrelétricas instaladas ao longo de sua extensão. Segundo dados do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (2010), atualizados por meio de uma revisão literária, atualmente existem 8 PCHs e uma UHE em operação, gerando cerca de 427MW de potência (Figura 12).

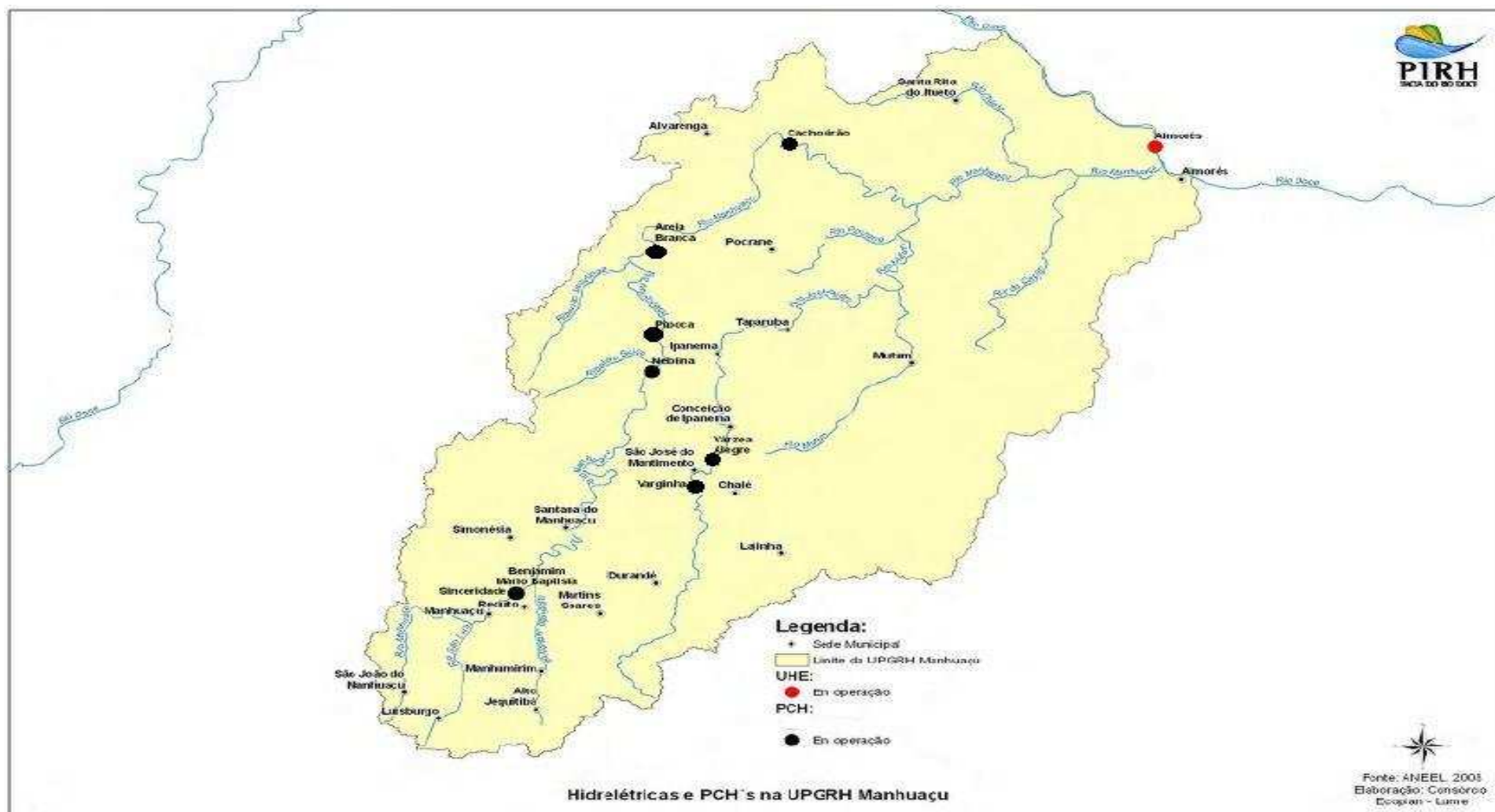


Figura 12 - Centrais hidrelétricas instaladas na bacia do rio Manhuaçu (Adaptado de CBH, 2010).

### 5.1.3. Clima

O clima na bacia do Rio Doce é o tropical úmido, caracterizado por uma não uniformidade, explicada por um conjunto de fatores como posição geográfica (latitude/continentalidade), relevo/topografia, e, principalmente, a atuação de quatro massas de ar: com maior frequência, a Massa Tropical Atlântica (mTa) e Massa Polar Atlântica (mPa), e em menor intensidade, a Massa Equatorial Continental (MEC) e a Massa Tropical Continental (mTc) (COELHO, 2009).

Segundo a classificação de Köppen (1948), identificam-se basicamente três tipos climáticos na bacia: o Clima Tropical de Altitude com chuvas de verão e invernos frescos (Cwb), presente nas vertentes da Serra da Mantiqueira e do Espinhaço e nas nascentes do rio Doce; o Clima Tropical de Altitude com chuvas de verão e verões quentes (Cwa), presente nas nascentes de seus afluentes e o Clima Quente com chuvas de verão (Aw), presente nas regiões do médio e baixo Rio Doce (CUPOLILLO, 2008). O tipo climático que ocorre na região estudada é o Aw (CEMIG, 1998), que é caracterizado por temperaturas médias no mês mais frio superiores a 18° e um período seco bem marcado (que coincide com o inverno, com precipitação inferior a 60 mm, no mínimo durante um mês). O período de outubro a março é caracterizado como chuvoso, com as maiores precipitações ocorrendo em dezembro e janeiro (CUPOLILLO, 2008).

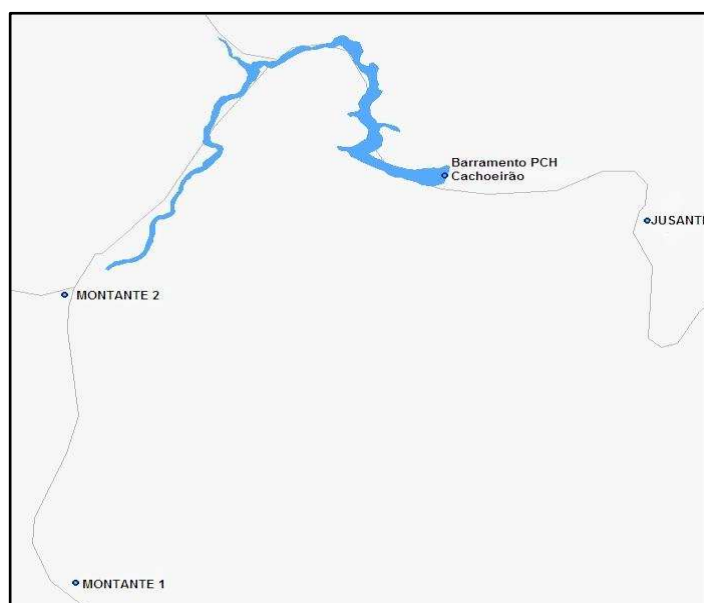
O prolongado período de seca é observado durante cinco a seis meses, notadamente nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro. A precipitação média anual varia entre 950 e 1200 mm, sendo que a temperatura média anual situa-se entre 21 e 27°C. As principais características climatológicas estão apresentadas na Tabela 6, obtidas a partir de informações da Estação Meteorológica de Aimorés - Período 73/90 (CEMIG, 1998).

**Tabela 6 - Temperatura e precipitações médias mensais para a região de estudo.**

Temperaturas e Precipitações Médias												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp. (°C)	26,6	27,1	26,7	25,2	23,6	21,7	21,3	22,5	23,5	25	25,5	26
Precip. mm	227	110	149	72	29	18	12	17	41	109	196	222

#### 5.1.4. Monitoramento hidrometeorológico no entorno do reservatório

O monitoramento das condições meteorológicas no entorno do reservatório é realizado através da operação de três estações fluviométricas, instaladas na região de inserção da PCH Cachoeirão, sendo duas a montante e uma a jusante, conforme apresentado na Figura 13 .



**Figura 13 - Localização das estações fluviométricas da PCH Cachoeirão (LIMIAR, 2012).**

As estações são monitoradas pelo consórcio responsável pela PCH Cachoeirão, como cumprimento da Condicionante de Licença de Operação e os relatórios enviados ao órgão ambiental são elaborados pela empresa Limiar Ambiental. As estações possuem registro eletrônico de nível de água e precipitação e transmissão de dados a cada hora por satélite Orbcomn (Figura 14).



**Figura 14 – Estação hidrometeorológica no entorno da PCH Cachoeirão (LIMIAR, 2012).**

Além do registro de dados das estações, também são realizadas campanhas para medição da cota, vazão, área, largura, profundidade e velocidade em cada uma das estações, o que permite gerar uma curva chave de descarga líquida a partir dos dados obtidos e verificar a coerência das previsões feitas nos estudos ambientais relativas ao assoreamento e remanso do reservatório. Também são realizadas medições de descarga sólida e análise sedimentológica a montante e a jusante da casa de força para acompanhar a evolução do comportamento hidrossedimentológico do rio Manhuaçu no trecho de interesse durante a operação da usina. As Tabela 7 e Tabela 8 contêm as informações dessas estações.

**Tabela 7 - Estações de monitoramento pluviométrico (CEMIG, 2012).**

Código	Nome	Latitude	Longitude	Tipo
01941027	Cachoeirão Montante 2	19°27'38"S	41°39'54"W	PT
01941028	Cachoeirão Montante 1	19°29'51"S	41°39'46"W	PT
01941029	Cachoeirão Jusante	19°26'36"S	41°35'16"W	PT

P = estação com pluviômetro, T = estação telemétrica.

**Tabela 8 - Estações de monitoramento fluviométrico (CEMIG, 2012).**

Código	Nome	Rio	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Tipo
56979000	Cachoeirão Montante 1	Manhuaçu	19°29'51"S	41°39'46"W	3.300	FDT
56979500	Cachoeirão Montante 2	Manhuaçu	19°27'38"S	41°39'54"W	3.438	FDT
56979600	Cachoeirão Jusante	Manhuaçu	19°26'36"S	41°35'16"W	3.600	FDT

F = estação com escala para observação do nível d'água, T = estação telemétrica, D = estação onde são efetuadas medições de descarga líquida.

### 5.1.5. Geologia

As informações referentes à geologia do entorno do reservatório foram extraídas do Estudo de Impacto Ambiental elaborado pela Consita em 1998.

A geologia da área de influência da PCH Cachoeirão é caracterizada pela ocorrência de unidades estratigráficas, litológica e estruturalmente, bem diferenciadas. Os processos de intemperismo possuem grande influência na evolução do relevo regional, entretanto os produtos de alteração que recobrem as encostas frequentemente deixam aflorar as rochas pré-cambrianas.

As unidades geológicas predominantes na área estudada são representadas por rochas relacionadas a um embasamento metamórfico de alto grau e idade arqueana (Complexo Pocrane), sequências supracrustais brasileiras, predominantemente quartzolíticas (Grupo Crenaque), e massas intrusivas graníticas sin a tarditectônicas (Suíte Intrusiva Galileia). Ocorrem também coberturas neocenozóicas, representadas por acumulações aluviais, que acompanham os cursos fluviais e mantos coluviais, situados na parte inferior das encostas.

#### Complexo Pocrane (PEpc)

O Complexo Pocrane é a unidade de maior expressão na região de estudo. Segundo Silva *et al.* (1987), o complexo é composto por “biotita e/ou hornblenda gnaisses bem foliados, com ou sem granadas; localmente, migmatitos mobilizados; metatexitos com paleossoma de anfibólitos, biotita e/ou hornblenda gnaisse; ortognaisses de composição granodiorítica a tonalítica, xistos e quartzitos em quantidades subordinadas”. Os afloramentos de rocha relativamente são situam-se nos leitos fluviais, como o do rio Manhuaçu, a sul de Barra Mansa, do ribeirão Alvarenga e do ribeirão Padre Ângelo.

#### Grupo Crenaque (PEcr)

O grupo Crenaque possui origem essencialmente sedimentar e é constituído por quartzitos puros a muscovitas, frequentemente de granulação grosseira e bem plaqueados. A rocha apresenta, em lâmina, textura granoblástica fina e como mineralogia principal quartzo, microclina, clinopiroxênio e anfibólio (Silva

*et al.*, 1987). Os afloramentos de rocha são localizados no topo das colinas, sustentando escarpas que abastecem taludes de blocos desmoronados.

#### Suíte Intrusiva Galileia (Pεγg)

As rochas dessa unidade geológica se apresentam sob forma de batólitos e ou stocks de caráter intrusivo. Segundo Silva *et al.* (1987), a rocha possui composição tonalítico-granodiorítica, diorítica e quartzo-diorítica e granítica, geralmente de granulação média, ricas em encaves microgranulares e diques sin-intrusivos.

Os afloramentos rochosos apresentam tonalidade clara, com textura fina a média e arranjo isotrópico. Em geral, trata-se de rocha granodiorítica-tonalítica com quartzo, microlina, plagioclásio e biotita.

#### Depósitos Cenozóicos (aluviões quaternários – Aq e colúvios quaternários (Cq)

Na área de estudo ocorrem dois tipos genéricos de depósitos sedimentares quaternários: coluviais e de origem aluvionar.

A ocorrência de diferentes depósitos coluviais é função do domínio geológico considerado, que após o processo de intemperismo originam colúvios finos e grossos. Os colúvios finos podem ser observados no capeamento das encostas moldadas em rochas com predominância gnáissica do Complexo Pocrane e colinas das partes internas dos plutons graníticos da Suíte Galileia. Esses depósitos possuem classes texturais diversificadas, que variam dependendo das características mineralógicas da rocha que deu origem aos colúvios. Os colúvios grossos, constituídos por blocos e matacões desmoronados das encostas, podem ser encontrados na base das escarpas quartzíticas e constituindo saias em tornos dos pontões graníticos.

Os depósitos de origem aluvionar são pouco representativos no entorno da PCH Cachoeirão, e restringem-se a algumas áreas de planície de inundação, às margens do rio Manhuaçu, com larguras inferiores a 100 metros.

### **5.1.6. Pedologia**

As informações referentes à pedologia do entorno do reservatório foram extraídas do Estudo de Impacto Ambiental elaborado pela Consita em 1998, e complementadas com dados do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2009).

Na região estudada predominam os solos das classes Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos (Solos Litólicos e Aluviais), descritos resumidamente

#### **Latossolos**

São solos minerais, fortemente ácidos (normalmente distróficos), não hidromórficos, bem drenados, profundos, com sequência de horizontes A, B e C pouco diferenciada e podem ser encontrados nas cores amarela, avermelhada, vermelha e brunadas. Tratam-se de solos bastante intemperizados, típicos de regiões equatoriais e tropicais e são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo, com capacidade de troca de cátions baixa, inferior a 17cmolc/kg de argila, sem correção para carbono.

#### **Argissolos**

São solos minerais, não hidromórficos, bem desenvolvidos, normalmente ácidos (podendo ser distróficos, álicos ou eutróficos), de profundidade e textura bem variáveis e coloração avermelhada ou amarelada. Os argissolos apresentam um horizonte A ou E, seguido imediatamente de horizonte B textural, com argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico.

#### **Cambissolos**

São solos minerais, não hidromórficos, pouco intemperizados, com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial. Tratam-se de solos pouco intemperizados, As características desses solos podem variar muito de acordo com o material de origem, o relevo e as condições climáticas.

Por isso, os cambissolos podem ser fortemente até imperfeitamente drenados, rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada até vermelho.

#### Neossolos (Solos Litólicos e Aluviais)

São solos constituídos por material mineral, ou por material orgânico pouco espesso, que apresentam pouca alteração em relação ao material de origem devido a pouca expressão dos processos pedogenéticos.

##### - Solos Litólicos

São solos não hidromórficos, bastante rasos (jovens), onde o horizonte A repousa diretamente sobre a rocha ou um horizonte C em evolução. Tratam-se dos solos geralmente pedregosos e/ou rochosos, moderadamente a excessivamente drenados, e apresentam textura variável, podendo ser distróficos ou eutróficos (EMBRAPA, 2010).

##### -Solos Aluviais

São solos pouco evoluídos, derivados de sedimentos aluviais e apresentam apenas um horizonte superficial A, abaixo do qual se encontram camadas estratificadas, de granulometria e espessura bastante variadas, devido à heterogeneidade do material de origem depositado (EMBRAPA, 2010).

#### **5.1.7. Uso e ocupação do solo**

A área no entorno da PCH Cachoeirão, levantada durante a elaboração do EIA (CONSITA, 1998), é ocupada por capoeiras, florestas e mata ciliar, afloramentos de rocha, áreas de atividade agrícola e pastagens (Figura 17). O uso e ocupação do solo descritos em 1998, ainda correspondem à realidade da área de estudo, conforme observado em campo no ano de 2012.

Ao longo das margens do rio, é possível observar afloramentos rochosos localizados e a ocorrência das matas ciliares em sua superfície ou no seu entorno (Figura 15).



**Figura 15 - Afloramentos rochosos e matas ciliares no entorno do lago da PCH Cachoeirão.**

As capoeiras estão localizadas em áreas de encostas e terrenos mais íngremes, onde a dificuldade de acesso, tanto para o pastoreio quanto para as operações de manutenção, favorece o estabelecimento e desenvolvimento das espécies colonizadoras (CONSITA, 1998).

Nos baixios e vales, em locais onde não há afloramentos rochosos, é observada a predominância de pastagens, cultivos e pastos sujos. Segundo informações do Instituto Brasileiro de Geostatística – IBGE (2011), as principais atividades agropecuárias praticadas na região são a criação de bovinos, o cultivo de café, milho e feijão, e a fruticultura (Figura 16).

Observa-se na Figura 17 que em grande parte da área no entorno do reservatório, a mata ciliar foi substituída por pastagens nas áreas de fácil acesso, inclusive em regiões muito próximas ao reservatório (Figura 16).



**Figura 16 - Criação de bovinos e plantação de milho às margens do reservatório.**

A remoção da cobertura vegetal natural para a criação de pastos e o consequente pisoteio pelo gado produz grandes transformações no solo,

favorecendo a ocorrência de processos erosivos. A erosão do solo aumenta a produção de sedimentos na bacia o que, conseqüentemente, aumenta a quantidade de sedimentos aportada ao curso d'água e favorece o assoreamento.

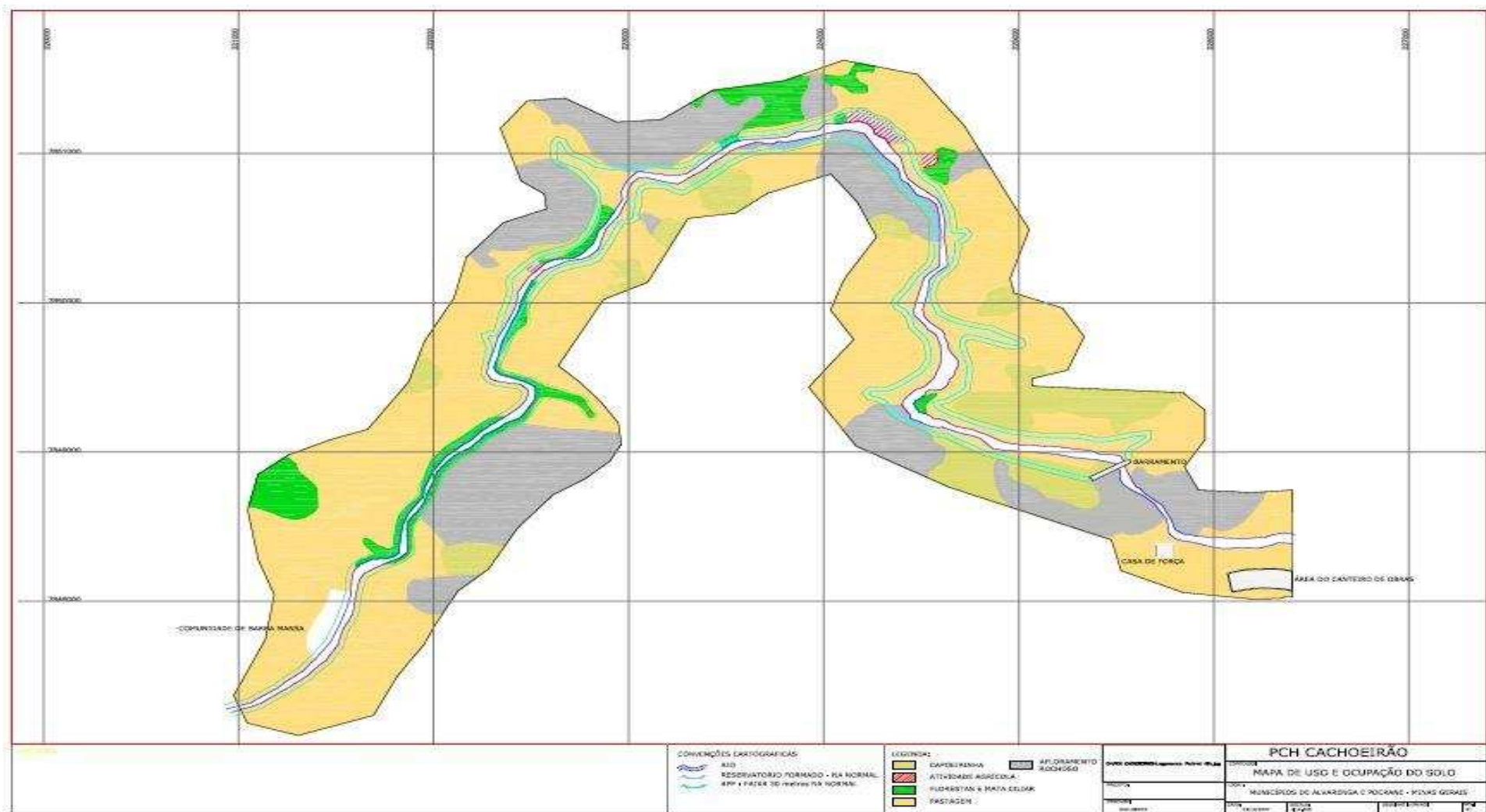


Figura 17 - Mapa de uso e ocupação do solo no entorno do reservatório da PCH Cachoeirão (LIMIAR, 2012).

### 5.1.8. Focos Erosivos

O Programa de Monitoramento e Controle de Processos Erosivos faz parte do Projeto de Conservação dos Solos apresentado junto ao Plano de Controle Ambiental - PCA da PCH Cachoeirão. O monitoramento é realizado desde 2009, através de campanhas de campo anuais, e tem como objetivos: identificar/caracterizar os movimentos de massa e focos erosivos lineares instalados na área diretamente afetada pelo empreendimento; apresentar as diretrizes para o controle e recuperação dos processos erosivos, e acompanhar as alterações das encostas das margens do reservatório. Para classificar o grau de risco de erosão dos pontos monitorados, utilizou-se a metodologia proposta por Augusto Filho (1992), que estabelece quatro níveis de risco para instalação de processos erosivos, conforme indicado na Tabela 9 (LIMIAR, 2012).

**Tabela 9- Determinação do Grau de Risco (AUGUSTO FILHO, 1992).**

<b>GRAU DE RISCO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>R1 Baixo</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação e tipo de terreno, entre outros) e o nível de intervenção no setor são de baixa potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos;</li><li>- Não há indícios de instabilidade;</li><li>- Mantidas as condições existentes, não se espera a ocorrência de eventos destrutivos, no período compreendido por uma estação chuvosa normal.</li></ul>
<b>R2 Médio</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação e tipo de terreno, entre outros) e o nível de intervenção no setor são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos;</li><li>- Observa-se a presença de algum(ns) sinais de instabilidade (encostas e margens de drenagem), porém incipiente(s).</li><li>- Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</li></ul>
<b>R3 Alto</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação e tipo de terreno, entre outros) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos;</li><li>- Observa-se a presença de significativo(s) sinal(is) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.).</li><li>- Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</li></ul>

<b>R4 Muito Alto</b>	<p>- Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação e tipo de terreno, entre outros) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos;</p> <p>- As evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de deslizamento, feições erosivas, etc.) são expressivas e estão presentes em grande número e/ou magnitude.</p> <p>Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>
--------------------------	--

Os resultados das campanhas foram reportados ao órgão ambiental competente por meio de relatórios periódicos, que forneceram os dados utilizados nesse trabalho, apresentados resumidamente na Tabela 10.

**Tabela 10 - Processos erosivos instalados no entorno do reservatório da PCH Cachoeirão.**

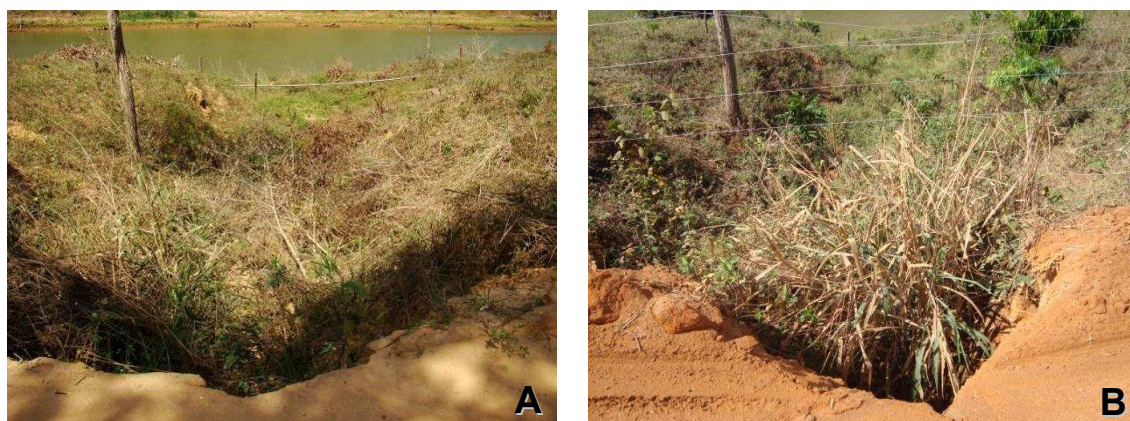
Ponto	Margem do reservatório	Tipo de Processo	Grau de Risco		Situação	Coordenadas (UTM)	
			2009	2012		X	Y
1	Esquerda	Voçoroca	4	2	Em estabilização	220913,76	7847374,2
2	Esquerda	Voçoroca	4	2	Em estabilização	221408,49	7847880,1
3	Direita	Escorregamento	2	1	Em estabilização	223494,54	7851142,3
4	Esquerda	Desprendimento	2	3	Em atividade	223484,49	7851139
5	Esquerda	Escorregamento	2	1	Em estabilização	224405,54	7850995,2
6	Esquerda	Desprendimento	3	3	Em atividade	224643,92	7850467,9
7	Esquerda	Desprendimento	1	0	Em estabilização	224713,87	7849607,3
8	Esquerda	Ravinamento	3	1	Em estabilização	224683,04	7849414

A Figura 18 apresenta um mapa com a localização dos processos erosivos identificados durante as campanhas e o grau de risco dos mesmos.



Além do monitoramento, em alguns pontos também foram implementadas medidas de controle e recuperação, como: isolamento da área, construção de estruturas de contenção (paliçada e rip-rap) e de sistema de drenagem e revegetação do local.

A análise da Tabela 10 indica que houve uma redução do grau de risco na maioria dos pontos monitorados, o que demonstra uma melhoria e estabilização dos processos erosivos na área estudada, que pode ser atribuída às medidas de controle implantadas. Entretanto, no ponto 4 foi observada uma evolução no desprendimento de solo em relação a 2009 e o grau de risco aumentou, embora a vegetação tenha crescido no interior do foco erosivo, como apresentado na Figura 19.



**Figura 19 - Evolução do desprendimento de solo observado no ponto 4, em 2009 (A) e em 2012 (B).**

No ponto 6, a evolução do processo erosivo se manteve estável ao longo do período monitorado e também é possível observar um aumento da vegetação no interior do foco erosivo (Figura 20).

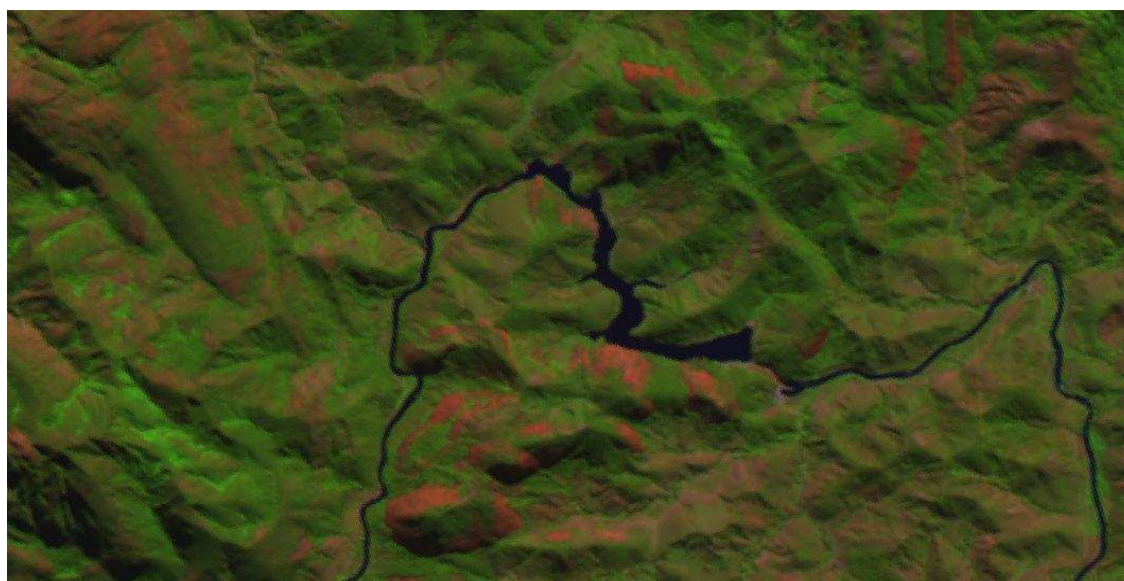


**Figura 20 - Evolução do desprendimento de solo observado no ponto 6, em 2009 (A) e em 2012 (B).**

A continuidade do Programa de Monitoramento e Controle dos Processos Erosivos é importante para assegurar que os processos em estabilização mantenham o quadro de melhorias alcançado, mesmo após o período chuvoso, contribuindo assim para o menor assoreamento do reservatório.

## **5.2. Determinação do limite do reservatório**

A determinação precisa do contorno do reservatório foi realizada através da interpretação da imagem de satélite IRS-P6 do sensor LISS-III com data de captura de 05/2012 e resolução de 24x24m, obtidas no Instituto de Pesquisa Espacial (INPE) (Figura 21).



**Figura 21 - Imagem de satélite empregada na determinação do contorno do reservatório (INPE, 2013).**

A partir dessa imagem de satélite foi possível gerar a máscara que foi utilizada como limite para o estudo do reservatório antes e depois de seu enchimento. A área obtida para o PCH de Cachoeirão foi igual a 731.609 m<sup>2</sup>.

### **5.3. Reservatório antes de seu enchimento**

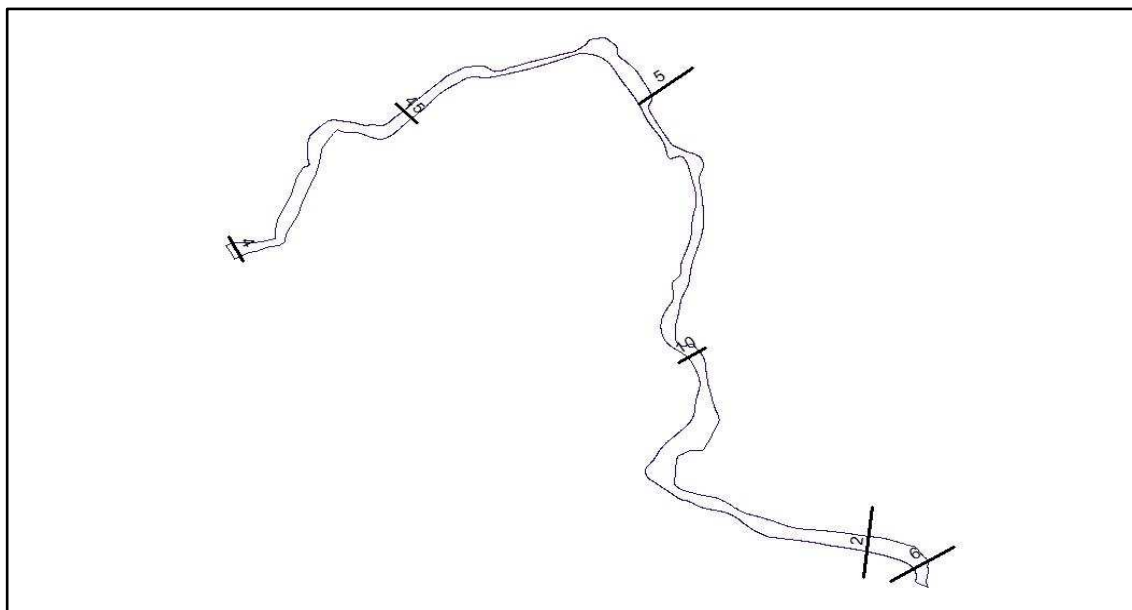
O mapeamento topográfico antes do enchimento do reservatório de Cachoeirão foi realizado em fevereiro de 1999 pela empresa de força e luz de Santa Maria S.A., que deu origem ao arquivo CAD das curvas de nível do projeto base do empreendimento. Neste mapeamento, também foram levantadas algumas seções batimétricas do rio Manhuaçu.

Para manipulação das curvas de nível, foi utilizado o *software* ArcMAP, do pacote ArcGIS 10.0. Optou-se por trabalhar com ArcGIS para posterior cruzamento de dados topográficos anteriores e posteriores ao enchimento do reservatório.

O arquivo do levantamento planialtimétrico foi convertido em um arquivo *shapefile* no ArcMAP e as feições curvas de nível e hidrografia foram separadas, sendo necessária a edição de ambas. Também foi possível extrair desse arquivo o contorno do rio e a localização das seções batimétricas levantadas, que foram transformados em *shapefile*.

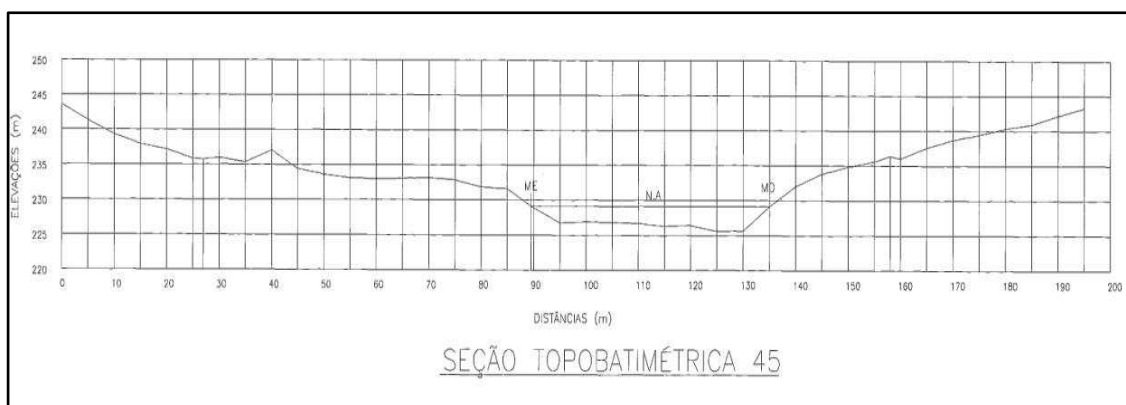
#### **5.3.1. Leito do rio Manhuaçu antes do enchimento do reservatório**

Para identificar o fundo do rio antes do enchimento do reservatório e gerar o MDE, foram utilizados dados de seções batimétricas levantadas pela CEMIG em 1999, antes da construção da barragem (Figura 22).



**Figura 22 - Disposição das seções batimétricas realizadas em 1999 no reservatório da PCH Cachoeirão.**

As seções batimétricas não estavam georreferenciadas (Figura 23), por isso foi necessário criar um arquivo de pontos e, com auxílio das linhas das seções batimétricas e do contorno do rio, inserir manualmente o valor de cada ponto, respeitando a distância entre eles e seus valores de cota (Tabela 11).

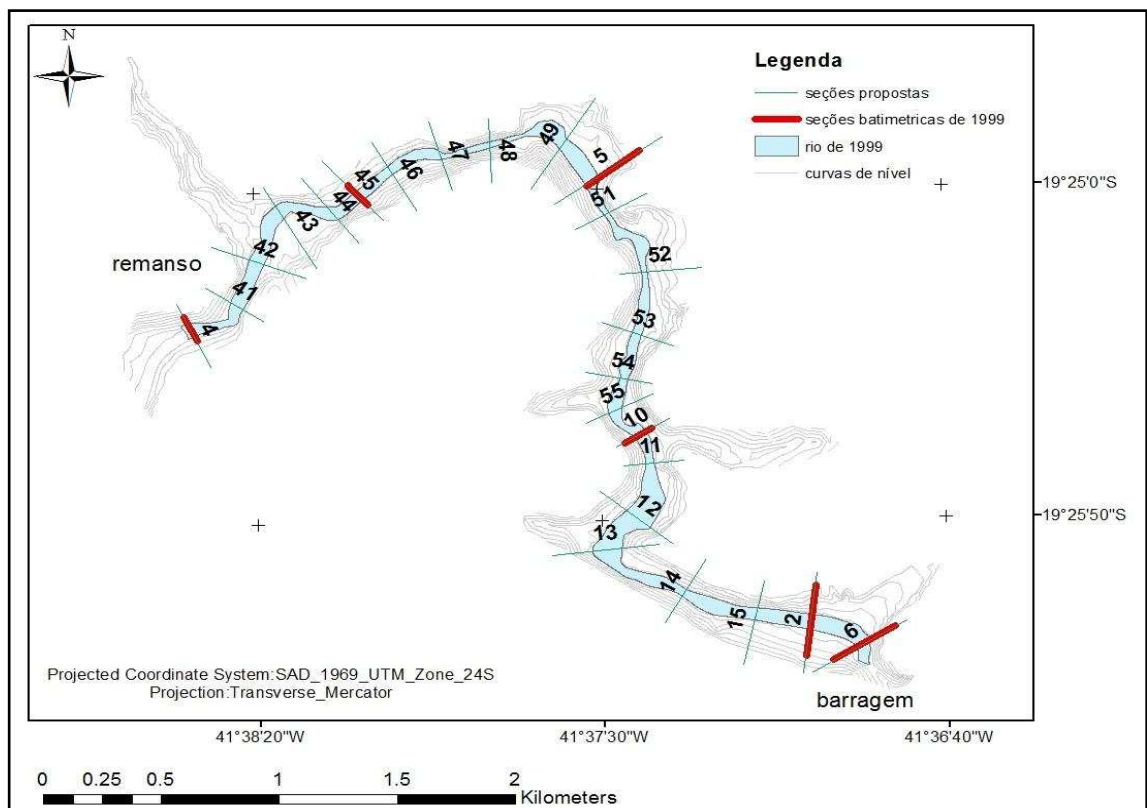


**Figura 23 - Seção batimétrica do rio Manhuaçu, levantada em 1999.**

**Tabela 11 - Seção batimétrica do rio Manhuaçu em 1999.**

SEÇÃO 45	
Elevação (m)	Distância (m)
229,0	89,5
227,0	95,0
227,0	100,0
227,0	105,0
226,5	110,0
226,5	115,0
226,5	120,0
225,5	125,0
225,5	130,0
229,0	135,0

Entretanto, conforme é possível observar na Figura 22, as seções batimétricas levantadas em 1999 são poucas e estão bastante espaçadas umas das outras. Para aumentar a precisão no cálculo do volume abaixo do nível d'água no curso do rio antes do enchimento do reservatório, fez-se necessário estimar a posição do leito do rio em diversas outras seções, ilustradas na Figura 24.

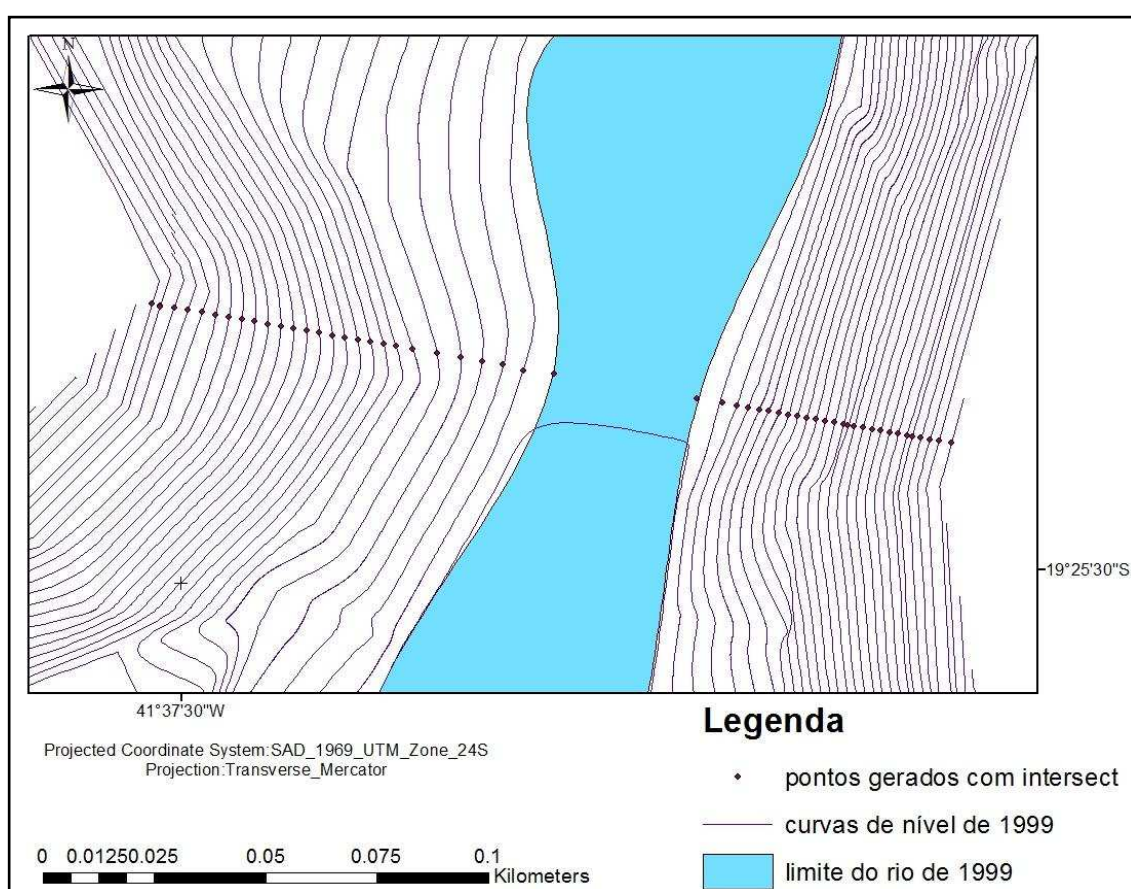


**Figura 24 - Seções batimétricas existentes e criadas a partir do levantamento planialtimétrico realizado em 1999 na PCH Cachoeirão.**

A metodologia usada para estimar o leito do rio em outras seções foi a seguinte.

Criaram-se novas seções entre as que foram medidas por batimetria (Figura 24). Com auxílio das curvas de nível do reservatório, foi possível criar perfis transversais em cada seção proposta (Figura 25). Para isso, foi necessário inserir manualmente os pontos correspondentes a cada curva de nível, respeitando a distância entre eles e valorando sua cota no ArcGIS.

Com o comando INTERSECT foi possível criar um novo arquivo de pontos com a intersecção das curvas de nível com o arquivo de linha das seções propostas.



**Figura 25 - Resultado da intersecção das curvas de nível e as seções propostas.**

O próximo passo foi separar os pontos por seção e identificar a distância entre eles. Para tanto, foi necessário criar um arquivo de ponto que sirva de ponto de referência, com uso do comando *NEAR* do ArcMAP. Para padronizar as

distâncias em cada seção, foi escolhido o ponto no extremo esquerdo de cada seção para ser ponto de referência.

Com o uso do arquivo de ponto de cada seção e o arquivo de ponto do *NEAR* foi utilizado o comando *POINT DISTANCE* e, como resultado, foi criada uma tabela para cada seção possuindo valores de distância em metros de cada ponto em relação ao ponto de referência.

Com auxílio do comando *JOIN* foi realizada a junção de duas tabelas, a tabela que foi gerada com o comando *POINT DISTANCE* e outra tabela referente à profundidade da seção proposta, sendo necessário utilizar o campo *FID* para ligá-las.

Por fim, montou-se uma tabela com todos os dados necessários para gerar o perfil transversal de cada seção proposta.

Os dados foram exportados como arquivos de texto e importadas com uso do *Software* de planilha eletrônica Microsoft Excel. Neste programa, foram gerados os gráficos do fundo do rio nas diversas seções criadas.

Com os pontos do levantamento topográfico definiam-se as encostas nas duas margens do rio, bem como o nível de água. Em seguida, geravam-se as linhas de tendência para cada margem e encontrava-se o ponto de interseção destas linhas no fundo do rio com auxílio da função *COMPLEX INTERSECTION*.

Para definir a profundidade de cada seção proposta, foi calculada a média das maiores profundidades das duas seções entre as quais a seção em estudo estava contida. Por exemplo, a seção 42 está entre as seções 4 e 45 medidas por batimetria no ano de 1999 em Cachoeirão (Figura 24). Sabendo que as maiores profundidades das seções 4 e 45, são de 2 e 2,5 m, respectivamente, então para todas as seções que estão entre elas (41 até 44) foi usado o valor de profundidade máxima igual a 2,25 m.

Esta profundidade máxima foi usada para definir a profundidade do ponto do fundo do rio acima do ponto de interseção e deste ponto até as margens, definiu-se o fundo com duas retas (Figuras 26 a 28).

### 5.3.2. Validação da metodologia proposta

Para validar a metodologia proposta, foram escolhidas três seções nas quais existiam resultados batimétricos. As seções escolhidas ficavam nos extremos (remanso e barragem) e no meio do reservatório.

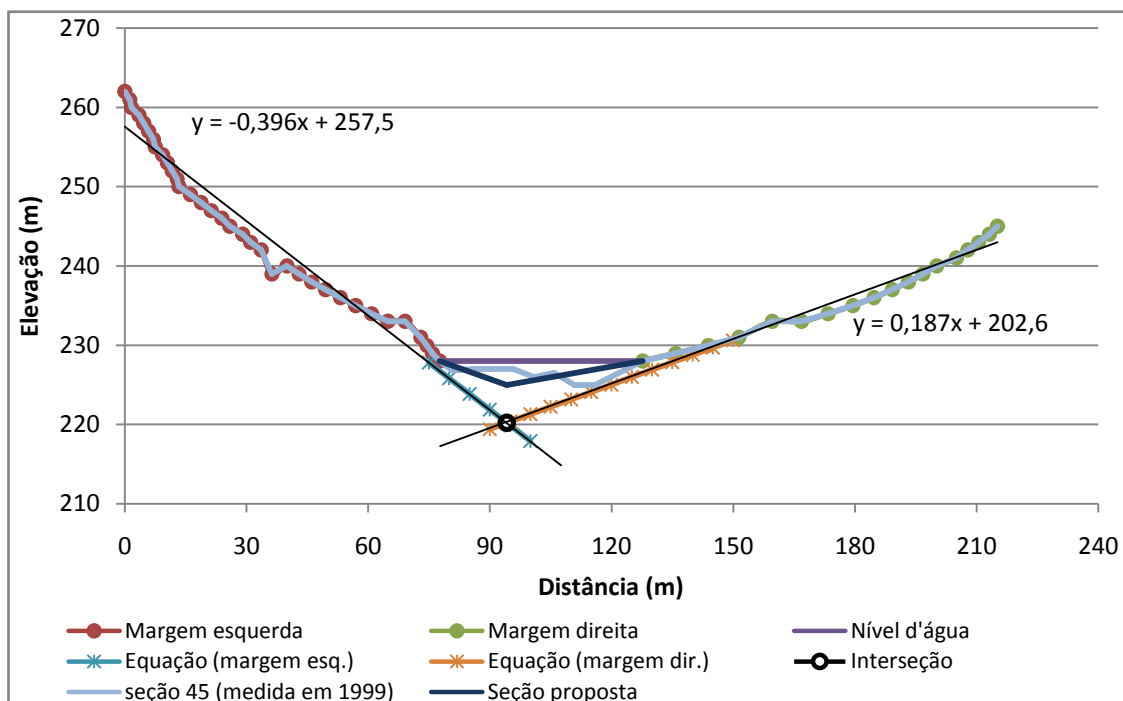


Figura 26 – Seção 45 (remanso) em 1999 e 2012 da PCH Cachoeirão

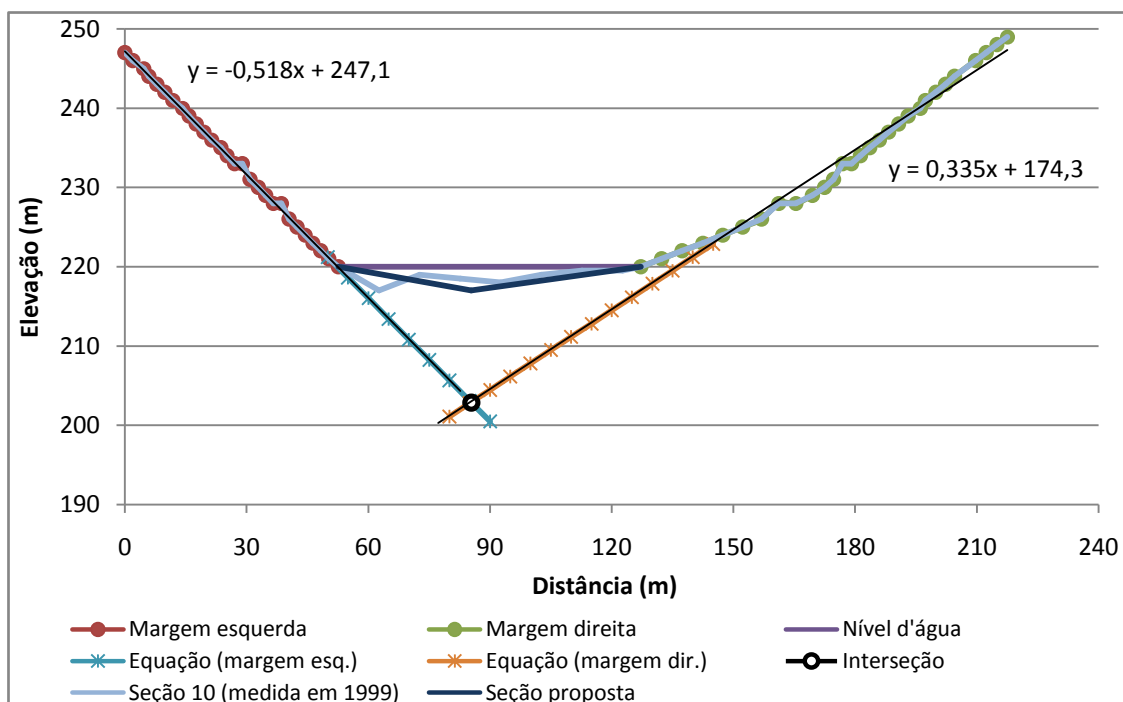
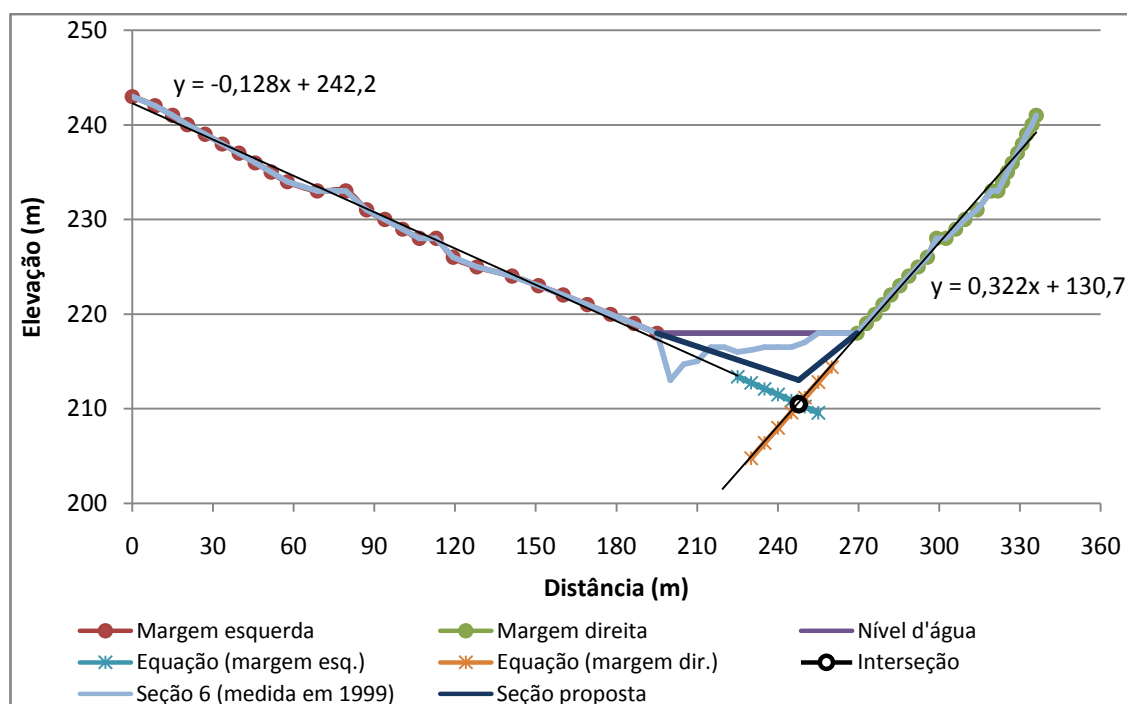


Figura 27 - Seção 10 (meio) em 1999 e 2012 da PCH Cachoeirão.



**Figura 28 - Seção 6 (barragem) em 1999 e 2012 d PCH de Cachoeirão.**

Nas seções 45 (remanso), 10 (meio) e 6 (barragem) da PCH de Cachoeirão registraram-se profundidades máximas iguais à 3, 2 e 5 m respectivamente.

Apresenta-se na Tabela 12 uma comparação entre os resultados obtidos por meio da metodologia proposta nesta dissertação e por meio das seções topobatimétricas levantadas pela CEMIG em 1999. Observa-se que a metodologia funcionou adequadamente, apresentando um erro médio de 5,38%, com um desvio padrão pequeno.

**Tabela 12 - Comparação dos resultados da área proposta e levantada em 1999.**

Seção	Área medida (m <sup>2</sup> )	Área proposta (m <sup>2</sup> )	Erro (%)
45	72,47	75,25	3,84
10	105,25	111,85	6,27
6	175,45	186,01	6,02

### 5.3.3. Obtenção do MDE do reservatório antes de seu enchimento (1999)

Com posse das curvas de nível editadas e cotadas (*hardline*), os pontos das batimetrias antes do enchimento dos rios (*masspoint*), os pontos das novas seções propostas (*masspoint*), os pontos cotados do contorno do rio antes do enchimento (*masspoint*), os arquivos das ilhas encontradas e cotadas (*hardline*), o limite da área de estudo (*softclip*) e usando a função TIN do *software* ArcMAP foi gerado o TIN antes do enchimento.

### 5.4. Levantamento ecobatimétrico

O levantamento ecobatimétrico do reservatório da PCH Cachoeirão foi realizado nos dias 23 e 24 de Maio de 2012, por equipes técnicas do Departamento de Engenharia Civil da UFV e do Departamento de Hidrometria da CEMIG, sob a supervisão de um técnico da SIGHT, empresa do segmento de Topografia, Geodésica, GIS, Batimetria, Posicionamento e Navegação.

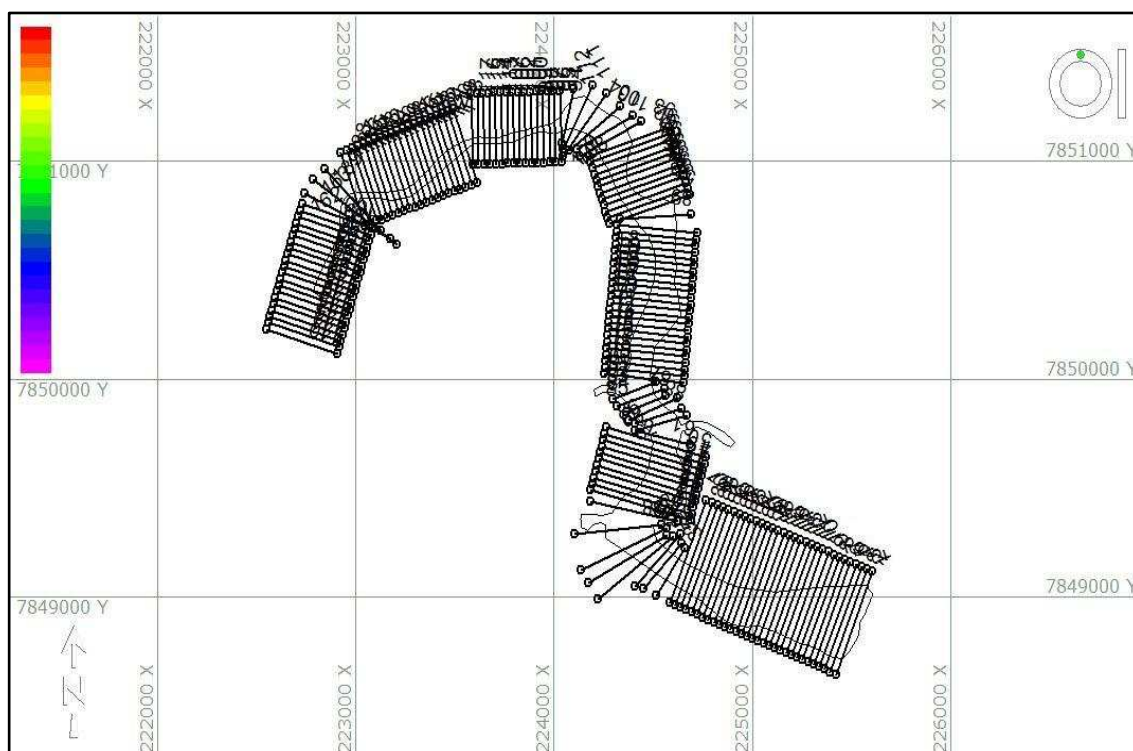
Para sua realização, foi utilizado um ecobatímetro modelo HY 1600, monofeixe operando na frequência de 200 khz, em conjunto com o DGPS (*Differential Global Positioning System*) Hemisphere R131 (com assinatura Omnistar) ambos conectados em um computador, que utilizava o *software* HYPACK para a obtenção, sincronização e processamento dos dados (Figura 29).



Figura 29 - Esquema do arranjo dos equipamentos utilizados no levantamento batimétrico. A) DGPS e B) ecobatímetro monofeixe.

Os dados de profundidade foram coletados pelo ecobatímetro e os valores de latitude e longitude, pelo DGPS. Como o levantamento de dados pelo ecobatímetro se baseia na velocidade de transmissão do som na água, foi necessário realizar a calibração do equipamento antes de iniciar a batimetria. Neste trabalho, utilizou-se a técnica *Bar Test*, que consiste em inserir no corpo d'água um anteparo a uma profundidade conhecida e verificar a profundidade medida pelo ecobatímetro, ajustando a velocidade do som até que não haja discrepância entre os valores.

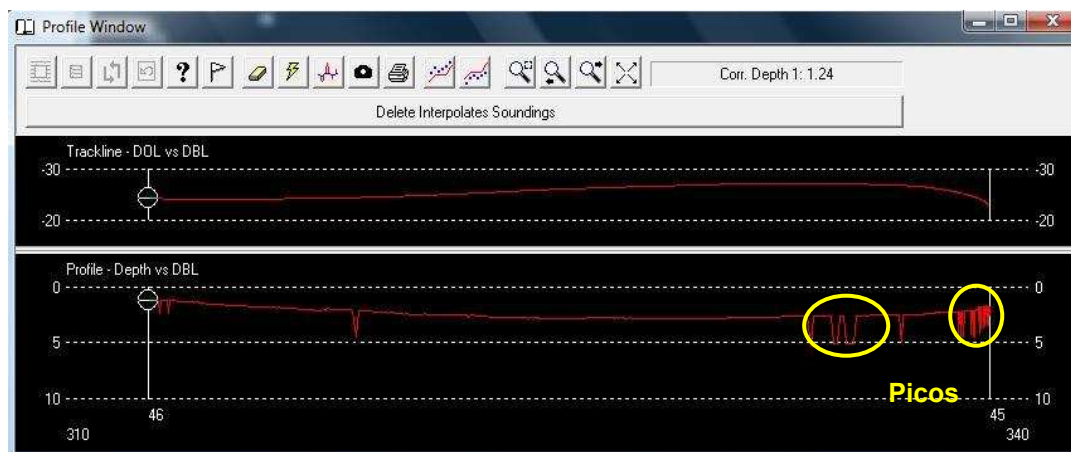
A batimetria foi realizada ao longo de 5,3 km no sentido longitudinal do reservatório, do eixo da barragem até o remanso, coletando-se também dados nos braços secundários. O contorno do reservatório foi obtido através da interpretação da imagem de satélite *Landsat 7*. Para orientar a navegação, foram traçadas seções transversais paralelas, perpendiculares ao eixo longitudinal do reservatório, espaçadas de aproximadamente 30 m (Figura 30).



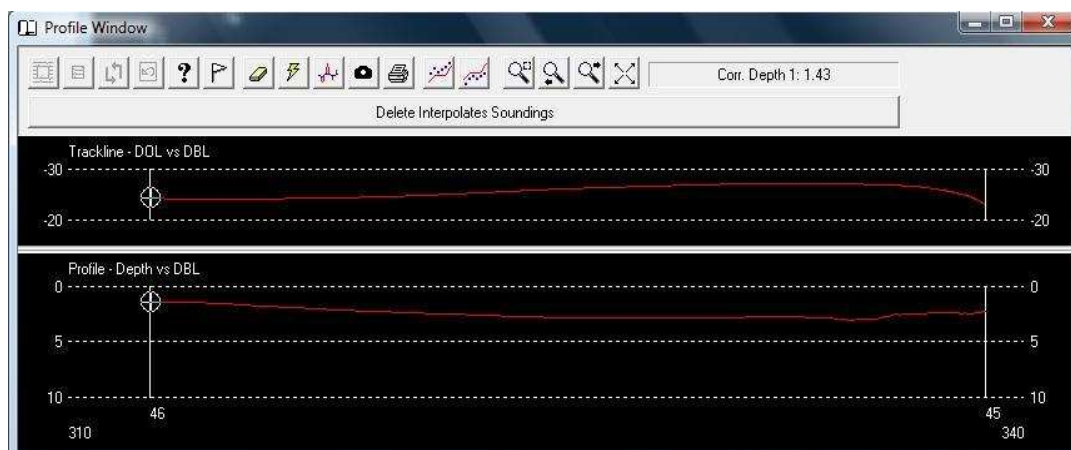
**Figura 30 - Planejamento das seções batimétricas do reservatório da PCH Cachoeirão.**

Os dados brutos das coordenadas geográficas e das profundidades adquiridos pelo DGPS e ecobatímetro, respectivamente, são coletados pelo *software* Hypack em arquivos específicos. Cada arquivo é analisado detalhadamente

para a verificação de pontos discrepantes ou fora da tendência esperada de valores. Uma das principais causas de ocorrência desses pontos é a presença de galhos e troncos no fundo do reservatório. Ao observar alguma imperfeição, é realizada a suavização das curvas no Hypack, através do emprego de filtros e da ferramenta *Smooth* (Figuras 31 e 32).



**Figura 31 - Ocorrência de picos nas seções levantadas pelo ecobatímetro.**



**Figura 32 - Suavização das seções após tratamento dos dados no Hypack.**

Durante o processamento dos dados, a profundidade foi transformada em altitude através da subtração de seu valor das medidas de cotas registradas na régua limnimétrica situada próximo ao eixo da barragem (Tabela 13). Para cada um dos dias da campanha de campo, foi gerado um arquivo de maré para realizar esse ajuste da batimetria à variação do nível da água durante as medições.

**Tabela 13 – Nível d'água no reservatório durante a realização da batimetria.**

<b>Hora</b>	<b>Nível Montante</b>	
	<b>23/05/12</b>	<b>24/05/12</b>
<b>9:00</b>	231.81	231.7
<b>10:00</b>	231.82	231.7
<b>11:00</b>	231.83	231.71
<b>12:00</b>	231.84	231.71
<b>13:00</b>	231.85	231.71
<b>14:00</b>	231.84	231.72
<b>15:00</b>	231.83	231.72
<b>16:00</b>	231.82	231.72
<b>17:00</b>	231.79	231.73

Pode-se observar que a variação do nível d'água no reservatório é pequena ao longo do dia, mas é significativa (cerca de 10 cm) de um dia para o outro. Por se tratar de uma análise da diferença geométrica, essa variação deve ser considerada, a fim de se evitar erros na determinação do volume de sedimentos depositados.

Os dados obtidos no formato XYZ no Hypack continham informações sobre as coordenadas geográficas (latitude e longitude) e a profundidade de todos os pontos coletados pela batimetria. Esses dados foram exportados para o *software* Microsoft Excel, e posteriormente para o *software* ArcGIS 10.0, para a determinação do MDE do reservatório, conforme apresentado no subtópico 5.4.1.

#### **5.4.1. Obtenção do MDE a partir dos dados da batimetria (2012)**

O *software* Microsoft Excel foi empregado na realização da conversão dos valores de profundidade dos pontos coletados em valores de cota, por meio da subtração de cada profundidade da altura de cota correspondente, registrada na régua limnimétrica situada próximo ao eixo da barragem.

O novo arquivo XYZ, gerado pelo Excel, foi importado no *software* ArcMAP e, com auxílio da ferramenta *create TIN*, foi criado um TIN da batimetria,

utilizando os pontos levantados como *masspoint* e a borda (contorno) como *softclip*. Segundo Matos (2012), esse procedimento é mais eficaz que outros métodos de interpolação, pois utiliza todos os pontos coletados em campo.

### **5.5. Determinação das curvas cota x área x volume do reservatório**

Um dos preceitos estabelecidos na Resolução Conjunta ANA/ANEEL n° 03, de 10 de agosto de 2010, abordado mais especificamente no artigo 8°, é a obrigatoriedade de avaliação do processo de assoreamento dos reservatórios, com base na atualização das curvas Cota x Área x Volume (CAV).

Neste trabalho, as curvas CAV, anterior e posterior ao enchimento do reservatório, foram obtidas por meio do *software* ArcMAP, utilizando a extensão 3D Analyst e a função Volume Surface.

Com auxílio da linguagem de programação PYTHON foi gerado um *script* para automatizar essa etapa (em Anexo – item 8.1). Para elaboração desse código em linguagem PYTHON foi utilizado o manual do *software* ArcMAP.

Os resultados gerados pela ferramenta Volume Surface do ArcMAP (em Anexo – itens 8.2 e 8.3) foram exportados para o *software* Microsoft Excel, no qual foram elaboradas as curvas CAV do reservatório para os anos de 1999 e 2012.

Embora existisse a curva CAV de projeto do reservatório, elaborada em 1999, não foi possível utilizá-la neste trabalho. Por isso, uma nova curva CAV teve que ser gerada, a partir do MDE do reservatório anterior a seu enchimento elaborado neste estudo (ver item 4.3.3).

A partir da comparação das curvas CAV anterior e posterior ao enchimento do reservatório, foi possível estimar o volume de sedimentos depositado e a sua vida útil.

## 5.6. Coleta e caracterização dos sedimentos de fundo

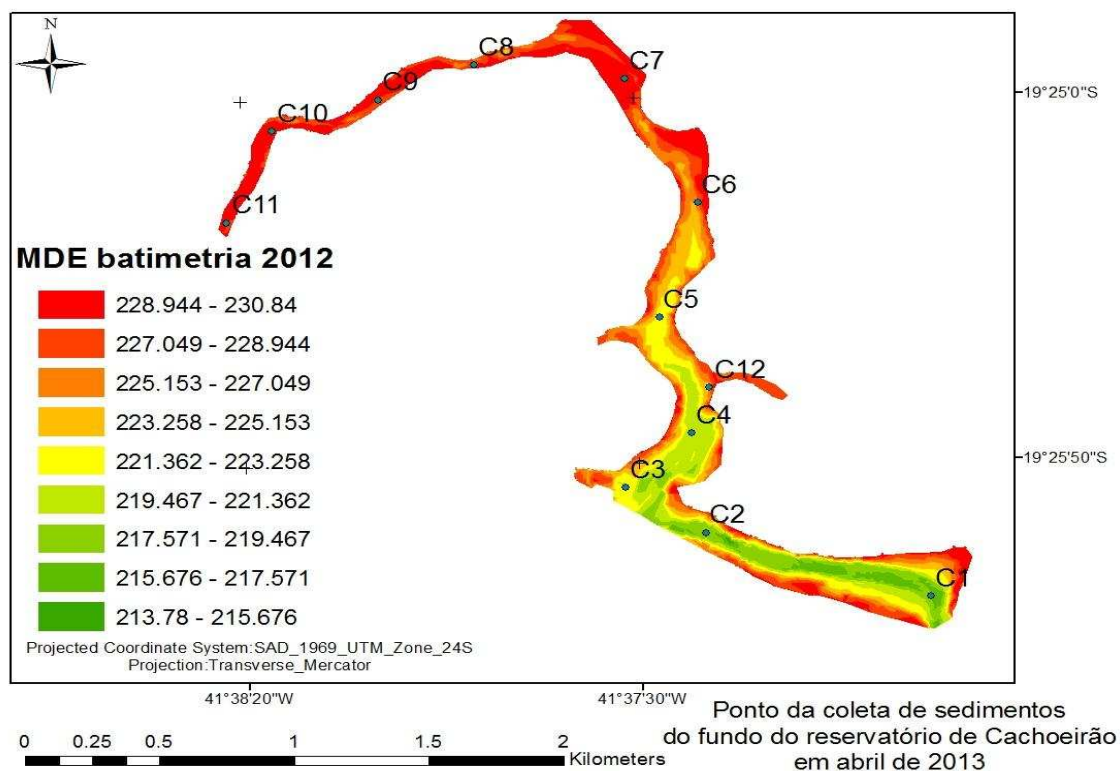
Segundo Vanoni (1977 *apud* Carvalho, 2008), a amostragem de sedimentos depositados no fundo do reservatório é necessária para caracterização granulométrica e determinação do peso específico dos sedimentos. Os materiais e métodos empregados na obtenção dessas amostras dependem da profundidade e espessura dos depósitos, além da granulometria e do grau de consolidação dos sedimentos.

A coleta de amostras foi realizada no dia 04 de Abril de 2013 por uma equipe do Departamento de Engenharia Civil da UFV, utilizando uma draga de Petersen confeccionada em aço 304, com capacidade de coleta de sedimentos igual a 3 kg e alcance máximo de profundidade igual a 25 m (Figura 33).



**Figura 33 - Coleta de Sedimentos utilizando a draga de Petersen.**

Foram coletadas 12 amostras de sedimento, ao longo de toda a extensão do reservatório, conforme apresentado na Figura 34. Durante o levantamento, procurou-se coletar amostras em pontos aproximadamente equidistantes e também próximos às entradas dos braços do reservatório (Pontos C5, C12 e C3).



**Figura 34 - Pontos de coleta de sedimentos realizada na PCH Cachoeirão.**

A análise das amostras coletadas foi realizada no Laboratório de Mecânica de Resíduos da UFV durante os meses de Abril e Maio de 2013. As amostras coletadas secaram a sombra, em temperatura ambiente por cerca de 10 dias, e foram posteriormente destorroadas utilizando almofariz de porcelana e pistilo de madeira com ponta de borracha. O material desagregado foi peneirado em peneira #10 ( $\Phi = 2\text{mm}$ ).

Foram realizadas análises para determinação da massa específica dos grãos, segundo metodologia definida na norma NBR 6508/1984 da ABNT, utilizando picnômetros calibrados.

A distribuição granulométrica dos sedimentos foi obtida segundo metodologia definida na norma NBR 7181/1984 da ABNT, por sedimentação e peneiramento.

## 5.7. *Software* SEDIMENT e DPOSIT

Parte dos dados de entrada do *software* SEDIMENT foram extraídos do Estudo Hidrossedimentométrico do Projeto Básico da PCH Cachoeirão, elaborado em 1999, devido à inexistência de dados mais atuais que pudessem ser utilizados e à impossibilidade de coleta dos mesmos em campo.

Os dados hidrossedimentológicos do Projeto Básico foram obtidos por meio de três medições de descarga sólida, realizadas pela Empresa Força e Luz Santa Maria. A partir desses dados, estimou-se uma descarga sólida média anual afluente de aproximadamente 80.000 ton/ano. O valor da descarga líquida média anual afluente ao reservatório, igual a 44,98 m<sup>3</sup>/s também foi extraída do projeto básico.

Para a determinação da granulometria dos sedimentos afluentes, considerou-se que esta corresponde à granulometria dos sedimentos acumulados no fundo do reservatório. Por isso, foram utilizados como dado de entrada no *software* Sediment os dados de uma amostra representativa do sedimento de fundo do reservatório, coletada em Abril de 2013. A análise dessa amostra indicou a seguinte distribuição granulométrica: 23% argila, 21% silte e 56% areia. Os resultados da análise da distribuição granulométrica e da massa específica das demais amostras coletadas são apresentados no item 5.1.

Embora o método utilizado no cálculo da eficiência de retenção do reservatório no Projeto Básico tenha sido a curva média de Brune (considerando uma eficiência de retenção de 25%), optou-se por empregar a curva de Churchill que, de acordo com a literatura especializada, é a mais adequada para estimar a eficiência de retenção de pequenos reservatórios, como é o caso da PCH Cachoeirão.

Os dados obtidos no projeto básico, a granulometria da amostra representativa, o volume do reservatório no N.A. máximo normal igual a 6,37 hm<sup>3</sup>, a taxa de aumento do transporte sólido estimada em 1% (valor adotado) e o comprimento do reservatório igual a 5,3 km (determinado na batimetria), foram inseridos no *software* SEDIMENT (Figura 35). Também foi inserido o tipo de operação do reservatório, determinado de acordo com a tabela disponibilizada pelo *software* (Tabela 14).

**Tabela 14 - Tipo de operação do reservatório (Software SEDIMENT - Adaptado de: Design of Small Dams, U.S. Bureau of Reclamation).**

Tipo	Operação do reservatório
1	Sedimento sempre ou quase sempre submerso
2	Depleção do reservatório de pequena a média
3	Reservatório com consideráveis variações de nível
4	Reservatórios normalmente vazios

The screenshot shows the SEDIMENT software interface with the following data entered:

- IDENTIFICAÇÃO DO ESTUDO:**
  - Estudo: PCH Cachoeirão Churchill
  - Registro: 6
- GRANULOMETRIA DO SEDIMENTO AFLUENTE:**
  - Argila (%): 23
  - Silte (%): 21
  - Areia (%): 56
- CARACTERÍSTICAS GERAIS:**
  - Tipo de operação do reservatório: 1
  - Volume do reservatório no N.A. máximo normal (hm³): 6.37
  - Volume assoreado para t= 0 anos (hm³): 0
  - Descarga líquida média anual afluente (m³/s): 44.98
  - Descarga sólida média anual afluente (t/ano): 80000
  - Taxa de aumento do transporte sólido (%/ano): 1.00
- OPÇÕES DE CÁLCULO:**
  - Utilizar a curva de Brune no cálculo da Er do reservatório:
  - Utilizar a curva de Churchill no cálculo da Er do reservatório:
  - Inserir Er inicial e posteriormente utilizar a curva de Brune:
  - Inserir Er inicial e posteriormente utilizar a curva de Churchill:
  - Considerar o sedimento vindo de um reservatório de montante:
- Opção: Curva de Churchill:**
  - Comprimento do reservatório deste estudo (m): 5300

**Figura 35 - Entrada de dados no software SEDIMENT.**

Os resultados gerados foram armazenados em um arquivo, posteriormente utilizado no *software* DPOSIT (Figura 36), juntamente com a curva cota x área x volume anterior ao enchimento do reservatório, para a determinação da distribuição dos sedimentos ao longo do reservatório. A determinação do tipo de reservatório foi determinada pelo *software*, a partir das características físicas do reservatório.

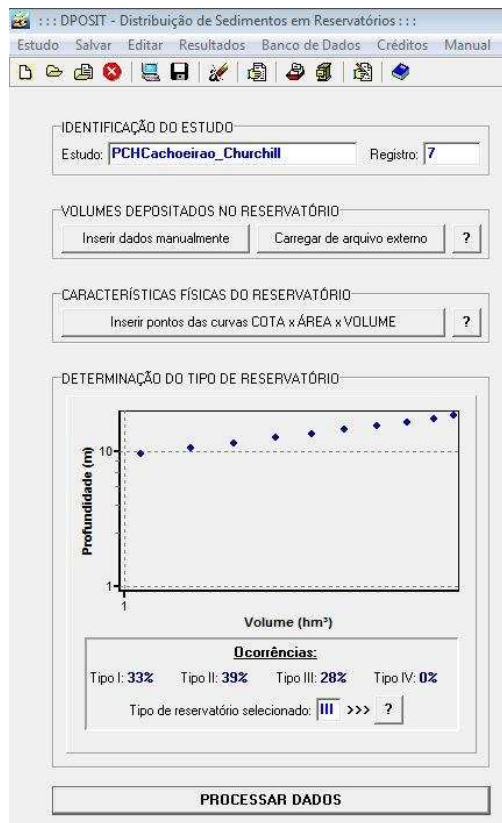


Figura 36 - Layout do software DPOSIT.

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1. MDEs gerados a partir de dados anteriores (1999) e posteriores (2012) ao enchimento do reservatório**

O MDE obtido a partir do levantamento planialtimétrico do entorno do reservatório de Cachoeirão e de algumas seções batimétricas do rio Manhuaçu realizados em 1999, é apresentado na Figura 37. O MDE produzido a partir do levantamento batimétrico realizado em 2012 é ilustrado na Figura 38.

Observa-se na Figura 38 que os sedimentos próximos à barragem onde se encontra a tomada d'água do reservatório estão, aproximadamente, entre as cotas 213.8 e 217.6 em 2012. Como não se sabe exatamente a posição da tomada d'água, não se pode determinar precisamente a cota dos sedimentos nesse local. Entretanto, sabe-se que a tomada d'água está situada na cota 218 m e, por isso pode-se concluir que os sedimentos estão se aproximando bastante dessa altura, comprometendo a vida útil do empreendimento.

A vida útil da PCH Cachoeirão foi estimada em 50 anos no Projeto Básico (CEMIG, 1998). Considerando que o reservatório está em operação há 13 anos, espera-se que ainda restem 37 anos de operação. No entanto, se os sedimentos continuarem a subir no reservatório com a mesma taxa e distribuição, possivelmente atingirão a cota da tomada d'água antes deste tempo previsto em projeto.

Entretanto, é importante ressaltar que não se pode ser conclusivo acerca da vida útil do reservatório, uma vez que não se conhece com precisão a posição da tomada d'água no levantamento topográfico em 1999.

Um novo levantamento batimétrico, que deverá ser feito no próximo ano ainda no âmbito deste projeto, bem como a determinação precisa da posição da tomada d'água e a previsão que será feita pelo programa SIMSED (LAQUINI, 2009), o que permitirá tirar maiores informações a respeito da vida útil do reservatório.

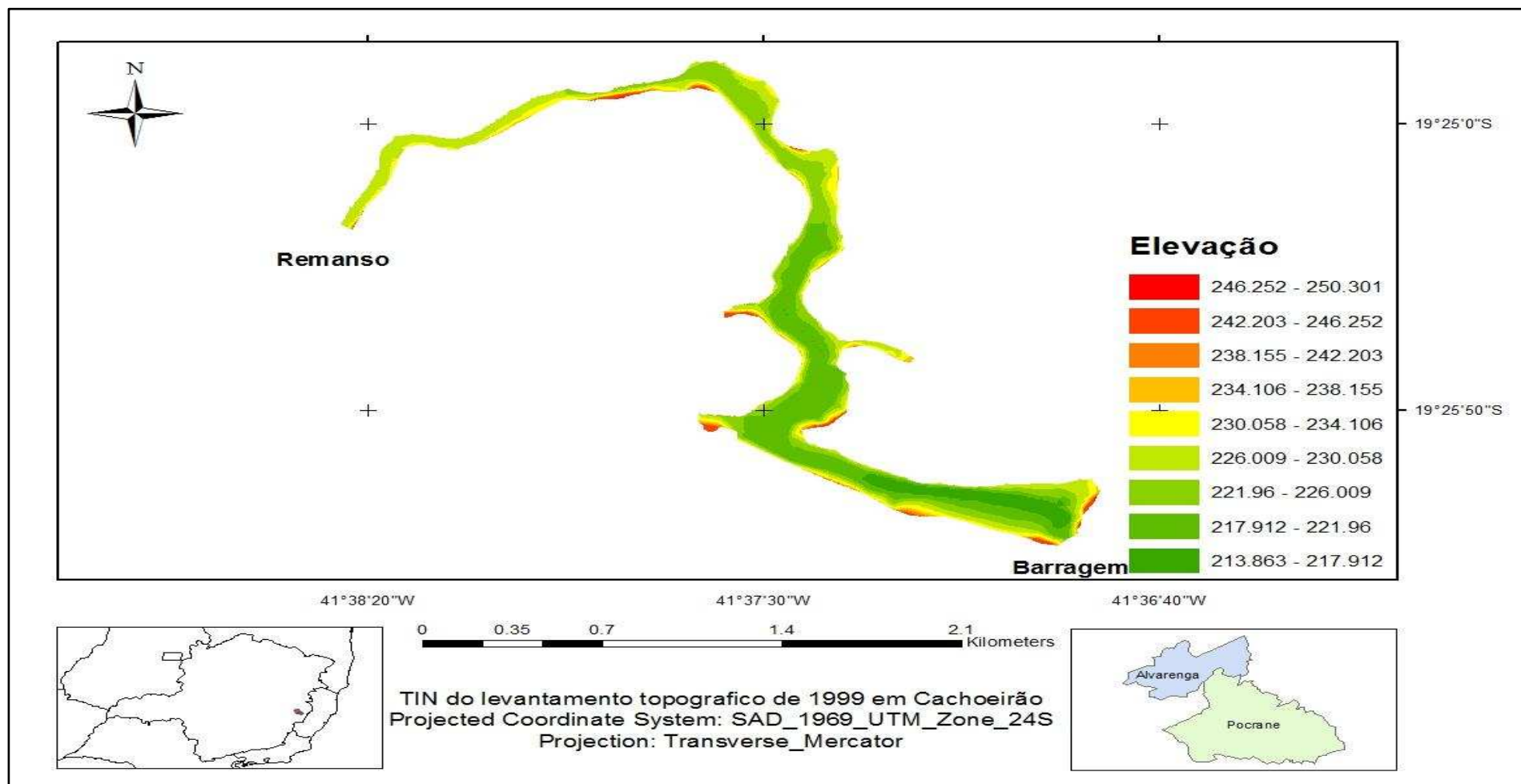


Figura 37 - TIN gerado a partir dos dados planialtimétricos e das seções batimétricas levantadas em 1999.

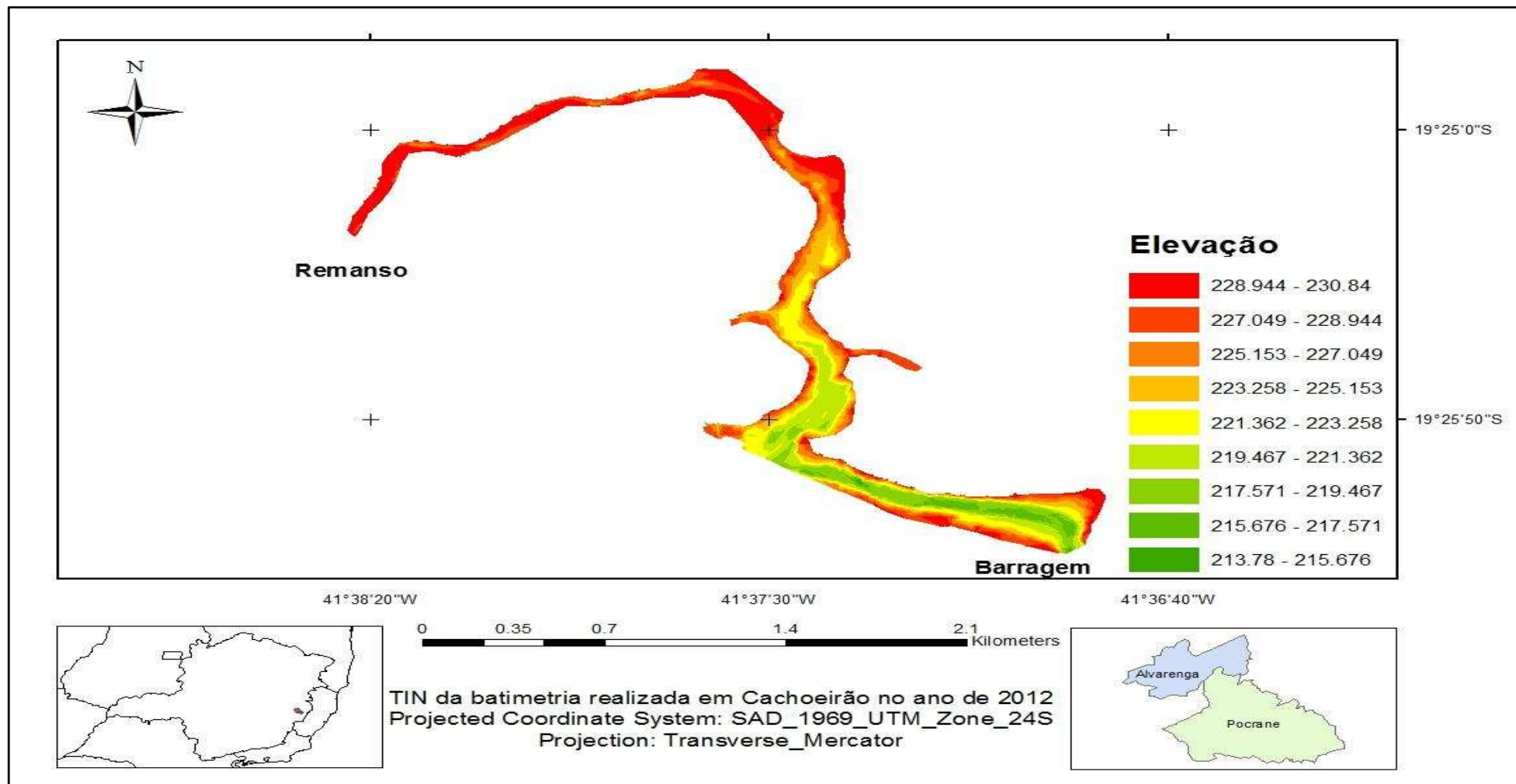


Figura 38 - TIN gerado a partir da batimetria realizada em 2012.

## 6.2. Determinação das curvas cota x área x volume (CAV)

Os valores de cota, área e volume gerados pelo ArcGIS (ver tabelas 1 e 2 em Anexo) foram exportadas para o Microsoft Excel. Utilizando esse *software*, foram elaboradas as curvas CAV anterior e posterior ao enchimento do reservatório, que estão apresentadas nas Figuras 39 e 40.

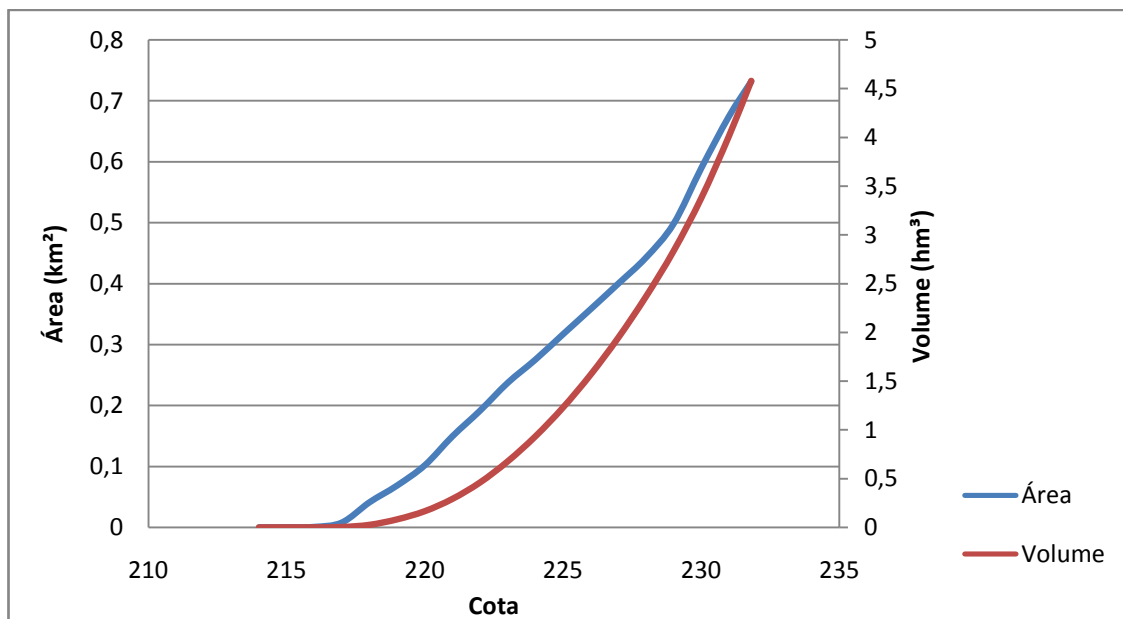


Figura 39 - Curva CAV da PCH Cachoeirão, obtida através do TIN gerado com dados de 2012.

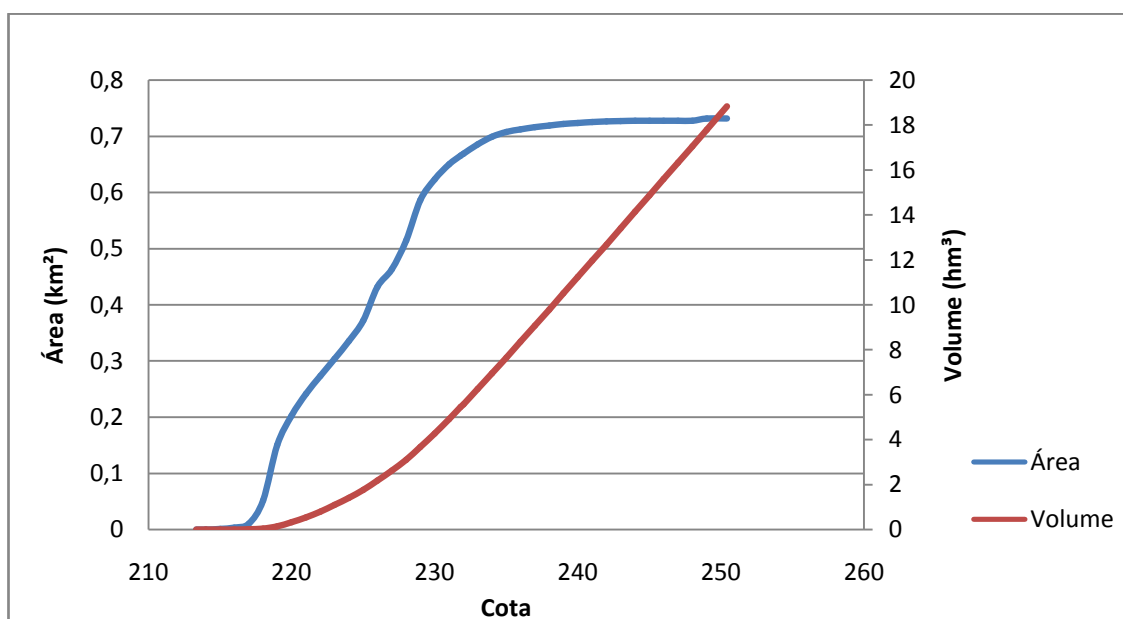


Figura 40 - Curva CAV da PCH Cachoeirão, obtida a partir do TIN gerado com dados de 1999.

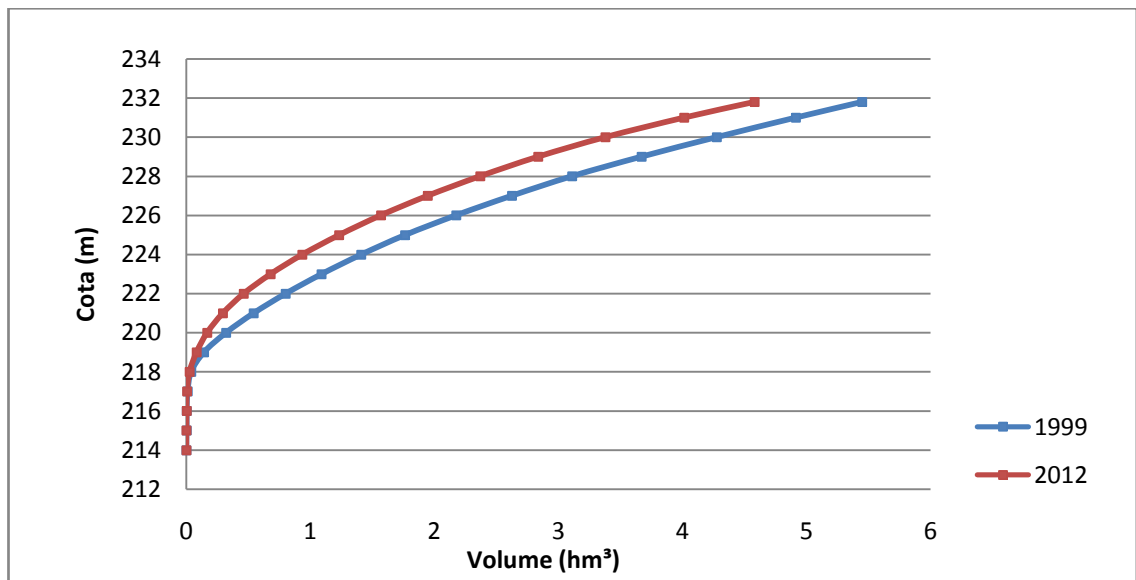
A análise da deposição de sedimentos no reservatório da PCH Cachoeirão foi realizada com base na comparação das curvas CAV de 1999 e 2012. Foram comparados as áreas e volumes do reservatório em 1999 e 2012, para um mesmo valor de cota. Utilizou-se como valor de referência o nível da lâmina d'água do reservatório durante a realização da batimetria, que corresponde à cota 231,81m. Na Tabela 15 são apresentados os valores de área e volume extraídos das curvas CAV de 1999 e 2012.

**Tabela 15 - Informações extraídas das curvas CAV.**

<b>Curva CAV 2012</b>			
	<b>Cota(m)</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (hm<sup>3</sup>)</b>
<b>Nível d'água na régua (em 2012)</b>	231,81	0,7316	4,5802
<b>Curva CAV 1999</b>			
	<b>Cota</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (hm<sup>3</sup>)</b>
<b>Nível d'água na régua (2012)</b>	231,81	0,6657	5,4464
<b>Cota máxima gerada pelo TIN de 1999</b>	250,43	0,7316	18,8318

É possível observar na Tabela 15 que a área do reservatório, igual a 0.7316 km<sup>2</sup>, é a mesma para os valores de cota máxima das curvas CAV 2012 e CAV 1999, uma vez que a mesma máscara foi utilizada como limite na geração dos TINs.

A comparação entre a capacidade de armazenamento do reservatório em 1999 e 2012 é apresentada na Figura 41. A análise das curvas indica a redução no volume total do reservatório, decorrente do processo de assoreamento.



**Figura 41 - Comparação dos volumes totais do reservatório em 1999 e 2012.**

Para o cálculo da taxa média de perda da capacidade de armazenamento do reservatório, considerou-se os volumes totais gerados na cota 231,81m para 1999 e 2012, e a seguinte relação:

$$TA = \frac{(V_{99} - V_{12})}{V_{99}} \times 100$$

Onde:

TA = taxa média de perda da capacidade de armazenamento do reservatório (%)

$V_{99}$  = Volume total armazenado na cota 231,81m ( $\text{hm}^3$ ), obtido em 1999

$V_{12}$  = Volume total armazenado na cota 231,81m ( $\text{hm}^3$ ), obtido em 2012.

Utilizando os dados da Tabela 16 e considerando que o reservatório está em operação há 13 anos, determinou-se uma redução de 15,9% na capacidade de armazenamento original do reservatório, o que representa uma perda anual de 1,23% de volume.

O valor de perda de volume encontrado é superior ao valor estimado por Mahmood (1987) em um dos estudos mais relevantes sobre o assoreamento de reservatórios no mundo.

Ao realizar um estudo no Brasil em 1994, o Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS encontrou uma perda de capacidade de armazenamento

de 0,5% ao ano para os reservatórios do país (CARVALHO, 2008). Entretanto, em grande parte dos trabalhos publicados na literatura especializada a perda encontrada foi superior a este valor. Na Tabela estão apresentados alguns valores da taxa média anual de perda de capacidade de reservatórios brasileiros.

**Tabela 16 - Perda de capacidade de armazenamento de reservatórios brasileiros.**

Reservatório	Autor do estudo	Taxa média anual (%)
Vacacaí – Mirim (RS)	Paiva <i>et al.</i> (1998)	0,9
Vacacaí – Mirim (RS)	Dill (2002)	1,71
Funil (RJ)	Vilhena <i>et al.</i> (2003)	0,88
Três Irmãos (SP)	Albertin <i>et al.</i> (2009)	0,40
Cachoeira Dourada (GO/MG)	Cabral <i>et al.</i> (2009)	0,68

Em geral, os valores de perda de capacidade de armazenamento estimados para outros reservatórios brasileiros encontrados na literatura foram inferiores ao determinado para o reservatório da PCH Cachoeirão.

### **6.3. Caracterização dos sedimentos de fundo**

As amostras do sedimento de fundo coletadas no reservatório da PCH Cachoeirão foram analisadas no Laboratório de Mecânica de Resíduos da UFV para a determinação da distribuição granulométrica e da massa específica dos grãos. Os resultados dessas análises estão apresentados na Tabela 17 e as curvas granulométricas encontram-se no item 9.4 em Anexos.

**Tabela 17 - Resultados das amostras de sedimentos analisadas.**

Amostras	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Distribuição Granulométrica (%)		
		Argila	Silte	Areia
<b>C1</b>	2,639	67	26	7
<b>C2</b>	2,648	62	31	6
<b>C3</b>	2,637	56	32	12
<b>C4</b>	2,682	54	36	10
<b>C5</b>	2,687	52	38	10
<b>C6</b>	2,682	10	20	70
<b>C7</b>	2,874	0	0	100
<b>C8</b>	2,687	0	0	100
<b>C9</b>	2,710	0	0	100
<b>C10</b>	2,692	0	0	100
<b>C11</b>	2,983	0	0	100
<b>C12</b>	2,664	48	37	15

À medida que os sedimentos foram coletados, foi possível observar uma variação gradativa em sua granulometria ao longo do reservatório, conforme pode ser observado na Tabela 17. As amostras coletadas em locais mais próximos ao remanso, região de maior ocorrência de formação de depósitos, foram constituídas por partículas cem por cento na fração areia (amostras C7 a C11). A amostra C10 foi coletada na entrada de um tributário, situado à margem esquerda do lago, que também é responsável pelo aporte de sedimentos ao reservatório. Durante a realização da coleta de sedimentos foi observada a formação de um banco de areia próximo ao local de coleta dessa amostra (Figura 42).

As amostras coletadas mais próximas ao eixo da barragem apresentaram granulometria mais fina, com predominância de sedimentos na fração argila (amostras C1 a C3).



**Figura 42 - Formação de banco de areia na parte final do reservatório.**

Um dos dados de entrada do *Software Sediment* é a granulometria dos sedimentos afluentes ao reservatório. Para a determinação desse parâmetro, considerou-se sua correspondência à granulometria dos sedimentos acumulados no fundo do reservatório.

Para estimar a granulometria dos sedimentos de fundo considerou-se uma mistura de 20g de material destorroado e peneirado, proveniente de cada uma das 12 amostras coletadas (amostra representativa). A mistura foi colocada em um recipiente plástico onde foi criteriosamente homogeneizada. O material foi, então, analisado para a determinação de sua granulometria e de massa específica das partículas. A Figura 43 apresenta a curva granulométrica da amostra representativa, cujos teores de argila, silte e areia, de 23%, 21% e 56%, respectivamente, foram utilizados como dados de entrada no *Software Sediment*.

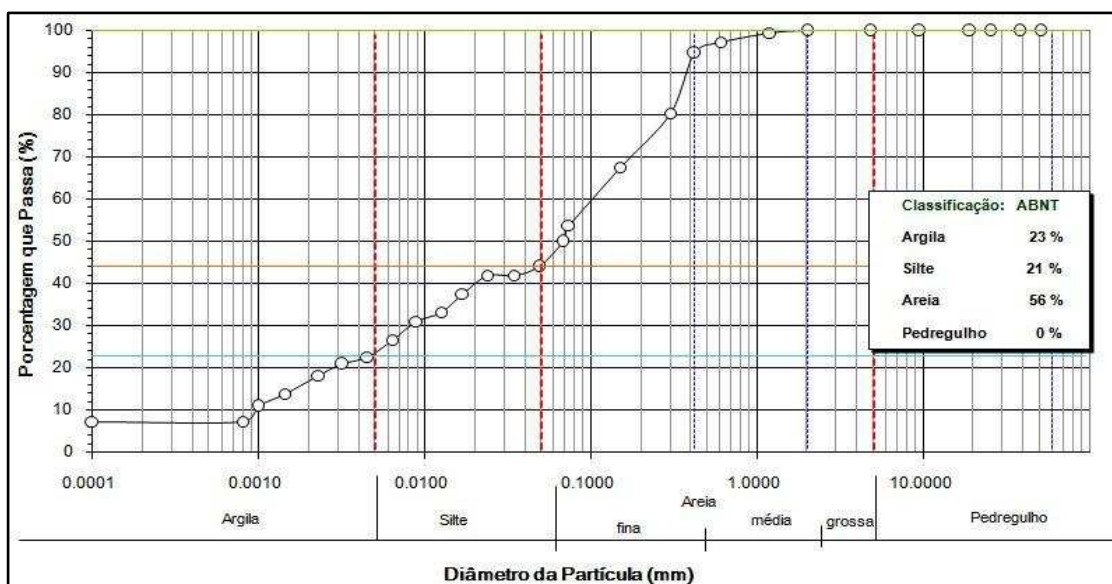


Figura 43 - Curva granulométrica da amostra representativa do sedimento de fundo do reservatório.

#### 6.4. Determinação do assoreamento e da distribuição de sedimentos no reservatório utilizando os softwares SEDIMENT e DPOSIT

Os resultados da análise do assoreamento do reservatório, considerando um período de operação de treze anos, estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados gerados pelo software Sediment.

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm <sup>3</sup> )	Vsól. Efluente (hm <sup>3</sup> )	Er (%)	Gama ap. (t/m <sup>3</sup> )	Qsól. Afluente (t/ano)x10 <sup>3</sup>	Qsól. Efluente (t/ano) x 10 <sup>3</sup>	Vsdepos./Vtotal reserv.
1	0,04	0,054	59,953	1,201	80,8	32,36	0,006
2	0,08	0,08	59,829	1,22	81,61	32,78	0,013
3	0,119	0,107	59,705	1,231	82,42	33,21	0,019
4	0,158	0,134	59,58	1,239	83,25	33,65	0,025
5	0,198	0,161	59,454	1,246	84,08	34,09	0,031
6	0,237	0,188	59,325	1,251	84,92	34,54	0,037
7	0,276	0,215	59,196	1,256	85,77	35	0,043
8	0,316	0,243	59,064	1,26	86,63	35,46	0,05
9	0,356	0,271	58,93	1,264	87,49	35,93	0,056
10	0,396	0,3	58,795	1,267	88,37	36,41	0,062
11	0,436	0,329	58,657	1,27	89,25	36,9	0,069
12	0,477	0,358	58,517	1,273	90,15	37,39	0,075
13	0,518	0,387	58,375	1,275	91,05	37,9	0,081

Verifica-se que após 13 anos houve um acúmulo de sedimentos no reservatório igual a  $0,518 \text{ hm}^3$ , menor que o valor de  $0,866 \text{ hm}^3$  determinado a partir dos dados de campo. Comparando esse valor ao volume máximo de operação do reservatório ( $6,37 \text{ hm}^3$ ), determinou-se uma relação entre o volume de sólidos depositado e o volume total do reservatório igual a  $0,081$  para o Sediment, e de  $0,139$  para o batimetria realizada em 2012.

Os resultados gerados pelo Sediment foram importados no *software* Dposit para a determinação da distribuição de sedimentos no reservatório e da nova curva CAV da PCH Cachoeirão. Na Figura 44 é apresentada a comparação das curvas CAV do reservatório em 1999 e em 2012. Os dados das curvas encontram-se no Anexo.

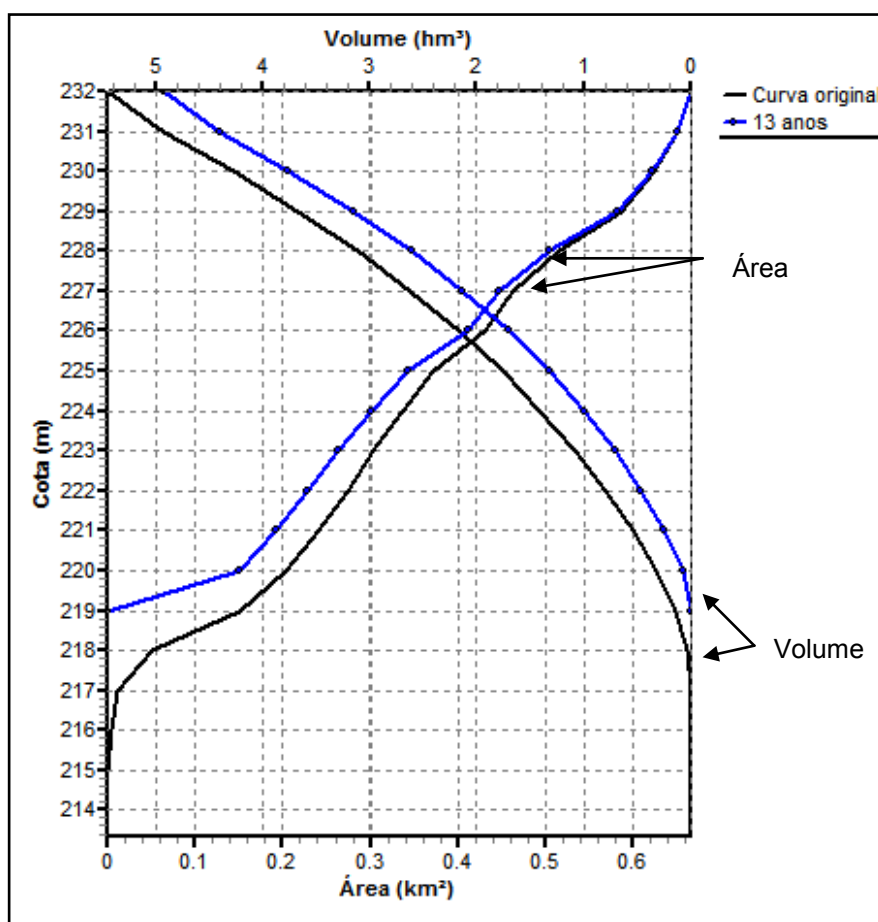


Figura 44- Curva CAV gerada pelo *Software* Dposit.

## 6.5. Comparação entre os resultados obtidos em campo e pelo modelo empírico

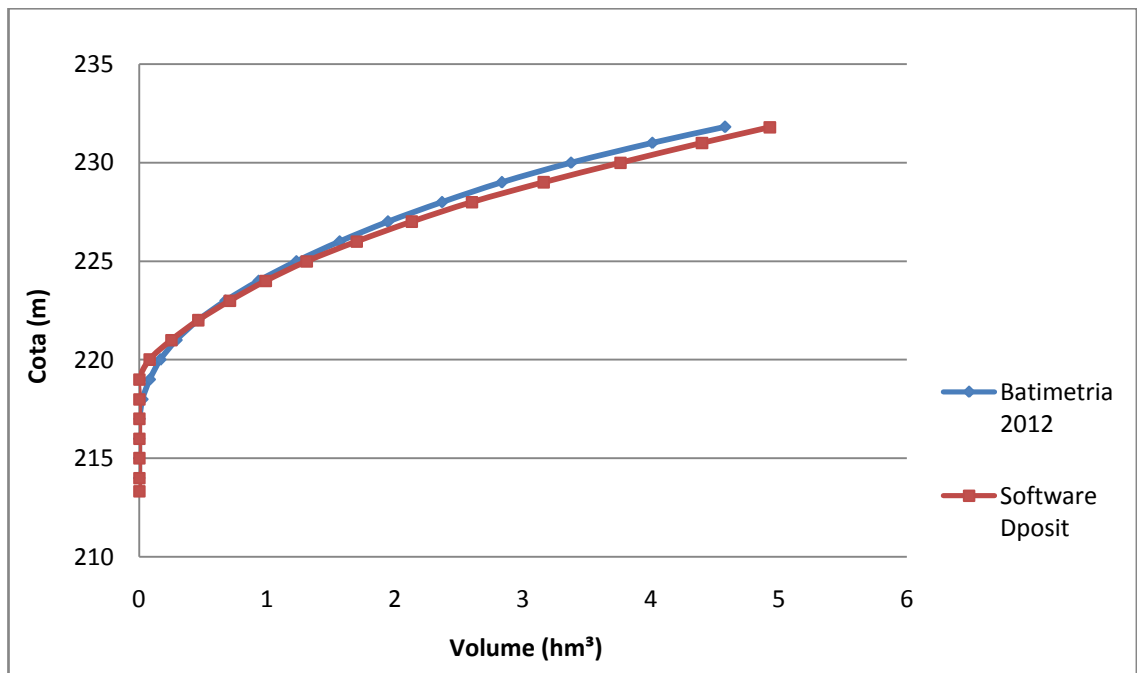
Na Tabela 19 são apresentados resumidamente os resultados de área e volume obtidos pelo levantamento batimétrico realizado em 2012 e pelo modelo empírico de Borland & Miller, utilizando os *softwares* Sediment e Dposit, para a cota de 231,8m. Esse valor de cota corresponde à altura da lâmina d'água na qual o reservatório estava operando durante a realização da batimetria em 2012 e foi adotado como sendo a cota máxima, para a estimativa do volume total do reservatório.

**Tabela 19 - Valores de área e volume para a cota 231,8m, gerados a partir da batimetria e do Software Dposit.**

Dados	Cota (m)	Área Original (km <sup>2</sup> )	Volume Original (hm <sup>3</sup> )	Área Final (km <sup>2</sup> )	Volume Final (hm <sup>3</sup> )
Software Dposit	231.8	0.67	5.45	0.67	4.93
Batimetria 2012	231.8	0.67	5.45	0.73	4.58

A análise comparativa dos resultados indicou que houve coerência entre os volumes do reservatório obtidos pelos dois métodos, sendo o valor apresentado pelo *software* Dposit cerca de 7,64% maior que o gerado a partir dos dados da batimetria.

A semelhança entre os volumes obtidos pelos dados de campo e o modelo empírico não se restringe ao volume total do reservatório. Conforme é possível observar na Figura 45, a comparação entre as curvas Cota x Volume do reservatório, indicam que as curvas de ambos os métodos apresentam comportamento muito semelhante, embora os volumes difiram para valores de cota mais elevados (230 m).



**Figura 45 - Curvas Cota x Volume geradas pela batimetria e pelo software Dposit.**

A diferença observada nos valores de área é decorrente da utilização da curva CAV de 1999 como dado de entrada no *software* Dposit. A área do reservatório, igual a 0,7316 km<sup>2</sup>, é a mesma para os valores de cota máxima das curvas CAV 2012 e CAV 1999, uma vez que a mesma máscara, extraída da imagem de satélite IRS-P6 foi utilizada.

Na determinação dos TINs de 1999 e 2012 também foi utilizada a mesma máscara, extraída da imagem de satélite IRS-P6, para definir o limite do reservatório. Como os arquivos empregados na geração dos TINs eram diferentes, em 1999 utilizou-se o levantamento planialtimétrico e em 2012 o levantamento batimétrico, o valor da área máxima, igual a 0,7316 km<sup>2</sup>, correspondeu a volumes e cotas distintos. Para a comparação dos MDEs de 1999 e 2012, para o cálculo do volume total, adotou-se então como cota máxima do reservatório o valor de 231,8m, que corresponde ao valor de área de 0,6657 km<sup>2</sup> na CAV de 1999 e de 0,7316 km<sup>2</sup> na CAV de 2012.

A diferença observada nos resultados dos métodos pode ser atribuída a diversos fatores inerentes aos métodos, que podem ter ocasionado erros durante a sua execução.

A imprecisão de alguns dados de entrada do *software* Sediment pode ter provocado erros no cálculo final do assoreamento e da distribuição de

sedimentos no reservatório. Os seguintes parâmetros podem ter influenciado o resultado: a granulometria dos sedimentos afluentes, que não foi realmente aferida em campo, apenas estimada a partir de uma amostra representativa dos sedimentos depositados; as descargas sólida e líquida utilizadas foram determinadas durante a elaboração do projeto básico da PCH Cachoeirão em 1999 e podem, por isso, não representar fielmente as condições observadas atualmente; a taxa de aumento do transporte sólido foi adotada como sendo igual a 1%, porém esse valor pode ter sido mais elevado, ocasionando um maior aporte de sedimentos ao reservatório e conseqüentemente, maior assoreamento do mesmo.

Com relação aos resultados do levantamento em campo, os principais fatores que podem ter influenciado e possivelmente reduzido a precisão dos resultados obtidos são: a diferença de escala e método na geração das cartas de 1999 (levantamento topográfico – 1:10.000) e 2012 (levantamento batimétricos - 1:3.000) e os erros de aproximação gerados pelo método de interpolação – TIN. A criação de seções batimétricas a partir da carta planialtimétrica de 1999 para a geração do TIN e do MDE não é um método altamente preciso, portanto pode ter contribuído também para possíveis erros na determinação da curva CAV de 1999. Porém, esse método foi utilizado apenas para estimar o volume do rio Manhuaçu antes do enchimento do lago, que não é muito expressivo, se comparado ao volume total do reservatório.

## 7. CONCLUSÃO

O presente trabalho objetivou analisar o processo de assoreamento na PCH Cachoeirão e atualizar os seus dados operacionais. Foram elaborados MDEs com uso da função TIN, utilizando curvas de nível do entorno do lago da PCH, incluindo dados do leito do rio antes da formação do reservatório e, também, os dados do levantamento batimétrico realizado pela equipe do projeto em 2012.

Foi utilizado para o trabalho o *software* Arc GIS 10.0, com utilização da linguagem de programação PHYTON, para automatizar a geração das curvas CAV, procedimento que se mostrou eficaz e promissor.

Estabeleceu-se uma metodologia aproximada para estimar a topografia do fundo dos rios antes do enchimento. Comparações com algumas seções do leito dos rios, para as quais se tinha dados de levantamentos batimétricos, mostraram que os resultados da metodologia proposta geraram erros em média da ordem de 5,6%.

Por meio da comparação das curvas CAV de 1999 e 2012, foi possível estimar um volume de sedimento depositado no reservatório de 0,866 hm<sup>3</sup>, ao longo de 13 anos de operação.

A coleta e análise dos sedimentos de fundo indicaram grande variação na distribuição granulométrica das partículas ao longo do reservatório. Essa variação está relacionada ao diâmetro e peso específico das partículas, e à capacidade de transporte da água. As amostras que foram coletadas próximas ao remanso apresentaram partículas somente na fração areia em sua constituição. Por sua vez, os sedimentos acumulados em locais mais próximos ao eixo da barragem apresentaram granulometria mais fina, constituídas majoritariamente por argilas que, devido ao menor peso específico de suas partículas, são transportados por maiores distâncias.

O volume de sedimentos depositado no reservatório estimado pelo método de Borland & Miller, através do *software* Sediment, foi igual a 0,518 hm<sup>3</sup>. Este resultado indica que houve uma subestimativa do volume de sedimentos calculado pelo método empírico em relação ao obtido no levantamento batimétrico. Essa diferença pode ter sido decorrente de uma possível

imprecisão dos dados de entrada do *software* e/ou das considerações feitas pelo modelo.

Em função das cotas de sedimentos depositados próximo à tomada d'água, estimou-se que a vida útil do reservatório será menor do que a prevista em projeto. Esta conclusão ainda terá que ser confirmada por meio de uma informação mais precisa da posição da tomada d'água, de novo levantamento batimétrico que ainda será realizado dentro do escopo deste projeto e, principalmente, pela previsão que será feita com o programa SIMSED (LAQUINI, 2009). No entanto, aconselha-se que medidas preventivas que reduzam a quantidade de sedimentos que adentram os reservatórios sejam tomadas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2002). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**.

Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf) Último acesso em: 25 de Novembro de 2012.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2008). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Disponível em:

[http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1689](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689) Último acesso em: 25 de Novembro de 2012.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2012). Banco de Informações de Geração (BIG). Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>

Último acesso em: 30 de Novembro de 2012.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2000). **Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios**. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. Brasília, DF. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/GuiaAsso.pdf>.

Último acesso em: 02 de Março de 2013.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2011). **Orientações para atualização das curvas Cota x Área x Volume**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica (SGH). Brasília – DF. Disponível em:

<http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaAtualizacaoDasCurvasCotaxAreaxVolume.pdf> Último acesso em: 10 de Maio de 2013.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução nº 396, de 04 de Dezembro de 1998. Estabelece as condições para implantação, manutenção e operação de estações fluviométricas e pluviométricas associadas a empreendimentos hidrelétricos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, seção 1, v. 136, n.234-E, p. 47, 07 Dez 1998.

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

(PCH). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, seção 1, v. 140, n.241, p. 149, 09 Dez 2003.

ANEEL/ANA. Resolução Conjunta nº 03, de 10 de Agosto de 2010. Estabelece as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, seção 1, v. 147, n.201, p. 124, 20 Out 2010.

ALBERTIN, L. L.; MATOS, A. J. S; MAUAD, F. F. **Cálculo do volume e análise da deposição de sedimentos no reservatório de Três irmãos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v 15. n. 4. 2010.

AUGUSTO FILHO, O. **Escorregamentos em encostas naturais e ocupadas: análise e controle**. São Paulo: IPT. p. 96-115. Apostila do curso de geologia de engenharia aplicada a problemas ambientais. 1992.

BORLAND, W.M., and C.R. MILLER. **Distribution of Sediment in Large Reservoirs**. Transactions of the ASCE, vol. 125, pp. 166-180. 1960.

BRUNE, G.M. **Trap Efficiency of Reservoirs**. Transactions of American Geophysical Union, vol. 30, n. 2 p. 407-418. 1953.

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

CABRAL, J. B. P. **Estudo do Processo de Assoreamento em Reservatórios**. Caminhos da Geografia, v. 14. p. 62-69. 2009.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., LIMA, M.C. & MORTARI, D. **Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas**. 7º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABGE, Goiânia, GO, 2001.

CAMAPUM de CARVALHO, J.C., *et al.* **Processos Erosivos no Centro Oeste Brasileiro**. Brasília: Editora FINATEC, 464 p. 2006.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 599p. 2008.

CBH-DOCE– Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. **Plano Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão DO6 – PARH Manhuaçu**. 2010. Disponível em:

[http://www.riodoce.cbh.gov.br/docs/planobacia/PARH/PARH\\_Manhuacu.pdf](http://www.riodoce.cbh.gov.br/docs/planobacia/PARH/PARH_Manhuacu.pdf)

Último acesso em: 10 de Fevereiro de 2013.

CEMIG – Companhia Elétrica de Minas Gerais. **Projeto de Instalação de Estações Hidrométricas em Atendimento à Resolução Conjunta 03/2010**. Belo Horizonte, MG. 2012. Não Publicado.

CEMIG – Companhia Elétrica de Minas Gerais. **Projeto Básico da PCH Cachoeirão – Relatório Final**. Belo Horizonte, MG. 1998. Não Publicado.

CHURCHILL, M.A. **Discussion of Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data**, by L.C. Gottschalk, Proceedings, Federal Interagency Sedimentation Conference. Denver, Colorado, pp. 139-1 40. 1948

COELHO, A. L. N. **Bacia hidrográfica do rio Doce (MG/ES): uma análise socioambiental integrada**. In: Geografares [online]. n. 07, p. 131-146. 2009.

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 454/2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, Seção 1, pág. 66, 08 NOV 2012.

CONSITA. **Estudo de Impacto Ambiental da Usina Hidrelétrica Cachoeirão**. 1998. Não Publicado.

CUPPOLILLO, F.; ABREU, M. L.; VIANELLO, R.L. **Climatologia da bacia do rio Doce e sua relação com a topografia local**. P. 45-60. In: Geografias. Belo Horizonte, MG, 2008.

DILL, P. R. J. **Assoreamento do reservatório do Vacacaí-Mirim e sua relação com a deterioração da bacia hidrográfica contribuinte**. 2002. 125p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2002.

ELETROBRÁS - Centrais Hidrelétricas Brasileiras S. A.. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília, DF, p. 458. 2000.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. 2ª Ed. Rio de Janeiro, 412 p. 2009.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Semiárido (Petrolina, PE). **Semiárido: Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação**. 402 p. 2010.

FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial. **Estudo do Assoreamento do Reservatório Formado pela Barragem da UHE Três Irmãos**. Relatório P & D. Convênio FIPAI/CESP. São Carlos, SP. 197p. 2009.

GARCIA, G. E. **Implementação do modelo numérico para avaliação do transporte de sedimentos no reservatório de Itaipu – PR**. 2008. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008.

INFANTI, J. N.; FORNASARI, F. N. **Processo de Dinâmica Superficial**. In: Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, p. 131-152. 1998.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geoestatística. (2011). **Banco de Dados: Cidades**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1> Último acesso em 20 de Março de 2013.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de Cultura Económica. México. 479p. 1948.

LAQUINI, J.P. **Modelagem determinístico-estocástica da dinâmica de sedimentos em reservatórios de água e de rejeitos de mineração**. 2009.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

LIMA, T. C. B; UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N.L.; NUNES, E.F. **Equipamento microprocessado para geração de sinal de correção diferencial, em tempo real, para GPS**. Engenharia Agrícola. Jaboticabal, SP: vol. 26 nº02. p 537-545. 2006.

LIMIAR AMBIENTAL. **Projeto de monitoramento da ocorrência de focos erosivos no entorno da PCH Cachoeirão**. Belo Horizonte, MG, 2012. Não Publicado.

MAHMOOD, K. **Reservoir Sedimentation: Impact, extent and mitigation**. World Bank Technical Paper. n 71. Washington, DC. 118p. 1987.

MAIA, A. G. **As conseqüências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens**. 2006. 273p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.

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

MENDES, A. B. **Manual do usuários dos softwares Sediment e Dposit**. 2006.

MIRANDA, R. B. **A influência do assoreamento na geração de energia elétrica: estudo de caso na usina hidrelétrica de Três Irmãos – SP**. 2011. 132p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

Morris, G. L.; Fan, J. **Reservoir Sedimentation Handbook**. McGraw-Hill Book Co., New York. 1998.

MULLER, A. C. **Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Makron Books. São Paulo, SP, 412p. 1995.

PAIVA, E. M. C.D.; PAIVA, J. B. D.; REINERT, D. J. **Estimativa do assoreamento do reservatório do DNOS, em Santa Maria – RS**. In: XVII Congresso Nacional Del Água, II Simpósio de Recursos Hídricos Del Conosur, Santa Fé – Argentina, 1998.

PORTAL BRASIL (a). Domínio eletrônico do Governo Brasileiro. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica> Último acesso em: 20 de Novembro de 2012.

PORTAL BRASIL (b). Domínio eletrônico do Governo Brasileiro. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/setor-eletrico/hidroeletricidade> Último acesso em: 25 de Novembro de 2012.

RANDLE, J.T.; YANG, C.T.;DARAIO,J. Erosion and Sedimentation Manual. In: **Erosion and Reservoir Sedimentation**. Denver, CO, Bureau of Reclamation. Capítulo 2, p. 2.1 – 2.86.

RIBEIRO, L. F. M. **Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeito**. 2000. 252p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000.

SILVA, J. M.R. *et al.* **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, folha SE 23- . Belo Horizonte**: DNPM/DGM, Brasília, DF, 1987.

STRAND, R. I. **Design of small dams: sedimentation – Appendix H**. Bureau of Reclamation. Washington, DC. 1974.

SUGUIO, K; BIGARELLA, J. J. **Ambientes Fluviais**. 2ª Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 183p. 1990.

VAN RIJN, L.C. **Sedimentation of sand and mud in reservoirs in rivers**. Disponível em:

<http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Reservoirsiltation2013.pdf>

Último acesso em: 05 de Agosto de 2013

VANONI, V.A. **Sedimentation Engineering**. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY. 743p. 1977

VICENT, J.G. **Improvement of the reservoir capacity and of the operatio of the dewatering components**. In: Conferencia de Jesùs Garnell Vicent. 2003.

VILHENA, R. M.; ROIG, H. L.; MENESES, P.R. **Determinação do Assoreamento de Reservatório Utilizando Técnicas de Geoprocessamento, o Caso do Reservatório de Funil (RJ)**. In: Anais SBSR, Belo Horizonte – MG, p. 2649- 2651.2003.

WILSON, G. L.; RICHARDS, J. M. **Procedural Documentation and Accuracy Assessment of Bathymetric Maps and Area/Capacity Tables for Small Reservoirs**. Scientific Investigations Report 2006–5208. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 24 p., 2006.

YON, N. **The state and perspective of the direct sediment removal methos from reservoirs**. International Journal of Sediment Research. Beijing, vol. 7, n.2, p. 99-166. 1992.

## 9. ANEXOS

### 9.1 Código do script desenvolvido na linguagem PYTHON

```
import ArcGISsripting
import re

min =#inserir a menor cota
max =#inserir a maior cota
min_rast = math.ceil(min) #PRA CIMA
max_rast = math.floor(max) #PRA BAIXO
min_teste = math.floor(min) #PRA BAIXO
step_size = 1
num_steps = max_rast-min_rast
workspace = r' #inserir local fisico do arquivo#
raster_file = ' #inserir local fisico do arquivo#

gp = ArcGISsripting.create()
gp.CheckOutExtension ('3D')
gp.workspace = workspace

print('cota, area, volume')

gp.SurfaceVolume_3d(raster_file, ", "BELOW", min_teste)
result = gp.GetMessages()
volume = float(re.findall(r'Volume= *([\d\.]+)', result)[0])
area = float(re.findall(r'2D Area= *([\d\.]+)', result)[0])
print(str(min_teste)+' '+str(area)+' '+str(volume))

gp.SurfaceVolume_3d(raster_file, ", "BELOW", min)
result = gp.GetMessages()
volume = float(re.findall(r'Volume= *([\d\.]+)', result)[0])
area = float(re.findall(r'2D Area= *([\d\.]+)', result)[0])
print(str(min)+' '+str(area)+' '+str(volume))

for step in range(num_steps):
    height = float(step*step_size)
    elev = min_rast + height
    gp.SurfaceVolume_3d(raster_file, ", 'BELOW', elev)
    result = gp.GetMessages()
    volume = float(re.findall(r'Volume= *([\d\.]+)', result)[0])
    area = float(re.findall(r'2D Area= *([\d\.]+)', result)[0])
    print(', '.join([repr(x) for x in [elev, area, volume]]))

gp.SurfaceVolume_3d(raster_file, ", "BELOW", max)
result = gp.GetMessages()
volume = float(re.findall(r'Volume= *([\d\.]+)', result)[0])
area = float(re.findall(r'2D Area= *([\d\.]+)', result)[0])
print(str(max)+' '+str(area)+' '+str(volume))
```

## 9.2 Resultado da utilização do script para o TIN da batimetria da PCH Cachoeirão

Batimetria - 2012		
Cota (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
214	9.5281561	0.698735326
215	194.42447	85.72883283
216	835.106	508.0710085
217	8052.6526	3653.093016
218	41302.451	26020.66589
219	68858.623	82229.43717
220	102030.15	165980.3555
221	149566.73	292111.8345
222	191641.12	461053.795
223	237289.4	677081.597
224	275297.69	933345.2992
225	316942.86	1229440.825
226	358124.02	1566853.247
227	399995.3	1945968.275
228	442642.34	2367240.539
229	498107.59	2834591.358
230	589243.59	3376320.337
231	674158.06	4011970.988
231.81	731609.03	4580163.954

Soleira da tomada d'água

Altura da lâmina d'água do reservatório durante a realização da batimetria

### 9.3. Resultado da utilização do script para o TIN do levantamento planialtimétrico da PCH Cachoeirão

Levantamento Planialtimétrico - 1999		
Cota (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
213.34	0.005471138	1.049770066
214	88.08137113	17.46333664
215	804.369316	409.5994781
216	3510.88614	2273.096838
217	10355.28006	8818.36336
218	51540.17246	38047.54618
219	150003.7627	140039.5866
220	202912.0168	318259.4055
221	241497.3726	541369.2899
222	273563.4766	799178.4516
223	303797.1307	1088037.493
224	335616.0763	1406958.488
225	371827.8657	1760756.322
226	432035.0775	2174533.532
227	463146.7612	2622424.377
228	514428.27	3108669.092
229	586170.6718	3669714.494
230	623533.6654	4275761.494
231	649923.5105	4913337.597
231.81	665726.0222	5446351.773
232	669041.0397	5573157.358
233	685618.2676	6250422.463
234	699084.0923	6943753.749
235	707526.8313	7647415.903
236	712267.1571	8357420.432
237	716108.5263	9071634.817
238	719269.8699	9789360.269
239	722010.425	10510037.35
240	723866.1084	11233018.52
241	725137.8631	11957550.51
242	726243.2152	12683239.54
243	726973.3065	13409891.11
244	727351.5592	14137085.97
245	727466.0512	14864509.17
246	727498.7309	15591992.18
247	727568.2639	16319508.17
248	727577.0514	17047085.02
249	731564.1056	17785573.6
250.43	731609.0274	18831756

Soleira da tomada d'água

Altura da lâmina d'água do reservatório durante a realização da batimetria

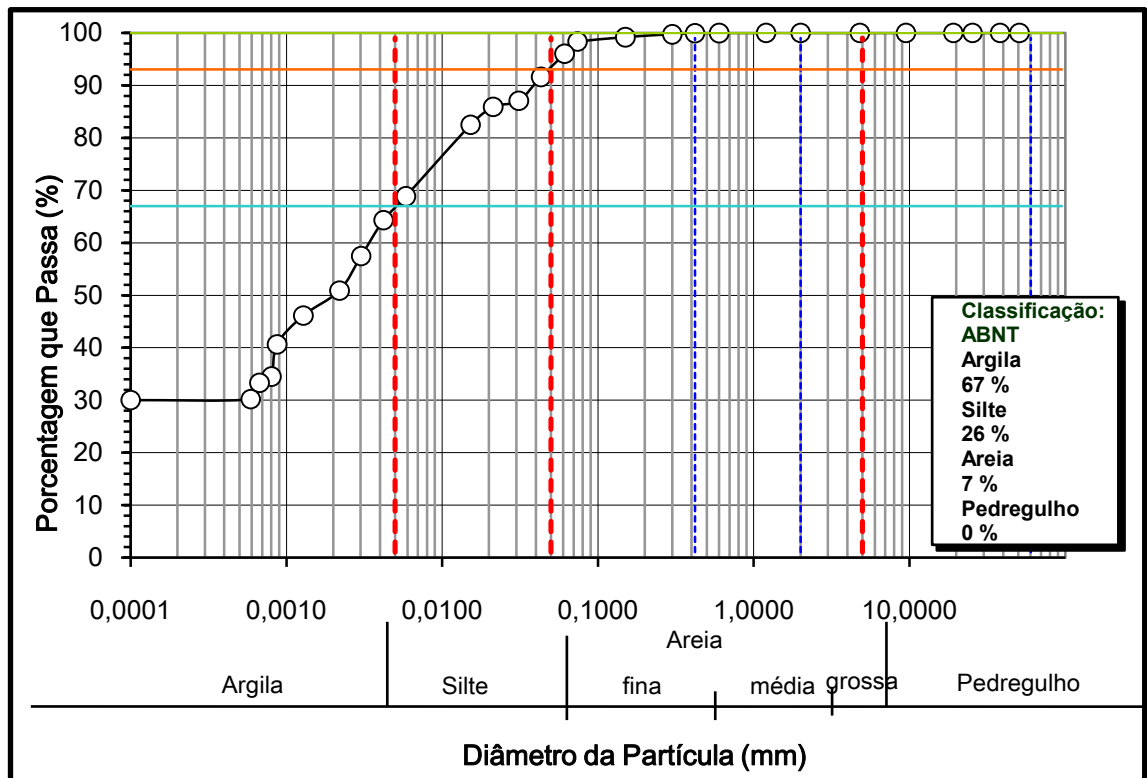
Cota máxima gerada pelo TIN

#### 9.4. Tabela com os valores da Curva CAV gerada pelo software Dposit

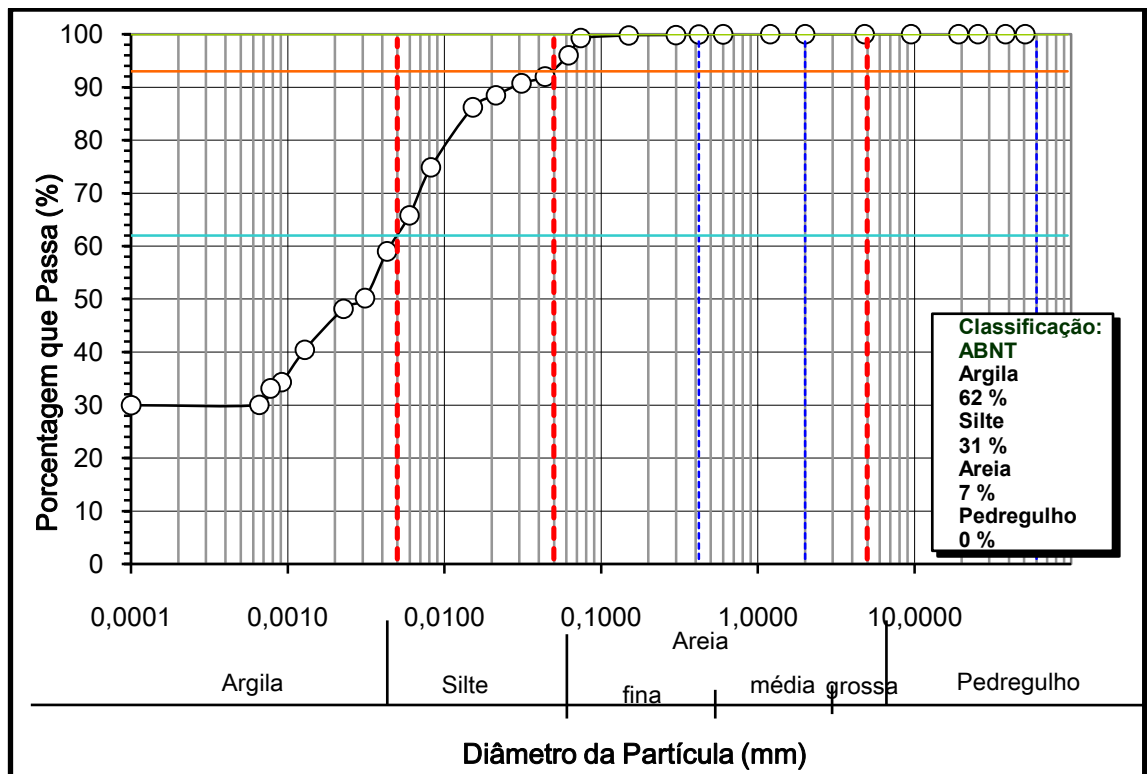
Estudo: PCHCachoeirao_Churchil		Simulação: 13 anos		
Cota (m)	Área Original (km <sup>2</sup> )	Volume Original (hm <sup>3</sup> )	Área Final (km <sup>2</sup> )	Volume Final (hm <sup>3</sup> )
231.8	0.67	5.45	0.67	4.93
231	0.65	4.91	0.65	4.4
230	0.62	4.28	0.62	3.76
229	0.59	3.67	0.58	3.16
228	0.51	3.11	0.5	2.6
227	0.46	2.62	0.45	2.13
226	0.43	2.17	0.41	1.7
225	0.37	1.76	0.34	1.31
224	0.34	1.41	0.3	0.99
223	0.3	1.09	0.26	0.71
222	0.27	0.8	0.23	0.46
221	0.24	0.54	0.19	0.25
220	0.2	0.32	0.15	0.08
219	0.15	0.14	0	0
218	0.05	0.04	0	0
217	0.01	0.01	0	0
216	0	0	0	0
215	0	0	0	0
214	0	0	0	0
213.34	0	0	0	0

### 9.5. Curvas granulométricas das amostras de sedimento de fundo coletadas no reservatório.

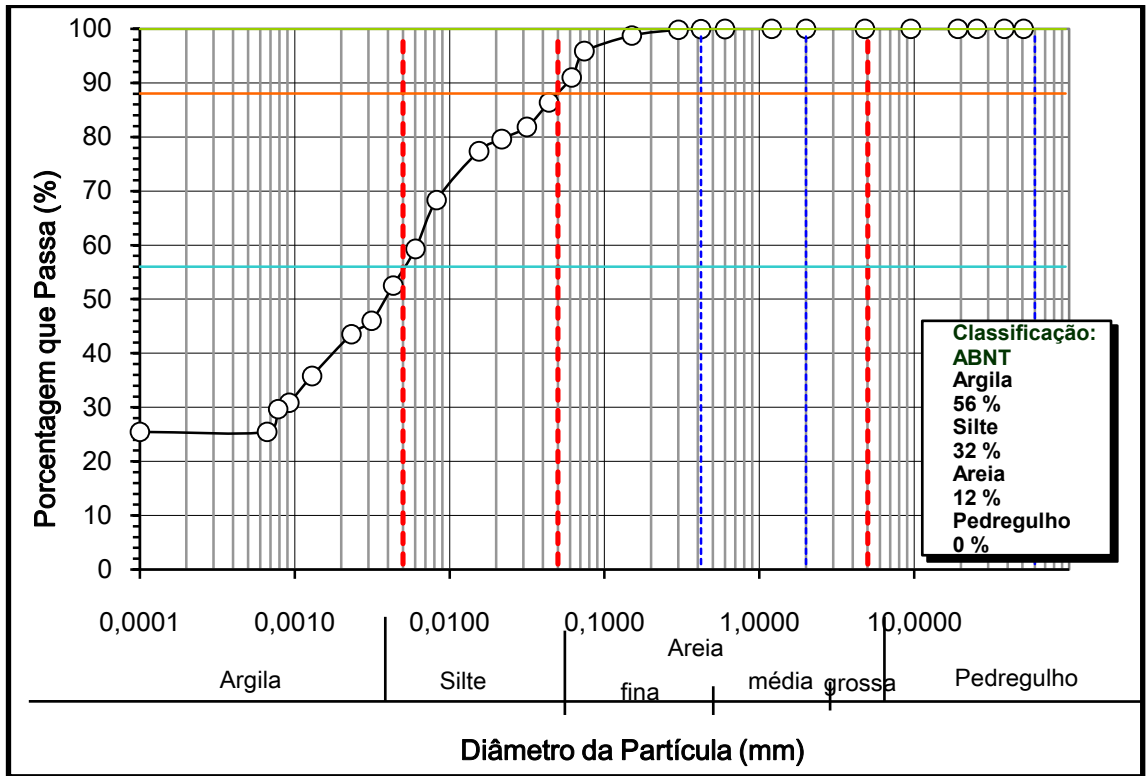
➤ C1



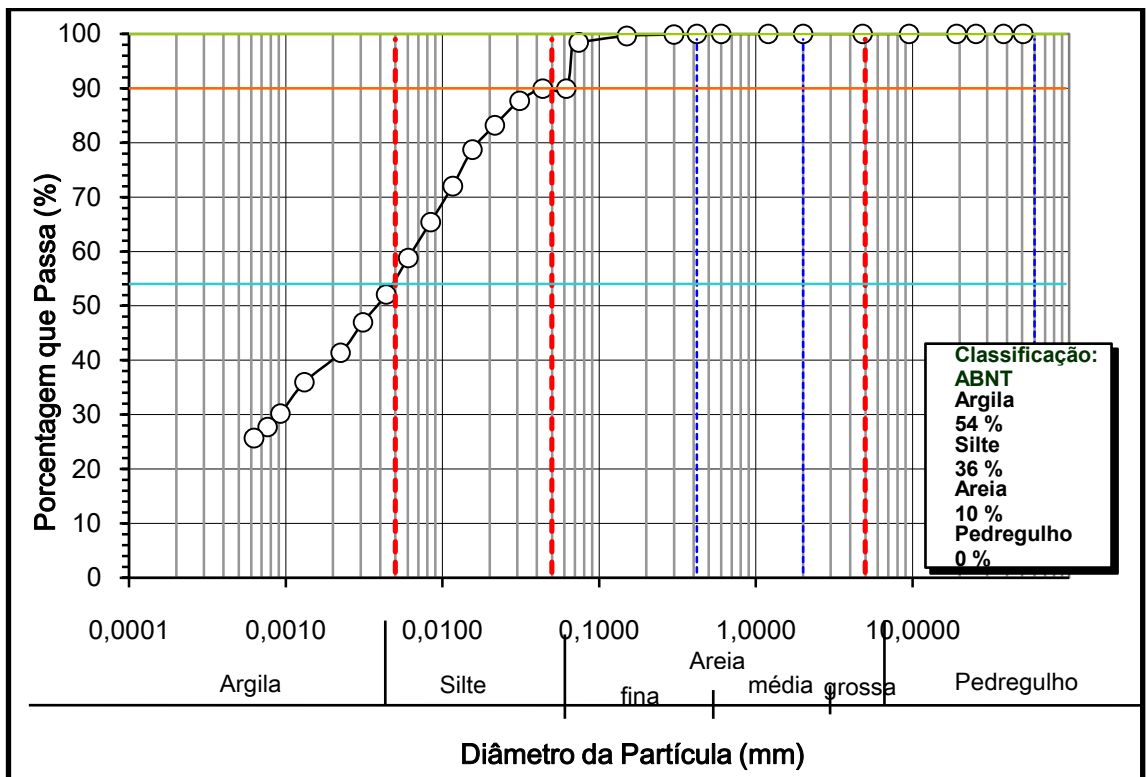
➤ C2



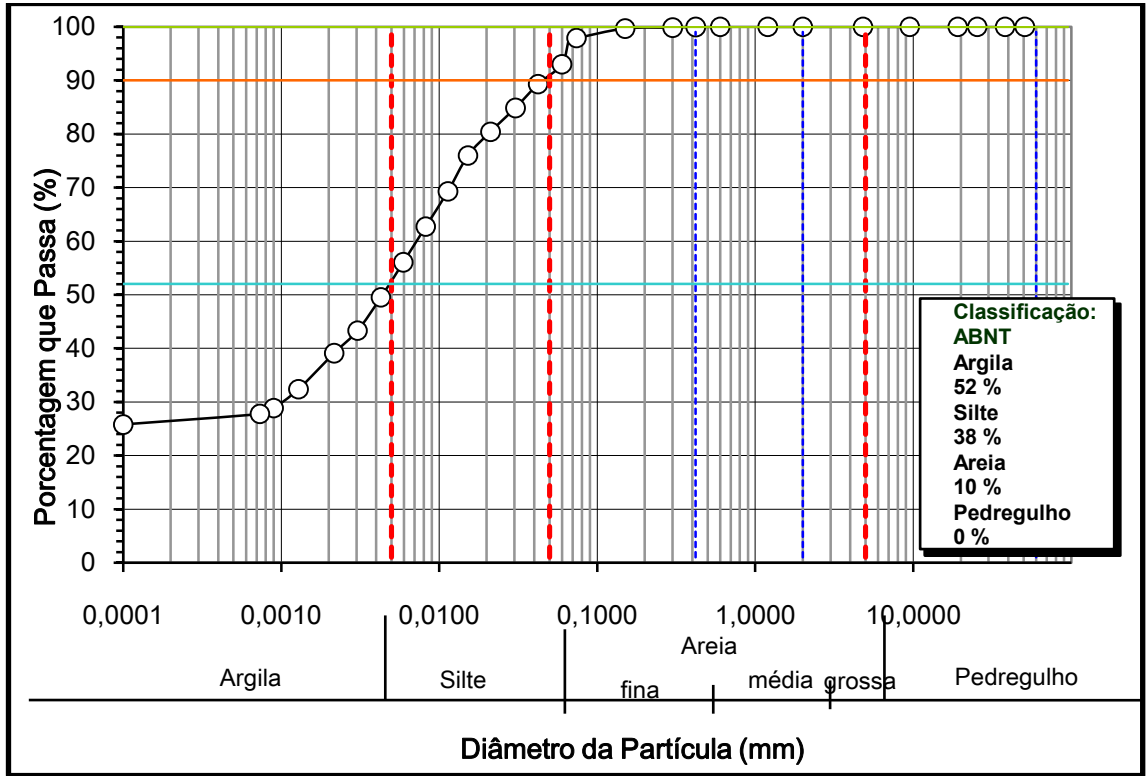
➤ **C3**



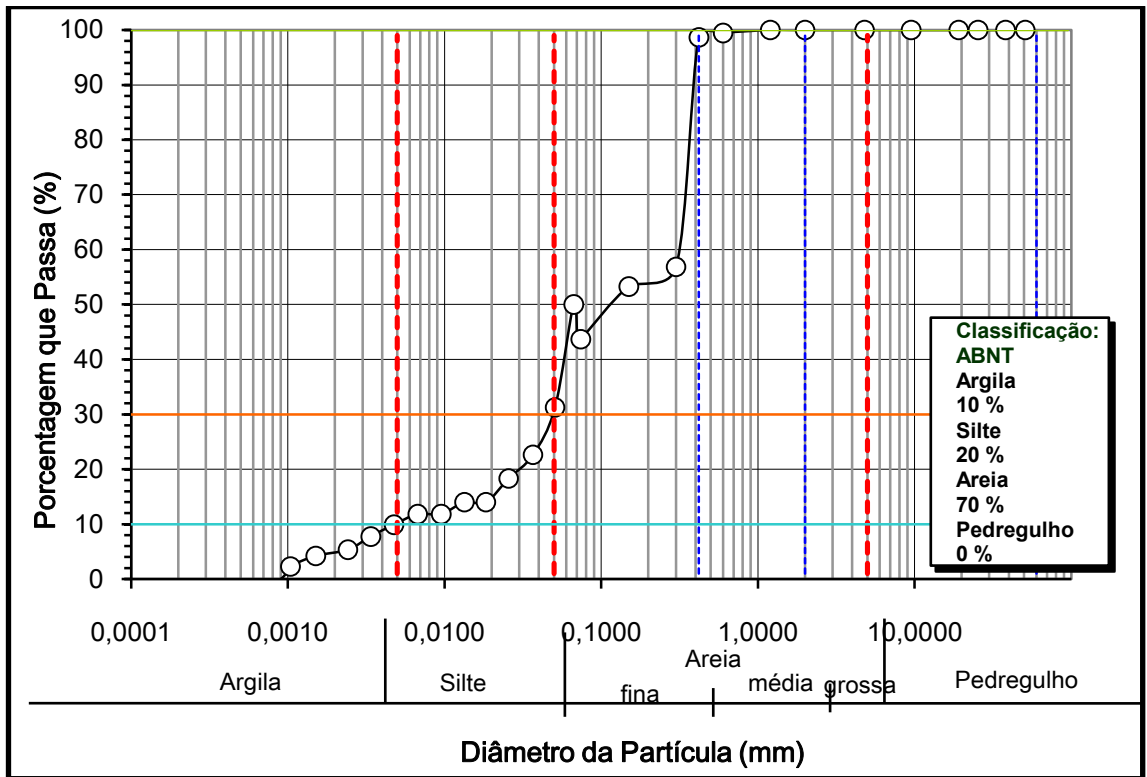
➤ **C4**



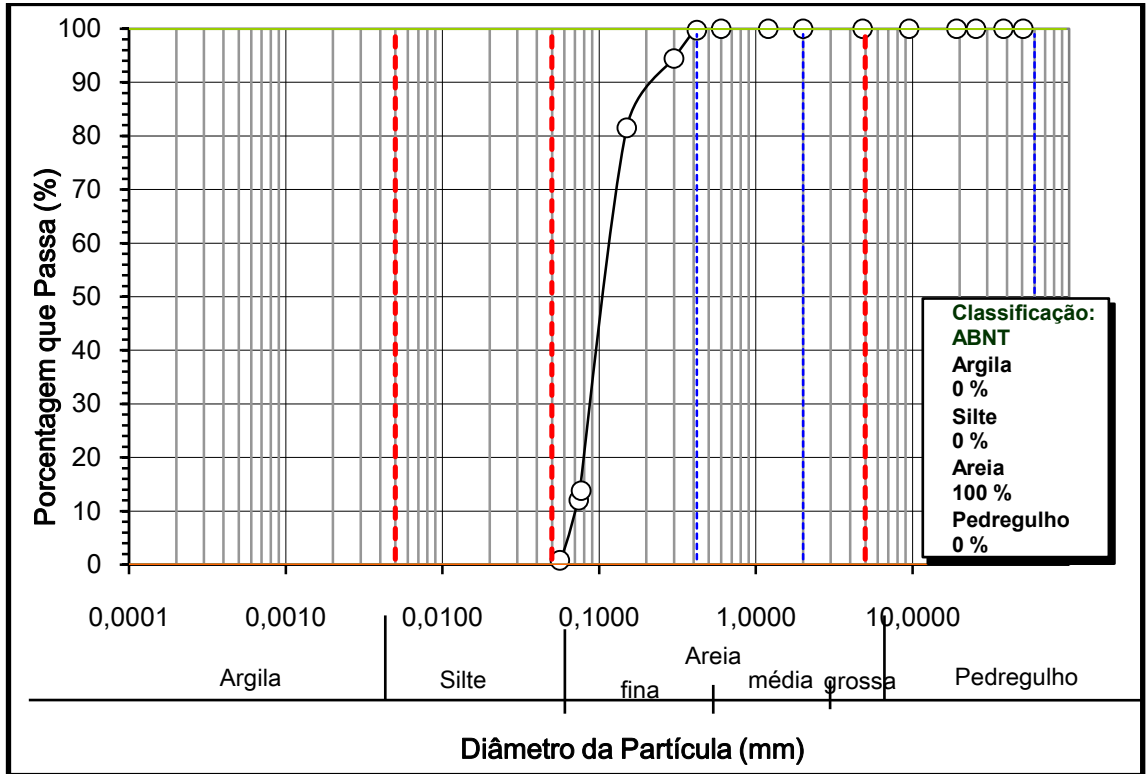
➤ **C5**



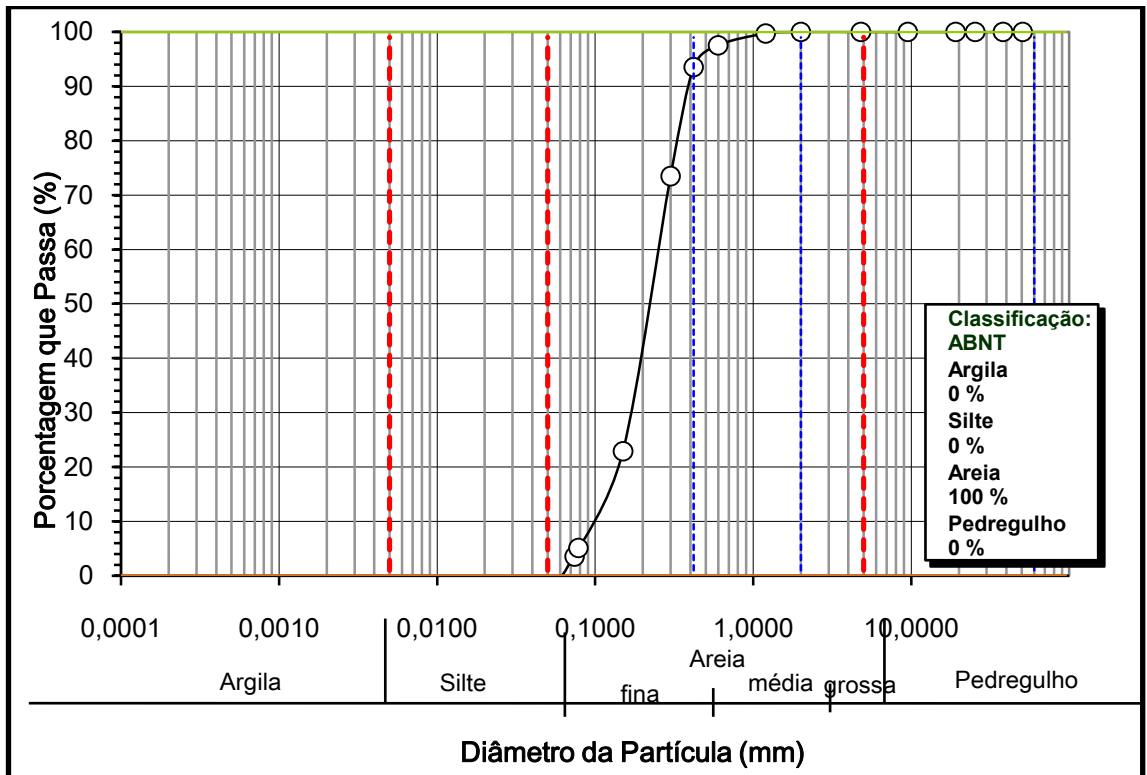
➤ **C6**



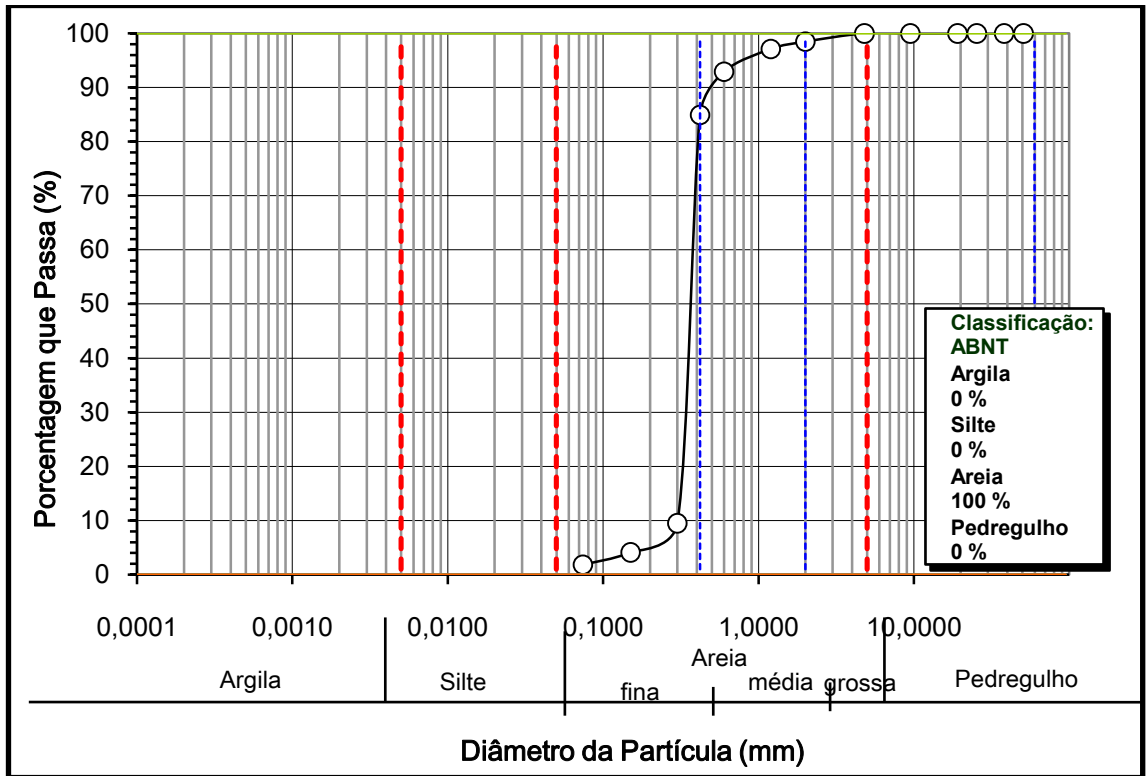
➤ C7



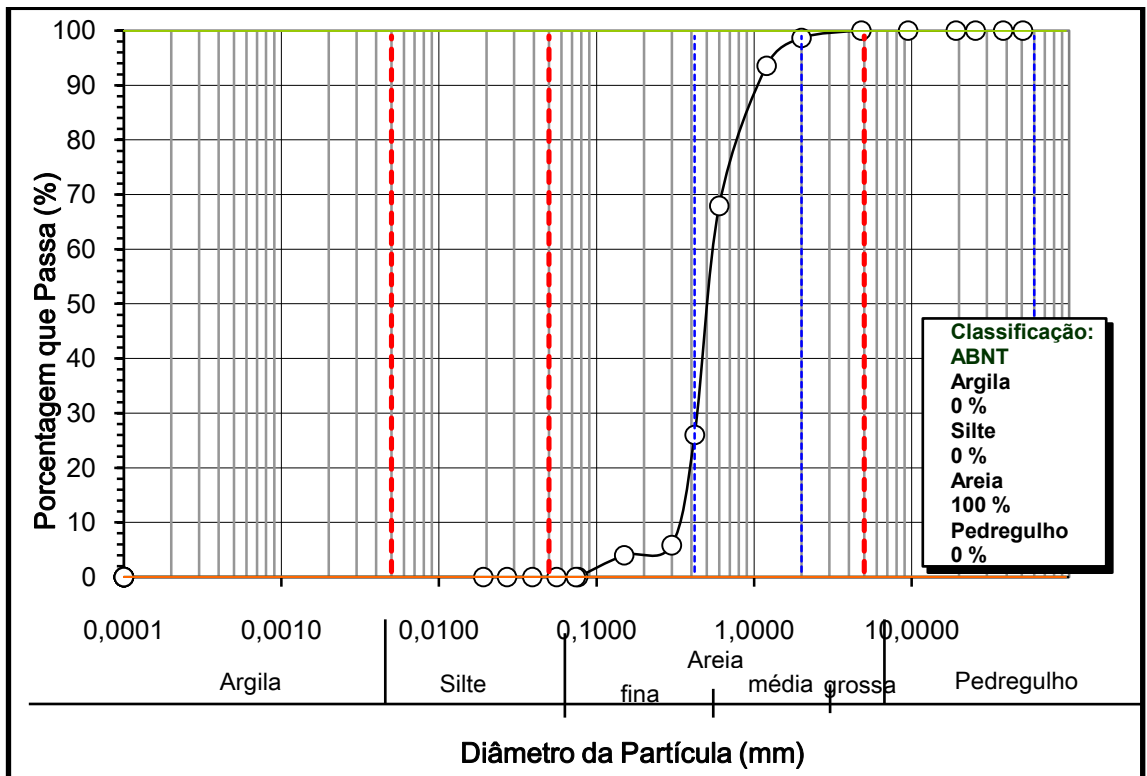
➤ C8



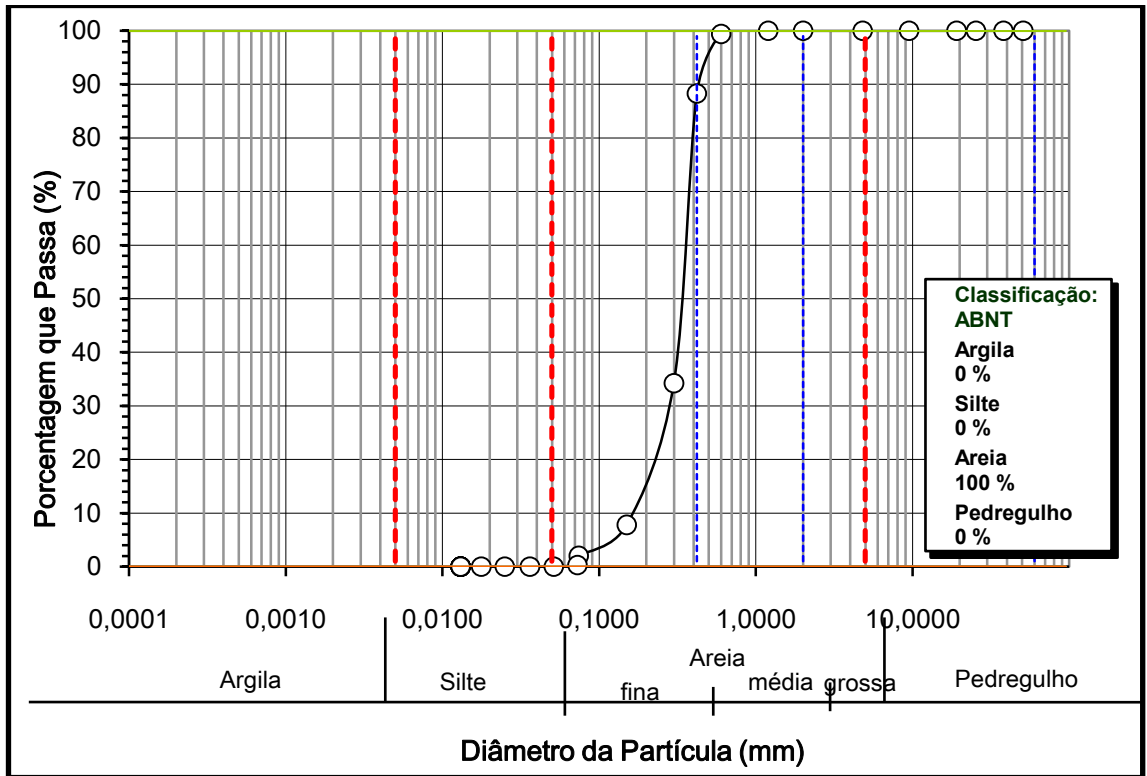
➤ C9



➤ C10



➤ C11



➤ C12

