

Felipe Jorge Teixeira

Avaliação do assoreamento do reservatório de Barra Bonita utilizando comparação de mapas batimétricos



Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental.

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP  
EXEMPLAR REVISADO  
Data de entrada no Serviço... 16 / 10 / 08  
Ass.: ..... Mauad

São Carlos/SP  
2008

DEDALUS - Acervo - EESC



31100111387

Class.	TE&E ✓
Cult.	6901
Tombo	T 231/08
Syno	1699858

31160111387

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

T266a

Teixeira, Felipe Jorge

Avaliação do assoreamento do reservatório de Barra  
Bonita utilizando comparação de mapas batimétricos /  
Felipe Jorge Teixeira ; orientador Frederico Fábio Mauad.  
-- São Carlos, 2008.

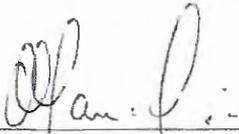
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação  
e Área de Concentração em Ciências da Engenharia  
Ambiental -- Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo.

1. Batimetria. 2. Assoreamento. 3. Reservatórios -  
vida útil. 4. Reservatório de Barra Bonita.  
5. Reservatórios - operação. I. Título.

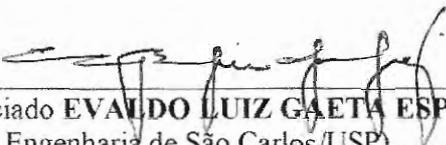
**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato: Engenheiro **FELIPE JORGE TEIXEIRA**

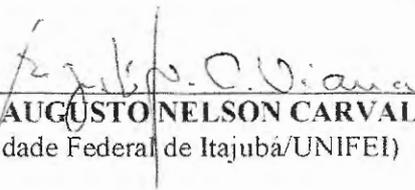
Dissertação defendida e julgada em 12/09/2008 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **FREDERICO FABIO MAUAD (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

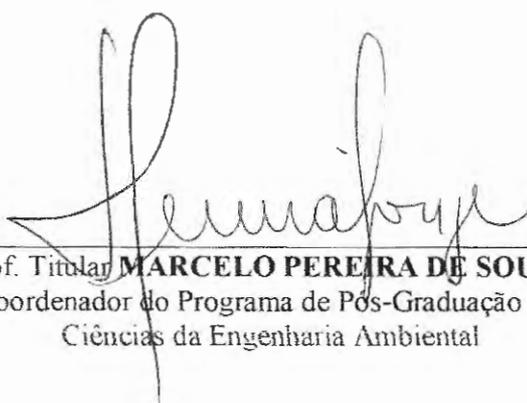
Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. associado **EVALDO LUIZ GAETA ESPINDOLA**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **AUGUSTO NELSON CARVALHO VIANA**  
(Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)

Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **MARCELO PEREIRA DE SOUZA**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Ciências da Engenharia Ambiental

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho aos meus familiares, todos  
muito importantes nessa minha caminhada.

Dedicação especial, além de toda a gratidão,  
respeito e amor, aos meus pais que torcem, se  
esforçam e se superam dia a dia pra possibilitar o  
crescimento desse seu filho. Ao Vitor, meu filho,  
todo amor do mundo, sendo essa etapa vencida  
apenas mais uma na busca de um futuro  
promissor pra nós.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pela bolsa de estudos concedida;

À AES Tietê por disponibilizar parte do material utilizado para esse estudo;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad, por possibilitar que o processo de elaboração da pesquisa fosse realizado de maneira eficiente e proveitosa;

Ao Diego Dozzi Tezza Loureiro por contribuir às minhas pesquisas. É lógico e evidente que não é só essa sua importância, afinal de contas passamos praticamente 7 anos de nossas vidas aprendendo em conjunto. Meu irmão.

À Liliane Lázzari Albertin, carinhosamente chamada de Lili por nós no Núcleo de Hidrometria, pelos inúmeros momentos divertidos na hora do café que ela fazia com muito gosto, além da grande amizade construída ao longo desses anos;

À minha grande amiga Mariéle Diniz pelas conversas nos momentos difíceis, pela paciência em me ouvir e também pelos bons momentos com muitas risadas e diversão. Com certeza uma amizade que levarei para toda vida;

Aos técnicos Waldomiro e José Roberto (Miro e Betão) pelas ótimas coletas de dados, troca de experiências e principalmente pelo bom ambiente de convívio;

Ao Prof. Dr. Francisco Dupas da UNIFEI, juntamente com seus técnicos do laboratório de Geoprocessamento, por disponibilizarem seus instrumentos laboratoriais para a digitalização das cartas batimétricas em papel;

Ao James Lacerda Maia que, de forma “mineiresca”, me auxiliou em vários momentos, além das boas prosas durante o cafezinho;

Ao Wellington Fernando Antônio, Mamute para muitos, por auxiliar a realização, com competência, de grande parte do tratamento dos dados de campo;

À todos os funcionários, professores e colegas do CRHEA, que de uma forma ou de outra me auxiliaram nessa caminhada;

À minha família e meus amigos, muito obrigado a todos!

## RESUMO

TEIXEIRA, F. J. – **Avaliação do assoreamento do reservatório de Barra Bonita utilizando comparação de mapas batimétricos**. 2008. 99 p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Prever o avanço do assoreamento em reservatórios é um estudo complexo que retorna informações importantes para o gerenciamento dos mesmos. Maiores precauções estão sendo tomadas nos últimos anos em relação à esse problema, pois muitos dos estudos iniciais de vida útil dos empreendimentos não estão sendo monitorados, um vez que esses apresentam situações críticas muito antes do previsto. Com essa preocupação, essa pesquisa se propõe a avaliar a evolução do volume de armazenamento assoreado na represa de Barra Bonita, rio Tietê/SP, através da comparação de mapas batimétricos de diferentes épocas, utilizando mapas elaborados em 1980, realizados para o planejamento da hidrovia do rio Tietê, encomendado pela CESP (Companhia Energética de São Paulo), e também mapas resultantes do levantamento realizado durante o ano de 2005 pelo Núcleo de Hidrometria da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), numa parceria com a empresa AES Tietê, projeto de P&D, que gerou dados mais atuais. Por terem sido confeccionados no início dos anos 80 se fez necessária a digitalização, vetorização e georreferenciamento dos mapas antigos, através do software de geoprocessamento ARCGIS, sendo que os mapas atuais já se encontram no formato digital, apropriado para a comparação de Modelo Digital de Terreno. Sendo o assoreamento inevitável aos reservatórios, torna-se muito importante acompanhar o avanço dos mesmos para que ações mitigatórias sejam consideradas, melhorando não só a qualidade da operação da barragem, mas também possibilitando o melhor planejamento para usos múltiplos, como irrigação e abastecimento urbano, reduzindo assim a possibilidade de conflitos futuros.

**PALAVRAS-CHAVE:** Batimetria, Assoreamento, Vida Útil, Reservatório de Barra Bonita, Operação de Reservatório.

## **ABSTRACT**

TEIXEIRA, F. J. – **Evaluation on siltation in Barra Bonita's reservoir using bathymetric comparison**. 2008. 99 p. Master dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Predicting the silting progress in reservoirs is a complex study that yields important information for the management of them. Additional precautions are being taken in recent years because many of the initial studies about the enterprise's life stand aren't being monitored, as these have critical situations well before the originally envisaged. With this concern, this search is proposed to assess the evolution of the dam lost volume of Barra Bonita, Tietê river / SP, by comparing maps bathymetry of different eras, using maps drawn up in 1980, made for planning the river Tietê hydroway, commissioned by CESP (Companhia Energética de São Paulo), and also maps derived from the survey conducted during 2005 by Núcleo de Hidrometria of the Escola de Engenharia de São Carlos (EESC / USP), a partnership with the company AES Tietê, project of P & D, which has generated more current data. It had been made in the early 80's is needed to scan, vectoring and georeference of old maps, which will be done through geoprocessing software ARCGIS, and the current maps are already in digital format, suitable for the comparison of Digital Model Land. As the silting of reservoirs inevitable, it is very important to monitor the progress of the same so that mitigation actions are considered, not only improving the quality of the operation of the dam, but also the best possible design for multiple uses, such as irrigation and urban supply, thus reducing the possibility of future conflicts.

**KEY-WORDS:** Bathymetry, Siltation, Life Stand, Barra Bonita's Reservoir, Reservoir Operation.

## Lista de Figuras

Figura 1: Tipos de cobertura vegetal e as perdas de solo que ocasionam para a bacia em uma área de Mpwapwa, Tanzânia (modificado de BRUK, 1985). .....	23
Figura 2: Modificações da bacia hidrográfica com o passar dos anos. (BRUK, 1985). .....	24
Figura 3: Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios (modificado de CARVALHO, 1994).....	28
Figura 4: Vista da tomada d'água do Reservatório de Cariobinha (MAIA, 2006).....	31
Figura 5: Vista das grades da tomada d'água e da comporta de fundo do Reservatório de Cariobinha. Início da desobstrução (MAIA, 2006). .....	32
Figura 7: Vista das grades da tomada d'água e da comporta de fundo do Reservatório de Cariobinha, durante os trabalhos de desobstrução. (MAIA, 2006). .....	32
Figura 8: Perfil longitudinal de uma seção batimétrica e sua evolução da sedimentação. (Fonte: modificado de USDI, 1987).....	36
Figura 9: Mapas temáticos representando características (Fonte: O autor) .....	40
Figura 10: Processo de elaboração de um modelo conceitual. (modificado de MENDES e CIRILO, 2001).....	42
Figura 12: Exemplo de imagem tipo raster (modificado de MENDES e CIRILO, 2001) .....	45
Figura 13: Representação das diferentes elevações para um ponto quando não se tem seu valor medido, determinando-se por interpolação (ANDERSON, 2002).....	47
Figura 14: Distribuição das UGRH's (modificado de IGC, 2006). .....	49

Figura 15: Localização da represa de Barra Bonita (modificado de AES TIETÊ, 2006).	51
Figura 16: Mapa de potencialidade de erosão (SIGRH, 2001).	52
Figura 17: Foto da margem do reservatório. Presença de macrófitas na água e solo desprotegido nas margens. (FIPAI, 2005)	53
Figura 18: Vista de jusante para montante do lago. Região um pouco mais protegida pela vegetação nas margens. (FIPAI, 2005)	53
Figura 19: Vista para a margem próxima ao rio Piracicaba. Solo totalmente desprotegido. (FIPAI, 2005)	54
Figura 20: Outra região com grande concentração de macrófitas. (FIPAI, 2005)	54
Figura 21: Usos preponderantes da água nas bacias do Estado de São Paulo com destaque para as BHTS e BHPCJ. (SIGRH, 2001).	55
Figura 22: Carta batimétrica sendo captada pelo scanner. (Fonte: O autor)	60
Figura 23: Divisão das cartas sobre o reservatório de Barra Bonita. (HIDROCONSULT, 1980)	60
Figura 24: Tela do Software ArcGIS durante o processo de digitalização. (Fonte: O autor)	62
Figura 25: Mapa obtido pela digitalização das cartas batimétricas de 1980. (Fonte: O autor)	64
Figura 26: Limites considerados para a geração do MDT. (Fonte: O autor)	65
Figura 27: Mapa de curvas de nível gerado através dos dados de 1980. (Fonte: O autor)	66
Figura 28: Exemplo de curva Cota x Área x Volume. (Fonte: USDI, 1987)	68
Figura 30: Esquema de trabalho do ADP acoplado a um DGPS (modificado de FIPAI, 2005).	69

Figura 31: Trecho do reservatório obtido através da triangulação pelo TopoGRAPH. (Fonte: O autor).....	70
Figura 32: Mapa de curvas de nível obtido através dos dados de 2005. (Fonte: O autor).....	71
Figura 33: Comparação entre as curvas características. (Fonte: O autor).....	71
Figura 34: Seções de controle definidas no reservatório. (Fonte: O autor).....	72
Figura 35: Exemplo de volume assoreado numa seção de estudo. (Fonte: O autor)	73
Figura 36: Curva Cota X Área X Volume para o reservatório, obtida em 1966. (Fonte: O autor).....	74
Figura 37: Curva Cota X Volume, obtida em 1977. (Fonte: O autor) .....	74
Figura 38: Mapa batimétrico digitalizado de 1980. (Fonte: O autor) .....	76
Figura 39: Curva Cota X Área X Volume gerada com dados de 1980. (Fonte: O autor).....	78
Figura 40: Curva Cota X Área X Volume gerada com dados de 2005. (Fonte: O autor).....	79
Figura 41: Sobreposição das curvas Cota X Volume. (Fonte: O autor) .....	80
Figura 42: Volumes acumulados obtidos. (Fonte: O autor).....	80
Figura 43: Sobreposição das curvas Cota X Área (Fonte: O autor) .....	81
Figura 44: Identificação das seções de controle. (Fonte: O autor).....	83
Figura 45: Seção S1. ....	84
Figura 46: Seção S2. ....	84
Figura 47: Seção S3. ....	85
Figura 48: Seção S4. ....	85
Figura 49: Seção S5. ....	86
Figura 50: Seção S6. ....	86

Figura 51: Interferência do contorno forçado. (Fonte: O autor) .....	87
Figura 52: Curva Cota X Área X Volume para o reservatório, obtida em 1966. (Fonte: O autor) .....	88
Figura 53: Curva Cota X Volume para o reservatório, obtida em 1977. (Fonte: O autor) .....	88
Figura 54: Curvas características obtidas para o reservatório em 2005. (Fonte: O autor) .....	89
Figura 55: Comparação das curvas características. (Fonte: O autor) .....	90
Figura 56: Comparação dos volumes acumulados na cota referência. (Fonte: O autor) .....	90

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Alguns reservatórios brasileiros parcial ou totalmente assoreados (CARVALHO, 1994).....	38
Tabela 2: Relação entre a escala da representação e o passo entre as CN's.....	48
Tabela 3: Valores de Área e Volume obtidos dos mapas de 1980.....	77
Tabela 4: Valores de Área e Volume obtidos no levantamento de 2005.....	78
Tabela 5: Coordenadas que delimitam as seções de controle.....	82

## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	6
Lista de Tabelas .....	10
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO .....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
3.1. Erosão da bacia hidrográfica .....	19
3.2. Sedimentologia em reservatórios .....	26
3.3. Medição do Assoreamento .....	33
3.4. Teoria de Geoprocessamento .....	38
3.4.1. Importância do geoprocessamento nos recursos hídricos .....	42
3.5. Digitalização de dados.....	44
3.6. Modelo Digital de Terreno (MDT) .....	46
4. CARACTERIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO .....	49
5. METODOLOGIA .....	57
5.1. Tratamento dos dados de 1980 .....	57
5.1.1. Escaneamento dos mapas em papel .....	59
5.1.2. Georreferenciamento dos mapas escaneados .....	61
5.1.3. Vetorização das informações contidas nos mapas .....	61
5.1.4. Geração do MDT.....	63
5.1.5. Construção das curvas características. ....	66
5.2. Tratamento dos dados de 2005.....	68
6. Resultados.....	76
6.1. Resultados obtidos pela comparação dos mapas batimétricos .....	76

6.2. Resultados obtidos pela comparação entre as curvas características de 1966, 1977 e 2005.....	87
7. Conclusões e Recomendações.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

## 1. INTRODUÇÃO

A importância da água para a manutenção da vida e o desenvolvimento de atividades econômicas é reconhecida por todos como sendo imprescindível. De toda água existente no planeta, pouco menos de 1% representa água doce disponível, e dessa parte, uma fração muito pequena pode ser considerada potável (TUCCI et al., 2004). A histórica exploração não sustentável desse recurso acarreta hoje problemas sérios de ordem econômica, ambiental, social.

Fatores como crescimento populacional, processo intensivo de urbanização, expansão da fronteira agrícola e implantação de indústrias ser apontados como os responsáveis pelo aumento da demanda de água.

Existem diversas formas de se captar água, por exemplo poços subterrâneos, captações diretas em cursos d'água e também através do armazenamento em reservatórios, sendo que as características dos empreendimentos balizam qual a melhor alternativa se adotar. Quando se fala em barramentos, pode-se realizar mais de um uso no sistema, o chamado uso múltiplo, sendo essa uma tendência cada vez mais presente nos projetos atuais.

O Brasil é um país com grandes potencialidades para implantação de reservatórios, sendo o potencial para usos múltiplos traduzido em abastecimento urbano, irrigação e geração de energia elétrica. Nesse ponto, tendo em vista que a maior parte da energia gerada em nosso país é de origem hidráulica, os barramentos se tornam ainda mais importantes.

Apesar de largamente difundido, os barramentos acarretam também problemas como a necessidade de deslocamento de populações ribeirinhas, problemas de saúde pública, como malária, esquistossomose, etc., perda de

espécies nativas de peixes, perda de biodiversidade dos rios, interferência no pulso de inundação, efeitos na composição química e física da água a montante e jusante e degradação da qualidade da água (TUNDISI, 1996).

Técnicas de exploração dos cursos d'água têm se desenvolvido rapidamente, principalmente no sentido de viabilizar explorações mais racionais, visando a manutenção dos mananciais para as gerações futuras, premissa que está presente na Política Nacional de Recursos Hídricos.

A hidráulica fluvial é a ciência que se destina a entender os fenômenos que regem o comportamento dos cursos d'água, como morfologia, transporte de sedimentos e interação com os oceanos. Os rios são vetores de sedimentos, sendo que presença destes nos cursos d'água tem como origem fundamental o processo erosivo na bacia hidrográfica e no interior das calhas fluviais. Sedimentos e água formam um sistema dinâmico, que busca o equilíbrio, sendo responsável pela geometria e morfologia dos rios (SILVA; JÚNIOR, 2005).

O transporte e deposição de sedimentos são processos conduzidos basicamente por forças meteorológicas e das correntes de fluxo no curso d'água, sendo as partículas transformadas por processos físicos, químicos e biológicos (ROSA et al., 1991 apud LEITE, 1998).

A implantação de obras hidráulicas causam um desequilíbrio desse sistema, o que acaba por resultar em alterações em suas características morfológicas. Somadas a isso, quando no entorno não há aplicação de técnicas visando a conservação do solo, esse desequilíbrio é potencializado (SILVA; JÚNIOR, 2005).

No ponto de vista da hidráulica fluvial, em reservatórios, esse desequilíbrio é menos impactante a montante do que quando se analisa a jusante da obra, uma vez que grande parte dos sedimentos contidos na água ficam retidos no lago e isso

acarreta condições favoráveis para o aumento da erosão das margens de jusante (CARVALHO, 1994), isso ocorre porque este funciona como bacia de contenção de sedimentos (TUNDISI, 1996).

As forças que atuam nas partículas carregadas são consequência direta do equilíbrio do sistema “água + sedimentos” já citado. A partir do instante que se constrói um barramento e esse equilíbrio é afetado, essas forças também se modificam. Existe a tendência natural de sua deposição ao se diminuírem as velocidades do fluxo, e as partículas maiores se depositam logo na entrada do reservatório, sendo que as menores avançam no lago.

Pode-se considerar que a sedimentação atua como um dos processos fundamentais que governam o metabolismo do lago, influenciando a regeneração de nutrientes em seu interior, removendo matéria particulada para o fundo e controlando o suprimento de nutriente para a comunidade bentônica (BLOESCH; UEHLINGER, 1986 apud LEITE, 1998).

A compreensão do processo de sedimentação em reservatórios é de grande importância, haja vista que esse processo acarreta em perdas de volume dos mesmos. É indicado que, na já fase de projeto, a quantificação dessa perda de volume seja realizada e, durante toda a vida útil do empreendimento esses estudos sejam continuados e aperfeiçoados, tendo em vista que intervenções na bacia, fruto do desenvolvimento causado pelas próprias construções e condições favoráveis de desenvolvimento a partir da criação do lago, acabam por alterar as taxas de perda de solo na bacia e sedimentação no reservatório (CARVALHO, 1994).

O nível d'água do reservatório, temperatura e minerais dissolvidos na água, composição mineral dos sedimentos (principalmente as frações argila), configuração da bacia de drenagem e a quantidade de sedimento previamente depositada dentro

do mesmo são fatores que afetam os padrões e processos de deposição (PAIVA; PAIVA, 2003).

Uma forma conveniente de quantificação dos depósitos ocorridos no reservatório é a comparação batimétrica, uma vez que se podem produzir mapas com curvas de nível das condições do fundo do lago (mapas batimétricos). É ideal que essas comparações sejam realizadas periodicamente, variando de 2 a 10 anos, dependendo das dimensões do mesmo, porém pouco se tem realizado nesse sentido principalmente nos grandes empreendimentos, por se tratar de metodologia dispendiosa e com elevado tempo de execução (CARVALHO, 1994).

Outro fator que torna a comparação batimétrica uma metodologia pouco utilizada é a dificuldade de obtenção de mapas antigos das represas. Esses mapas tornam-se necessários, pois só a partir de dados de épocas diferentes é possível contabilizar a evolução da sedimentação. Existem ainda mapas para alguns trechos de reservatórios, confeccionados com fins específicos, como por exemplo, para o planejamento de hidrovias.

Afetando diretamente a produção de energia elétrica, a perda de volume acumulado e o aumento de sedimentos no reservatório também acarretam problemas de desgaste nas turbinas, e investimentos em dragagens para liberar as entradas da tomada d'água são necessários (MAIA, 2006).

Contabilizando-se a evolução dos depósitos pode-se então comparar se as previsões de início de projeto estão sendo respeitadas e, caso isso não ocorra, revisar essa previsão, definindo-se nova vida útil para o empreendimento e, dependendo do grau de avanço da perda de volume, planejar obras de contenção de sedimentos na região de entorno do lago, visando diminuir a taxa de perda de solo da bacia.

Nesse contexto a Usina Hidrelétrica de Barra Bonita faz parte do SIN (Sistema Interligado Nacional), que é responsável pela produção e transmissão de energia elétrica no país, tendo como base um sistema hidrotérmico, com forte predominância de usinas hidrelétricas. As usinas hidrelétricas interligadas ao SIN são atualmente responsáveis por mais de 80% do atendimento do mercado brasileiro de energia elétrica e todos estes reservatórios são susceptíveis ao processo de assoreamento. Em virtude do cenário apresentado, é que se justifica a necessidade de um estudo aprofundado e difundido da interferência do assoreamento no planejamento integrado dos reservatórios visando os usos múltiplos (MAIA, 2006).

Assim esse trabalho busca avaliar a evolução da sedimentação do Reservatório de Barra Bonita, analisando os dados relacionados a seguir:

- Dados de batimetria obtidos através da digitalização de mapas de 1980 de um trecho do lago, utilizados como parte dos estudos para elaboração do trecho navegável da hidrovia Tietê-Paraná (HIDROCONSULT, 1980)
- Dados gerados por campanhas de medição do Núcleo de Hidrometria no ano de 2005, contemplando toda a extensão superficial do lago.
- Curvas Cota X Área X Volume referentes aos anos de 1966 e 1977, fornecidos pela AES Tietê.

## **2. OBJETIVO**

Os objetivos do trabalho são:

- Comparar os volumes acumulados em um trecho do reservatório entre 1980 e 2005;
- Analisar as informações de volume acumulado em 1966 e 1977;
- Determinar Seções de Controle no reservatório, para que o acompanhamento do assoreamento possa ser avaliado pontualmente.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Erosão da bacia hidrográfica

Erosão é o processo de desagregação de partículas do solo ou de rochas, pela ação combinada da gravidade com a água, superficial ou subterrânea (RIDENTE JÚNIOR, 2002), que ocorre naturalmente e está ligada aos fenômenos climáticos como chuvas, ventos, etc. (CARVALHO, 2000). Em seu sentido mais amplo, inclui o intemperismo, o transporte e a deposição dos sedimentos. Existe na natureza um quadro bastante dinâmico no qual atuam dois componentes contraditórios e complementares: as forças de infiltração responsáveis pela pedogênese e as forças denudacionais responsáveis pela morfogênese e que caracterizam os efeitos erosivos. Sob condição geológica este quadro reflete uma situação de equilíbrio (PAIVA; PAIVA, 2003).

Ações erosivas da água se juntam aos efeitos da energia da chuva e o subsequente escoamento superficial (HAMED et al., 2002), criando assim condições de carreamento do solo até o curso d'água. O conhecimento do aporte de sedimentos em bacias hidrográficas é importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Tais informações são fundamentais no dimensionamento e operação de obras hidráulicas, interferindo decisivamente nos custos de implantação e manutenção de tais sistemas. Porém, os custos envolvidos nestes monitoramentos são bastante elevados (PAIVA; PAIVA; PARANHOS, 2006).

A erosão pode ser do tipo laminar, quando causada por escoamento difuso das águas da chuva, resultando em remoção progressiva dos horizontes superficiais do solo. Esse tipo de erosão é dificilmente perceptível. Outro tipo de erosão é do tipo linear, quando causada pela concentração das linhas de fluxo das águas de

escoamento superficial (enxurrada), resultando em incisões na superfície do terreno, determinadas pelo desprendimento e transporte das partículas do solo. Pode ainda haver a ação combinada entre o escoamento superficial concentrado e o escoamento subterrâneo (RIDENTE JÚNIOR, 2002).

Alguns fatores fazem com que o processo de erosão seja acelerado, afetando o rompimento do equilíbrio dinâmico entre erosão e depósito de sedimentos. Esse tipo de comportamento tende a tornar cada vez mais crítico e difícil de ser eliminado, porém pode ser reduzido a níveis aceitáveis pela aplicação de práticas de controle (PAIVA; PAIVA, 2003). Algumas graves conseqüências desse tipo de erosão são listadas a seguir:

- Empobrecimento da fertilidade do solo;
- Deterioração das condições físicas para o desenvolvimento vegetal;
- Produção excessiva de sedimentos;
- Liberação de poluentes químicos constituídos por nutrientes vegetais e agrotóxicos;
- Deposição de sedimentos em reservatórios e canais.

Os impactos ambientais causados pela erosão são diversos, porém difíceis de ser mensurados, sendo que podem gerar destruição do meio biótico, ocorrendo a médio e longo prazo. A colmatção de canais de rios e reservatórios é um tipo desses impactos. Para rios e canais de drenagem urbana a conseqüência é de enchentes e inundações, já nos lagos e reservatórios de abastecimento, esse processo pode provocar o comprometimento da quantidade e qualidade da água para abastecimento público (RIDENTE JÚNIOR, 2002).

Diversos são os agentes causadores da erosão, sendo os mais atuantes no território brasileiro o vento, gravidade e água em movimento. A erosão eólica

consiste na degradação e remoção de fragmentos e partículas de solo e rocha pela ação combinada do vento e da gravidade. Atua principalmente em solos, menos consistidos que as rochas, transportando partículas finas. A gravidade atua de forma a transportar o material do topo do morro para as regiões de talvegue, atuando em conjunto com as forças do vento e da água (TUCCI et. al, 2004).

O principal agente de transporte de detritos do continente para o mar é o rio, que além de transportar os sedimentos que chegam até ele pela ação dos ventos e da gravidade, também acaba por erodir as rochas do embasamento sobre o qual correm (PAIVA; PAIVA, 2003). Essa erosão ocorre tanto mecanicamente, com o choque de partículas, como quimicamente, sendo a água um meio propício para facilitar a corrosão no fundo do rio.

Existem três maneiras de o rio carregar as partículas erodidas: sólidos em suspensão (silte e argila), carga do leito (areia, cascalho e partículas de rochas que deslizam e saltam ao longo do leito) e sólidos dissolvidos (constituintes químicos das rochas em solução aquosa) (PAIVA; PAIVA, 2003). Os sólidos dissolvidos não contribuem diretamente para a sedimentação e assoreamento de rios e lagos.

A erosão das chuvas se inicia no solo onde a proteção vegetal não está presente, desagregando as partículas. O escoamento da água tem força suficiente para carregar essas partículas desagregadas, podendo provocar a lavagem da superfície do solo, evoluindo para um escoamento concentrado que acaba por formar sulcos preferenciais e dessa forma gerar ravinas e voçorocas. As voçorocas são o resultado da ação conjugada do escoamento superficial e do solapamento pelas águas subterrâneas, causando grandes perdas de solo (PAIVA; PAIVA, 2003).

Erosão e sedimentos são temas muito pesquisados no mundo inteiro. No Brasil, são poucas instituições que realizam trabalhos de avaliação da produção de

sedimentos. Com isso, abordam aspectos de bacias hidrográficas específicas, as quais não representam a grande diversidade existente no país (SENHORELO; TEIXEIRA, 2006).

Métodos de simulação de chuva podem ser utilizados para estimar a produção de sedimentos numa bacia. Esses métodos resultam em valores aproximados da erosividade, porém os resultados podem ser afetados pelas incertezas não contempladas pelo tipo de simulador e os eventos naturais de chuva. Hamed et al. (2002) comparam os resultados obtidos num simulador de chuvas com dados observados durante 7 anos em campo em M'Riched el Anze no semi-árido da Tunísia. Essa região tem uma área de 158 ha, sendo 92% utilizadas para o plantio de trigo, forragem e vegetais. O modelo estudado retornou resultados com 80% e 96% de precisão, dependendo da época do ano.

A importância do uso do solo e da cobertura vegetal é proporcional à densidade da segunda. A vegetação nativa proporciona uma dificuldade maior para o escoamento superficial, tornando o solo mais poroso, além de se tornar um obstáculo para o desenvolvimento do escoamento. Essas características acabam por proporcionar uma infiltração mais eficaz e diminuição da energia de escoamento. Este fato pode ser demonstrado pelos resultados dos testes de erosão para diferentes tipos de cobertura vegetal realizados em Mpwapwa na Tanzânia, ilustrado na Figura 1. Esses resultados não são conclusivos para qualquer área do planeta com os mesmos tipos de vegetação, porém indicam uma grande variação para diferentes tipos de uso do solo (BRUK, 1985). A presença de vegetação ameniza o impacto das gotas de chuva no solo e isso diminui seu efeito erosivo.

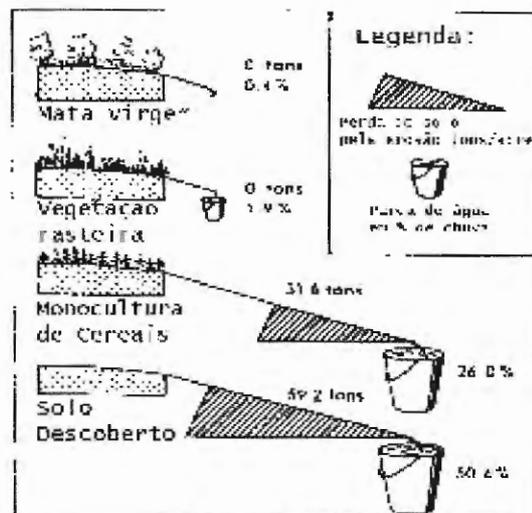


Figura 1: Tipos de cobertura vegetal e as perdas de solo que ocasionam para a bacia em uma área de Mpwapwa, Tanzânia (modificado de BRUK, 1985).

A Figura 2 ilustra as modificações sofridas por uma bacia hidrográfica com o passar dos anos. Em A, há uma situação de pré-ocupação, com a vegetação nos topos preservada e o equilíbrio sedimentológico inalterado; em B, problemas com erosão e deposição de partículas junto ao leito do rio, fruto do desmatamento sem controle e usos inadequados do solo. Já em C houve intervenção humana realizando o reflorestamento das áreas de encosta e da mata ciliar, possibilitando assim o controle da erosão e conseqüentemente diminuição da carga de sedimentos para o curso d'água, que mesmo assim não mais retornou às mesmas condições iniciais.

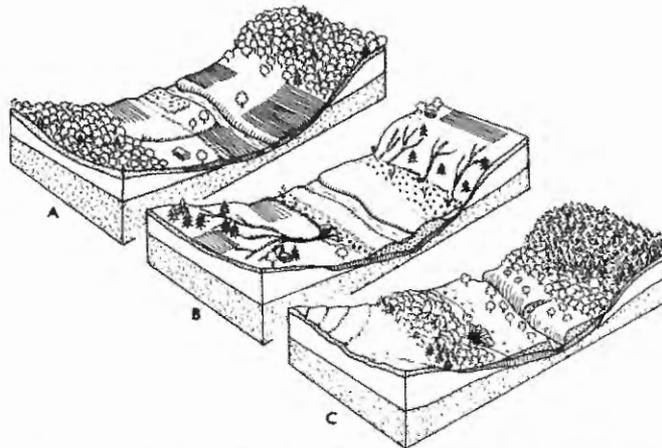


Figura 2: Modificações da bacia hidrográfica com o passar dos anos. (BRUK, 1985).

Estimar a produção de sedimentos numa bacia é algo complicado pelas dificuldades encontradas nos sistemas de coleta de dados e influência do homem no sistema hidrológico (XIXI LU; HIGGITT, 2001).

Estima-se que no estado de São Paulo, 80% da área cultivada seja passível de erosão além dos limites de tolerância, com a perda anual de 200 milhões de toneladas de solo (GOUVEIA, 1996).

Honda e Ochai (1998) estudaram erosão em parcelas experimentais de solos de textura média em Assis/SP e mostraram que o escoamento superficial da parcela com cana-de-açúcar foi 100 vezes maior que aquela ocupada por reflorestamento com espécies nativas e piso de braquiária (*B. decubensis*) e a concentração de sólidos suspensos totais foi de 6,42 vezes maior. Comparando-se com parcela de solo descoberto, este teve um escoamento superficial 21,3 vezes maior que o da cana-de-açúcar (MARTINS; COIADO, 2000).

Os mesmos autores, em seu estudo sobre erosão numa bacia onde predomina a citricultura, com 166 ha em Limeira/SP, mostram que os sedimentos em suspensão apresentam boas relações com a vazão. Esse comportamento mostrou a influência das características de solo mais coeso, de cultura menos exigente em

movimentação do solo e elevado comprimento médio do escoamento superficial, na produção de sedimentos suspensos neste sistema hídrico.

Em seus estudos sobre a produção de sedimentos em uma pequena bacia em urbanização, Paiva e Costas (2002), utilizaram tanto um amostrador automático (ANA/USU-59) de nível ascendente quanto um amostrador manual MAS-1. Dessa forma foi possível traçar uma curva Concentração de sedimentos X Vazão, resultando numa correlação direta correspondente à curva-chave de sedimentos para a seção estudada.

Paiva, Paiva e Paranhos (2000) realizaram monitoramento na bacia hidrográfica afluente ao Reservatório do Vacacaí Mirim – Santa Maria/RS com intuito de calibrar os parâmetros da MUSLE (Equação Universal de Perda de Solo), constatando que a produção de sedimentos por evento se ajusta bem ao produto vazão de pico e volume escoado.

A realização de medições de sedimentos nos cursos d'água deve ser constante, principalmente se existir nesse curso um barramento, seja ele para captação, geração de energia ou usos múltiplos, porém a rede sedimentométrica brasileira é carente de informações e pouco densa, obrigando o planejamento muito criterioso quando se pretende realizar pesquisas dessa natureza. Foi o que fizeram Senhorelo e Teixeira (2000) em seus estudos, quando planejaram campanhas de medição igualmente distribuídas entre estação chuvosa e seca.

Dessa forma, além de dados sobre tipo e ocupação do solo, os autores puderam chegar à conclusão de que, na região serrana do Estado do Espírito Santo, a produção de sedimentos depende de uma série de fatores naturais (chuva, solo, relevo), mas é determinada pelo uso do solo, sendo que a quantidade de sedimento transportada para os rios parece estar bem relacionada ao percentual de cada bacia

que está sofrendo ações antrópicas, ou seja, quanto maior a intervenção humana em uma área, maior deve ser a movimentação de solo na bacia (CAIADO, 1994).

### **3.2. Sedimentologia em reservatórios**

Barragens são utilizadas pelos povos a mais de 4500 anos; durante todo esse tempo suas funções foram sendo modificadas. Na antiguidade serviam especificamente para necessidades urbanas e comunidades rurais. Da mesma forma, se tornaram instrumentos de gerenciamento hídrico possibilitando um nível seguro de água para abastecimento urbano e comunidades agrícolas, sendo sempre projetos pequenos (STERNBERG, 2004).

A construção de uma barragem e a formação do seu reservatório modificam as condições naturais do curso d'água (CARVALHO, 1994). Essas alterações acabam por modificar também o regime de equilíbrio entre os sedimentos, nutrientes e biota do ambiente aquático, pois as velocidades de fluxo diminuem significativamente, além de a seção transversal aumentar e alagar áreas anteriormente cobertas por vegetação.

Todos esses fatores contribuem para a deposição das partículas carregadas pelo curso d'água, trazendo conseqüências como a diminuição do volume do reservatório, alagamentos nas regiões de remanso, erosões à jusante da barragem, modificações na carga de nutrientes, entre outros.

Sobre a evolução dos estudos de assoreamento no mundo, Carvalho (2000) diz que

[...] estudos referentes a assoreamento na literatura internacional se iniciaram na década de 30, destacando-se Fiock (1934), Grover e Howards (1938) e Eakin (1939). Já no Brasil, somente no início da década de oitenta foi dada maior ênfase ao assunto, com os estudos de Ponçano et al. (1981), Gimenez et al. (1981) e Carlstron Filho et al. (1981), quando apresentaram

métodos de análise de assoreamento para os reservatórios de Capivari (PR), Passo Real e Ernestina (RS), respectivamente.

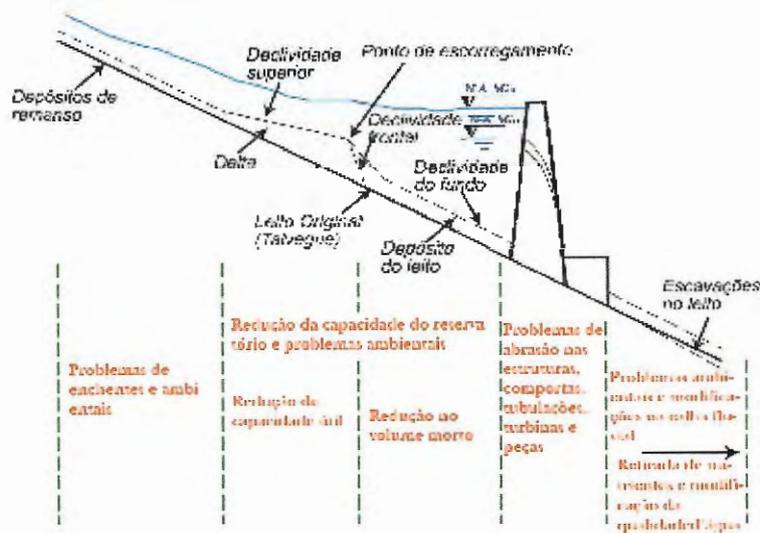
O assoreamento de reservatórios constitui-se num problema de graves conseqüências hidráulicas e econômicas, chegando mesmo a colocar em risco o desempenho de obras de geração de energia elétrica, de abastecimento e de navegação (MAIA, 2006).

Pequenos lagos estão sujeitos a assoreamentos rápidos, até mesmo em uma única cheia, já nos grandes esse tempo pode ser de 1000 anos. Porém as conseqüências nas regiões do delta (área de remanso) podem prejudicar a navegação num tempo muito menor, além do acúmulo de nutrientes facilitar a proliferação de macrófitas que podem se alastrar por todo o reservatório. (BORGES et al., 2000).

A Figura 3 mostra a seção longitudinal de um reservatório e os tipos de depósito que nele se formam. Logo no início da interface rio/lago ocorrem os chamados depósitos de remanso cujas partículas características são de grande diâmetro. À medida que se vai avançando rumo à barragem, outras partículas são depositadas, fato que ocorre pelo aumento da área molhada da seção acompanhada pela diminuição das velocidades de escoamento.

A barragem impede a passagem das partículas e, juntamente aos outros fatores já mencionados, possibilita então o depósito das mesmas. A distribuição dos depósitos de sedimentos não é uniforme, podendo haver áreas com maiores ocorrências de sedimentação que outras (BORGES et al., 2004).

Problemas trazidos pela deposição de sedimento no reservatório dizem respeito, principalmente, à redução do seu volume. Essa redução interfere no uso para o qual o mesmo foi construído, como geração de energia, abastecimento público, industrial ou irrigação, contenção de enchentes, dentre outros.



**Figura 3: Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios (modificado de CARVALHO, 1994).**

Ainda vinculados à sedimentação, destacam-se problemas operacionais como: abrasão de componentes, tubulações e pás de turbina; problemas mecânicos nas manobras das eclusas e comportas; dificuldade ou impedimento da captação d'água pela estrutura de tomada d'água; afogamento dos locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes; formação de bancos de areia diminuindo o calado para a navegação, além de afetar a segurança da barragem.

As modificações que ocorrem no fundo do reservatório podem ser observadas, uma vez que o leito original é sobreposto por camadas de sedimentos provindos de toda a bacia contribuinte. Existe uma região logo no início do reservatório (Delta) cujo volume de deposição provoca o acúmulo de partículas de grande diâmetro, formando um obstáculo para o escoamento. Essa deposição acarreta no prolongamento do efeito de remanso e conseqüente elevação de níveis de enchente a montante. Em alguns casos ocorre até o aparecimento de ilhas antes inexistentes (CARVALHO, 1994).

Passando por essa região, a velocidade de fluxo torna-se muito baixa e isso provoca condições favoráveis para a sedimentação das partículas que ainda estão suspensas. Essas partículas são de diâmetro bem menor quando comparadas às que se depositaram na região do Delta, e por isso sua deposição ocorre em toda extensão do reservatório e as movimentações dos depósitos são comuns.

Não só a montante da barragem que ocorrem problemas com a alteração do fluxo de sedimentos, a jusante também se observa sua influência, uma vez que a diminuição da carga de partículas em suspensão gera condições favoráveis à erosão nas margens e leito do rio (CARVALHO, 1994 e MAIA, 2006).

Além dos problemas de assoreamento e conseqüente perda de volume, também ocorre o acúmulo de nutrientes na água, fator que propicia a reprodução de organismos em toda a superfície do lago, o que pode causar problemas quanto à operação da casa de máquinas, como abrasão excessiva nas turbinas, impedimento da passagem da água pelas grades da tomada d'água, entre outros.

O assoreamento de um reservatório é algo inevitável, pois sempre haverá interferências na área da bacia hidrográfica que acabam por desestabilizar o equilíbrio sedimentológico que essa se encontra, no entanto tanto a estimativa inicial quanto o acompanhamento durante a operação do mesmo devem ser realizados para que a vida útil seja respeitada.

Estudos sedimentológicos devem ser realizados em todas as fases do aproveitamento hidroelétrico, desde o planejamento (inventário, viabilidade e projeto básico) até a fase de operação (CARVALHO, 2000). Tanto nas fases de inventário quanto de viabilidade e projeto básico faz-se uma estimativa de o quanto o transporte de sedimentos pode assorear o reservatório e assim projeta-se uma vida útil para este. Porém é na fase do aproveitamento já em operação que se tem que

tomar maiores cuidados, pois a ocupação desordenada e não planejada da bacia pode muito bem diminuir sua vida útil.

É nesta fase que os efeitos da ocupação do solo, fruto do desenvolvimento provocado pelas obras, devem ser contabilizados de maneira mais rigorosa. Muitas vezes as estimativas iniciais não se confirmam por uma série de fatores.

Outros parâmetros da bacia hidrográfica, que não só materiais em suspensão provenientes da carga de lavagem, influenciam a taxa de sedimentação do reservatório. Alguns dos mais importantes são: o tamanho e a forma do reservatório; a razão entre a capacidade do reservatório e tamanho da bacia; razão entre a capacidade do reservatório e o deflúvio afluente; topografia da bacia, uso da terra e cobertura vegetal, declividade e densidade da rede de canais; e características físicas e químicas do sedimento afluente, forma de operação do reservatório e o clima característico na área (MAIA, 2006).

Para esse acompanhamento sistemático citam-se: o levantamento de uma rede sedimentométrica, cuja proposta é coletar sedimentos nas diversas épocas do ano e em diferentes locais dentro da represa e seus principais afluentes; levantamentos batimétricos que resultam na indicação da evolução dos depósitos de sedimentos no fundo do lago; estudos para acompanhamento da erosão na bacia do reservatório e à jusante do mesmo, através de imagens aéreas, de satélite e comparação de parâmetros relacionados a tal efeito.

O levantamento batimétrico é necessário para determinação da disponibilidade hídrica através das curvas Cota x Área x Volume, possibilitando desta forma a verificação do volume do reservatório, depósito de remanso, entre outros. A frequência desses levantamentos varia conforme o tamanho e o acompanhamento dos reservatórios, podendo ser de 2 em 2 anos para pequenos

reservatórios, variando até 10 em 10 anos para sistemas de maior porte, que não apresentam grande variação nos intervalos de tempo observados anteriormente (CARVALHO, 1994).

Em Santa Maria/RS, parte do abastecimento público é realizado através do reservatório de regularização na bacia do Arroio Vacacaí Mirim. A bacia hidrográfica de contribuição apresenta grandes declividades e vem sofrendo efeitos da ação antrópica. Em 1997, foi realizada batimetria no Reservatório do Vacacaí Mirim, verificando-se uma redução de 23% do seu volume útil, em 25 anos de operação. (PAIVA; PAIVA; PARANHOS, 2006).

O reservatório de Cariobinha operado pela CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz do Estado de São Paulo) já foi esvaziado em duas ocasiões, em 1986 e em 1992, para a desobstrução da tomada d'água (MAIA, 2006).



Figura 4: Vista da tomada d'água do Reservatório de Cariobinha (MAIA, 2006).

Nas Figura 4 e Figura 5 pode-se visualizar a tomada d'água, com 2/3 da sua altura obstruída, no seu esvaziamento em 1992. A Figura 5 apresenta as grades da tomada d'água (direita) e da comporta de fundo (esquerda) no início dos trabalhos

de desobstrução e a Figura 6 apresenta o andamento do processo de desobstrução após uma semana de trabalho.



**Figura 5: Vista das grades da tomada d'água e da comporta de fundo do Reservatório de Cariobinha. Início da desobstrução (MAIA, 2006).**



**Figura 6: Vista das grades da tomada d'água e da comporta de fundo do Reservatório de Cariobinha, durante os trabalhos de desobstrução. (MAIA, 2006).**

Palmieri, Shah e Dinar (2001) concluem que a maioria dos reservatórios no mundo tem problemas de redução de capacidade por causa do assoreamento excessivo e, não somente a redução ocorre, como também o aumento do custo

social devido à poluição acrescido ao número de barragens não aproveitadas de maneira satisfatória.

### **3.3. Medição do Assoreamento**

As estimativas de transporte de sedimento devem ser realizadas nas fases iniciais de implantação da obra, através de estações sedimentológicas instaladas em pontos estratégicos por toda a área da bacia e nos principais tributários que alimentam o reservatório.

A modelagem do acúmulo de sedimentos é descrita por Marot, Bouchard e Alexis (2005) como sendo uma forma de prever os seus efeitos no reservatório e à montante do mesmo, utilizando para tal, modelos numéricos, observações em campo e coletas de dados. Em seu estudo, os autores concluem que houve uma alteração do fundo do reservatório Grangent , em média de 1,90m, no rio Loire na França.

Os métodos indicados para o cálculo do volume de sedimento depositado em reservatórios não se alteraram muito, sendo que são necessários os seguintes dados: descarga sólida que entra no reservatório; eficiência de retenção do reservatório; peso específico dos sedimentos depositados e distribuição dos depósitos de sedimentos em toda extensão do reservatório (MAIA, 2006).

Para reservatórios pequenos, um método utilizado é o do contorno do reservatório, que usa essencialmente os procedimentos de mapeamento topográfico por aerofotogrametria, obtendo-se fotos do reservatório nos mais diversos níveis.

Defini-se por quantidade de sedimento depositada no reservatório ( $Q_{td}$ ), durante um dado período de tempo é definida pela Equação 1 (COIADO, 2001 e MAIA, 2006):

$$Q_{id} = Q_{st} - (Q_{ed} + Q_{ss}) \quad (1)$$

Onde:

$Q_{st}$  -- Descarga sólida total que entra no reservatório (t/ano);

$Q_{ed}$  -- Quantidade de sedimentos que sai pelas estruturas de descarga no período considerado (t/ano);

$Q_{ss}$  -- Quantidade de sedimento mantida em suspensão não retida pelo reservatório no espaço de tempo considerado (t/ano).

Em grandes reservatórios considera-se  $Q_{ss}$  nulo, sendo que a relação se resume:

$$Q_{id} = Q_{st} - Q_{ed} \quad (2)$$

A medição de descarga de sedimentos é uma forma usual de acompanhar e prever a vida útil de um reservatório já que, acompanhando sistematicamente a evolução da quantidade de sedimentos produzida pela bacia, podem-se realizar intervenções no entorno do reservatório para que essa quantidade diminua, aumentando assim a vida útil (CARVALHO, 2000).

A carga de sedimentos em suspensão nos rios é medida em amostras de água e expressa em partes por milhão (ppm). Em geral colhem-se amostras em uma garrafa, de capacidade conhecida, fixada em um coletor projetado de forma a não provocar desvio das linhas de corrente. (LINSLEY; FRANZINI, 1978).

Outra maneira de se acompanhar o assoreamento de um reservatório é através de técnicas de geoprocessamento. Vilhena et al. (2003) as aplicaram num braço do reservatório de Funil, no rio Paraíba do Sul, e concluíram que durante os anos de 1965 e 1995, houve perda de 22,93% na capacidade de armazenamento, e projetaram que em 2002 o valor seria de 33%.

Estimar a produção de sedimentos através da USLE, *Universal Soil Loss Equation*, é uma forma também difundida que visa quantificar o assoreamento em

reservatórios (WILLIANS, 1975). Através de uma equação com algumas constantes e outros parâmetros dependentes da bacia, estima-se a produção de sedimentos na área desejada. Muitos autores contestam a utilização desse método visto que seus valores são superestimados, conforme comprova Bellinaso (2002). Medição dos sedimentos na calha do rio é o mais indicado, uma vez que a medição da erosão é um processo complexo.

White, Butcher e Labadz (1996) utilizaram metodologia de comparações batimétricas no reservatório de Strines, a oeste de Sheffield, Reino Unido, cuja área de drenagem é de 11,26 km<sup>2</sup>. Nesse estudo utilizaram dados de 1869, 1956, 1993 e 1994. Comparando as perdas nesse período, chegam à conclusão que o reservatório perdeu 10,51% de sua capacidade de armazenamento, sendo 4,44% de 1869 a 1956 e 6,07% de 1956 a 1994. O incremento maior no último período pode ser explicado de diversas formas, como imprecisões na estimativa inicial, evolução da ocupação das áreas ao entorno do reservatório e diminuição da cobertura florística.

No caso desse procedimento, as dimensões do reservatório, bem como sua importância econômica e social é que definem o detalhamento mínimo para aquisição de dados (BRUK, 1985). Para médios e grandes reservatórios de geração de energia, sempre é indicado o uso das melhores tecnologias disponíveis, pois a colocação estratégica desse tipo de empreendimento na economia nacional é indiscutível.

Para sua realização utilizam-se cartas topográficas e batimétricas atualizadas que são digitalizadas. Com o auxílio de um software, gera-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) atual, que será comparado com o MDT de cartas de épocas anteriores.

Essa comparação requer alguns cuidados, como indicação correta das seções de controle. Muitos dos reservatórios hoje em operação não possuem levantamentos de sua época de enchimento ou, quando possuem, estão em forma de mapas não digitalizados. A digitalização dessas informações se faz necessária para que a comparação com as novas campanhas batimétricas seja realizada de forma mais rápida e precisa.

De posse dos dados de profundidade, coletados digitalmente ou resultado da digitalização de mapas, pode-se utilizar ferramentas de geoprocessamento para realizar a comparação em épocas distintas. A utilização em conjunto de ferramentas que possibilitam a geração de MDT's representativos para a área estudada torna esse tipo de levantamento ainda mais confiável.

Numa seção transversal é possível identificar os perfis que mostram o quanto (em área) os sedimentos evoluíram (Figura 7).

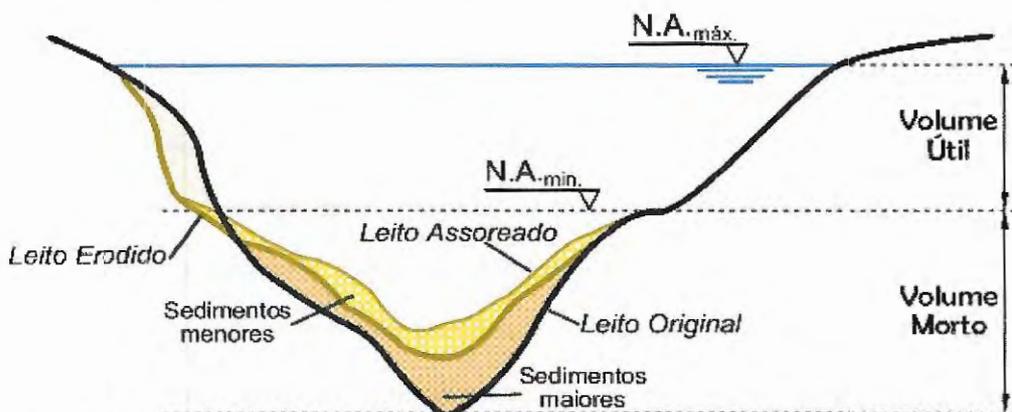


Figura 7: Perfil longitudinal de uma seção batimétrica e sua evolução da sedimentação. (Fonte: modificado de USDI, 1987)

Uma peculiaridade ocorre quando apenas a medição dos sedimentos é realizada com frequência, não sendo possível estimar dentro do reservatório quais as áreas mais afetadas e também não é possível saber o quanto efetivamente de partículas já se depositou no seu fundo. Indica-se, no entanto, não só os

levantamentos sedimentométricos, com suas granulometrias, cristalografia, e outras características, mas também é necessária a realização de levantamentos batimétricos, como já exposto anteriormente, para o melhor planejamento das ações anti-assoreamento.

A Tabela 1 mostra alguns reservatórios brasileiros parcial ou totalmente assoreados (CARVALHO, 1994).

Tabela 1: Alguns reservatórios brasileiros parcial ou totalmente assoreados (CARVALHO, 1994)

Reservatório	Curso d'água	Proprietário	Finalidade
<b>Bacia do São Francisco</b>			
Rio das Pedras	Velhas	CEMIG	UHE - 10 MW
Paraúna	Paraúna	CEMIG	UHE - 32 MW
Pandeiros	Pandeiros	CEMIG	UHE - 4,2 MW
Acabamundo	Acabamundo	DNOCS	Controle de cheias
Arrudas	Arrudas	DNOCS	Controle de cheias
Pampulha	Pampulha	DNOCS	Controle de cheias
<b>Bacia Atlântico/Leste</b>			
Funil	Contas	CHESF	UHE - 30 MW
Pedras	Contas	CHESF	UHE - 23 MW
Peti	Santa Bárbara	CEMIG	UHE - 9,4 MW
Brecha	Piranga	-	UHE - 10,5 MW
Piracicaba	Piracicaba	Belgo Mineira	-
Sá Carvalho	Piracicaba	Acesita	UHE - 50 MW
Dona Rita	Tanque	-	UHE - 2,41 MW
Salto Grande	Santo Antônio	CEMIG	UHE - 104 MW
Tronqueiras	Tronqueiras	-	UHE - 7,87 MW
Bretas	Suaçuí Pequeno	-	-
Mascarenhas	Rio Doce	ESCELSA	UHE - 120 MW
Paraitinga	Paraitinga	CESP	UHE - 85 MW
Jaguari	Jaguari	CESP	UHE - 27,6 MW
Una	Una	PM Taubaté	Abast. de água
<b>Bacia do Paraná</b>			
Caconde	Pardo	CESP	UHE - 80,4 MW
Euclides da Cunha	Pardo	CESP	UHE - 108,8 MW
Americana	Atibaia	CPFL	UHE - 34 MW
Jurumirim	Paranapanema	CESP	UHE - 22 MW
Piraju	Paranapanema	CPFL	UHE - 120 MW
Presidente Vargas	Tibaji	Klabin	UHE - 22,5 MW
Poxoréu	Poxoréu	CEMAT	-
São Gabriel	Coxim	ENERSUL	UHE - 7,5 MW
Ribeirão das Pedras	Descoberto	CAESB	Abast. de água
São João	São João	ENRSUL	UHE - 3,2 MW
<b>Bacia do Uruguai</b>			
Caveiras	Caveiras	CELESC	UHE - 4,3 MW
Silveira	Santa Cruz	CELESC	-
Celso Ramos	Chapecozinho	CELESC	UHE - 5,76 MW
Furnas do Segredo	Jaguari	CEEE	-
<b>Bacia Atlântico/Sudeste</b>			
Santa Cruz	Tacanica	CCPRB	UHE - 1,4 MW
Pirai	Pirai	CELESC	UHE - 1,37 MW
Ernestina	Jacuí	CEEE	UHE - 1,0 MW
Passo Real	Jacuí	CEEE	UHE - 125 MW

### 3.4. Teoria de Geoprocessamento

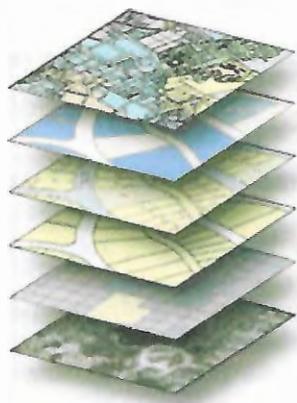
Geoprocessamento é um conjunto de conhecimentos destinado ao tratamento das informações referentes aos objetos, ocorrências ou fenômenos que são associados às posições relativas na superfície da Terra (RÖHM, 2007).

Geoprocessamento pode ser definido como a representação do mundo real, físico, onde cada aspecto, variável, característica e/ou propriedade desse mundo real se encontra num único mapa (geralmente organizado com diversas camadas), sendo que cada uma dessas camadas representa características específicas dentro da área geográfica estudada (TOMLIN, 1990).

A Figura 8 apresenta dois exemplos de mapas temáticos. Informações como os lotes ocupados, vias de acesso e sentido do trânsito, relevo e mapas de tubulações de água, esgoto e gás podem ser representadas nesses mapas elaborados para zona urbana. É indicado quando se pretende realizar intervenções nessas áreas, podendo simular as novas condições pretendidas e obter os resultados menos impactantes, tanto no ponto de vista do transporte público, áreas afetadas e conseqüências ambientais.

Por outro lado, no caso de estrutura do solo, o mapeamento auxilia quando se pretende realizar explorações subterrâneas, por exemplo, na mineração, uma vez que os custos para a extração de minério são elevados e o correto planejamento das atividades reflete em um menor custo do processo. No caso de exploração de águas subterrâneas, conhecer a estratificação do subsolo se torna interessante para garantir melhores aproveitamentos através do planejamento mais eficaz de utilização desse recurso.

### Mapas temáticos na zona urbana



### Mapas de estrutura do solo



Figura 8: Mapas temáticos representando características (Fonte: O autor)

A complexidade de avaliação pelo geoprocessamento, do como as diversas variáveis se comportam no mundo real, não é compatível com a capacidade de processamento dos sistemas atuais, causando assim uma inconsistência que é contornada considerando-se simplificações. Essas simplificações são necessárias para que se possam criar modelos com o propósito de verificação de cenários, estratégias de planejamento e desenvolvimento de regiões (MENDES; CIRILO, 2001).

O geoprocessamento pode ser considerado como uma das técnicas que permitem modelar o ambiente (mundo real), porém requer muita atenção por parte de quem desenvolve os trabalhos, pois essa modelagem traz consigo uma série de riscos, como por exemplo:

- Visão da realidade excessivamente formalizada;
- Estruturação dos problemas de uma forma muito mais exata do que permitem os dados utilizados, resultando em previsões inadequadas;
- Ansiedade, quanto do desenvolvimento de modelos, pela generalidade;

- Atitudes de desprezo, quando do desenvolvimento de modelos, pelo caso particular.

Diante desses fatores, as informações obtidas por modelos devem ser bem avaliadas para que não se incorra em erros grosseiros ou até mesmo em obter um trabalho cuja precisão é nula (MENDES; CIRILO, 2001).

O entendimento do ambiente envolve processos cognitivos como seleção, generalização e síntese, formando um conjunto de informações. A representação física destas informações (dados) constitui um modelo do processo observado. Um conjunto de dados constitui-se na representação física de vários processos do ambiente, tais como processos sociais, geológicos, hidrológicos, etc. A Figura 9 ilustra o processo de elaboração de um modelo conceitual, lógico e os resultados obtidos

Para elaboração desses modelos são necessárias diversas observações do ambiente, sendo que a equipe responsável deve identificar o maior número de detalhes possíveis. Algumas dessas informações devem ser filtradas antes de serem lançadas ao computador, pois como já dito, os sistemas atuais não são capazes de trabalhar com uma quantidade excessiva de dados (MENDES; CIRILO, 2001).

A elaboração do modelo conceitual, seguida pelo modelo lógico, permite o uso de computadores para realização das mais diversas análises e simulações. Até esse ponto, a experiência da equipe de trabalho é o fator mais significativo para se obter resultados confiáveis. A elaboração, coerente com a realidade, dos modelos citados permite que os resultados (gráficos, relatórios, mapas, etc.) se tornem ferramentas eficazes no processo de tomada de decisão.

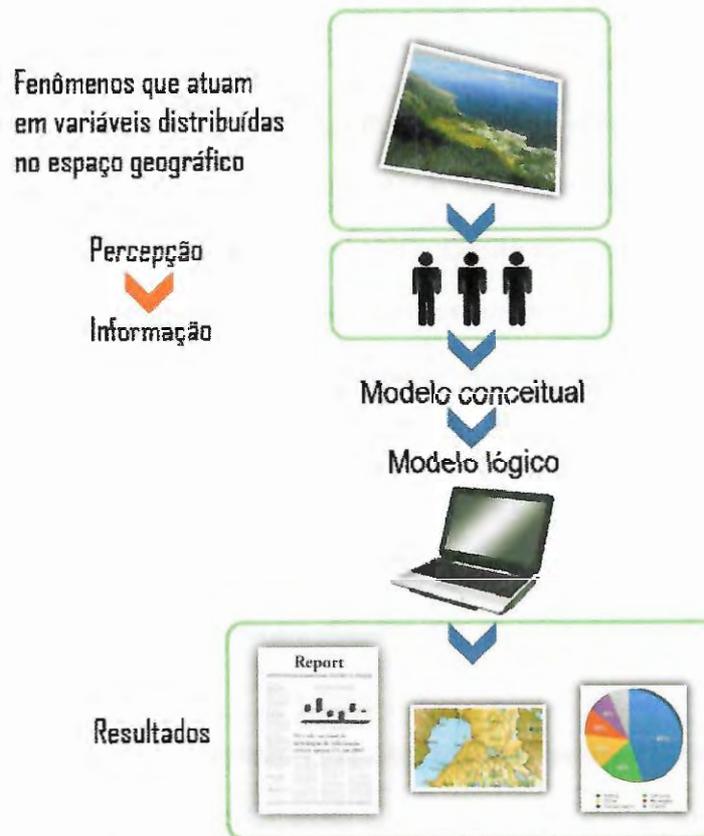


Figura 9: Processo de elaboração de um modelo conceitual. (modificado de MENDES e CIRILO, 2001)

### 3.4.1. Importância do geoprocessamento nos recursos hídricos

À medida que as regiões se desenvolvem, mais intenso é o uso dos recursos hídricos, maior o potencial de conflitos entre os usos e maiores os riscos de degradação ambiental gerada pelas atividades antrópicas.

Devido à escassez de água em quantidade e qualidade em muitas regiões do Brasil e do mundo, a gestão eficaz dos recursos hídricos levando em consideração a escassez bem como sua valoração econômica, é uma tarefa que os órgãos responsáveis devem almejar a excelência e evolução contínua.

O rio é o destino final da trajetória da água na bacia hidrográfica. Segundo essa ótica, é também o reflexo de qualquer ação que ocorra, e que altere de forma significativa o equilíbrio natural do território, uma vez que os efeitos destas atividades se farão sentir de alguma forma naquele elemento. Neste sentido o rio pode ser considerado um indicador do estado de equilíbrio da área drenada, caracterizando ou não o nível de sustentabilidade da região (MENDES; CIRILO, 2001).

Esta relação de causa e efeito entre o que ocorre na superfície da bacia e o que posteriormente é transferido para o canal tem sido muitas vezes negligenciada em projetos de planejamento de recursos hídricos, pois, em geral, as fontes causadoras de problemas ambientais estão distribuídas ao longo do espaço da bacia. O curso d'água se insere então neste contexto como um elemento integrador, acumulando de montante para jusante os efeitos de qualquer atividade que se desenvolva na bacia.

O planejamento do uso das águas deve estar sempre presente em projetos de desenvolvimento regional e em esquemas de ordenamento territorial, e o conhecimento da localização e distribuição das atividades antrópicas no espaço geográfico e sua variação ao longo do tempo configuram-se como um importante elemento da questão, posto que é possível a proposição de estratégias e ações objetivando uma melhor distribuição das atividades produtivas e de proteção dos recursos naturais.

Historicamente o aproveitamento de água tem sido caracterizado pela gestão da oferta. Quando a água se torna escassa buscam-se soluções para o aumento da oferta por meio de novos investimentos na infra-estrutura, como barragens. Essa visão do fornecimento de água passa hoje por mudança, uma vez que não se deve

pensar somente no aumento da oferta de água ao público, mas principalmente numa forma de racionalizar o seu consumo, uma vez que as dificuldades de abastecimento são visíveis, principalmente nos grandes centros e em países industrializados (MENDES; CIRILO, 2001).

No Brasil cabe ao poder público (Governos Federal, Estaduais e Distrito Federal) o poder de outorga dos recursos hídricos. É prevista ainda na legislação atual, o valor econômico da água, sendo necessária a cobrança pelo uso. Mecanismos de incentivo podem e devem ser observados pelos órgãos responsáveis por essa cobrança, de forma a viabilizar economicamente o empreendimento e também possibilitar que locais onde exista a "produção de água" tenham subsídios para a sua preservação.

Dessa forma, as ferramentas de geoprocessamento se tornam indispensáveis para que o bom planejamento dos usos e preservação dos recursos hídricos seja decidido com a melhor eficiência possível. A sua utilização de forma criteriosa pode fornecer muitas informações importantes para serem consideradas durante a vida útil do projeto.

### **3.5. Digitalização de dados**

Existem dois métodos de digitalização disponíveis: manual e automático. Para decidir qual método utilizar, deve ser feita uma ponderação, uma vez que existem cartas complexas com diversas informações sobrepostas (cartas do IBGE) e outras cartas simplificadas contendo informações seletivas (mapas cadastrais de lotes, por exemplo).

O método manual consiste na coleta de todas as informações relevantes na carta através da ação do operador. Este identifica, marca e transfere para meio digital as informações contidas em toda a carta. Já o método automático consiste em

programar um algoritmo no computador para que a máquina decida quais informações devem ser transformadas em meio digital.

O primeiro é indicado para ambos os tipos de cartas, complexas ou não, sendo permitido ao operador do equipamento determinar regiões mais críticas ou importantes, merecendo assim maior atenção e cuidado durante o processo. O segundo é recomendado quando as cartas apresentam poucas informações e possuem boa qualidade.

O processo de rasterização de documentos cartográficos é realizado com o suporte da tecnologia que envolve o uso de *scanners* (MENDES; CIRILO, 2001). Raster é um formato de imagens de computador cujas informações são dispostas como uma matriz, como ilustrado na Figura 10.

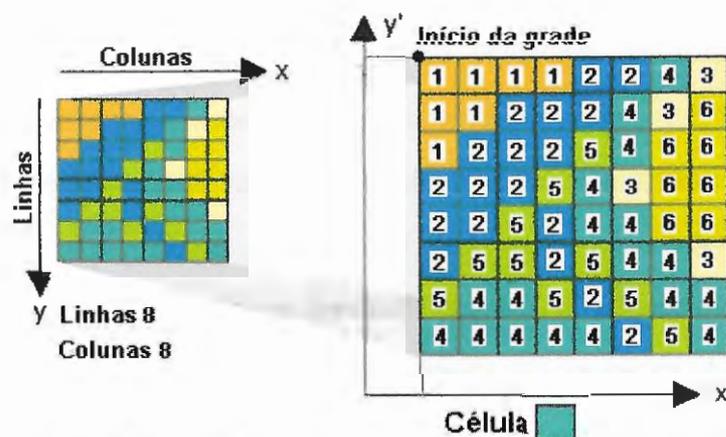


Figura 10: Exemplo de imagem tipo raster (modificado de MENDES e CIRILO, 2001)

Após a rasterização do mapa, procede-se a um pós-tratamento das informações obtidas, que consiste em minimização das espessuras das linhas (*thinning*); vetorização, transformando as informações apresentadas nas matrizes em pontos, linhas e/ou áreas; generalização, eliminando a informação desnecessária e; codificação, associando atributos às entidades vetoriais geradas.

Existe ainda a possibilidade de digitalização através de mesa digitalizadora, cujo procedimento é semelhante à rasterização seguida de vetorização, porém a operação deste equipamento exige mais tempo e trabalho comparada ao *scanner* (MENDES; CIRILO, 2001).

### **3.6. Modelo Digital de Terreno (MDT)**

O relevo apresenta múltiplas funções na natureza. Os ciclos de matéria e energia dos processos físicos, químicos e biológicos numa bacia hidrográfica são dependentes da topografia. Com o advento de dados em ambiente de geoprocessamento, aprofundou-se a descrição e utilização numérica do terreno através de modelos (MENDES; CIRILO, 2001).

O MDT é uma matriz (raster) de números que representam a distribuição geográfica de elevações, derivados de mapas topográficos. Dados de relevo, informações geológicas, levantamentos de profundidades do mar ou de um rio, informações meteorológicas e dados geofísicos e geoquímicos são exemplos típicos de fenômenos representados por um MDT (MONTEIRO, 2001).

Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável a elaboração e criação de um modelo digital, que pode ser representado por equações analíticas ou uma rede (grade) de pontos, de modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno (ANDERSON, 2002).

Esses modelos têm sido largamente utilizados nas Geociências, no propósito de representar as características de variáveis regionalizadas. Pode-se utilizar o MDT em conjunto com o SIG e técnicas de sensoriamento remoto para o estudo da variabilidade dos processos físicos nas bacias (MENDES; CIRILO, 2001).

O MDT é obtido em duas etapas, sendo a primeira delas referente à aquisição de dados, geralmente arquivos digitais advindos de outros sistemas ou bases

topográficas já consolidadas, como mapas do IBGE. A segunda etapa consiste na geração do modelo propriamente dito, que é realizada através de softwares para Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (FELGUEIRAS, 1995).

Existem ainda diferentes formas de geração dos modelos de terreno, os Modelos de Grade Retangular e os Modelos de Grade Triangular (MONTEIRO, 2001). Não é intuito desse trabalho detalhar as diferenças entre essas formas.

Os métodos computacionais utilizam rotinas matemáticas para a geração do relevo e dessa forma acabam por interpolar o perfil do terreno, uma vez que não é possível e nem recomendável que se obtenham muitos pontos quando do levantamento de campo. Essa interpolação acaba por gerar representações que não são verdadeiras, por isso recomenda-se que áreas notadamente com peculiaridades tenham dados levantados em maior quantidade, para preservar essas características também no modelo. Na Figura 11 é possível observar o efeito da interpolação quando não é realizado um levantamento mais detalhado numa região complexa.

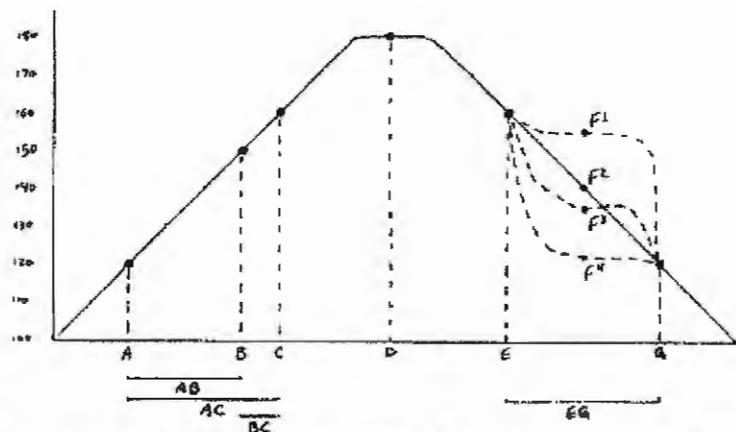


Figura 11: Representação das diferentes elevações para um ponto quando não se tem seu valor medido, determinando-se por interpolação (ANDERSON, 2002).

Na Figura 11, têm-se o perfil de um terreno obtido através de 6 pontos, sendo que o segmento  $\overline{EG}$ , passando pelo ponto F, é fruto da interpolação computacional.

Nesse ponto não se pode afirmar qual é realmente o comportamento do relevo e assim indica-se a utilização do bom senso. Quando a área é conhecida, pode-se fazer as modificações pertinentes para corrigir o traçado mais óbvio que é passando pelo ponto F2.

Na construção de um modelo é muito importante que as características topográficas da superfície sejam preservadas. Assim é interessante que o conjunto de amostras de entrada contenha as linhas características da superfície tais como: linhas divisoras de águas (linhas de máximos) e linhas de drenagem (linhas de mínimos). A estrutura do modelo de grade triangular é mais propícia para a inclusão de linhas características no modelo.

Na Tabela 2 é indicado uma relação entre o passo das curvas de nível (CN's) e a escala para a representação.

**Tabela 2: Relação entre a escala da representação e o passo entre as CN's**

<b>Escala</b>	<b>Passo (m)</b>
1:500	0,25 a 0,50
1:1.000	1,00
1:5.000	5,00
1:10.000	10,00
1:100.000	50,00

Fonte: CORDINI (2004)

Uma maneira prática de analisar essa relação é fazer a equidistância (passo) entre as CN's igual a 1 milésimo da escala, ou seja, escala 1:1.000, passo de 1m, escala 1:5.000, passo de 5m. No caso de escalas acima de 1:10.000, essa relação deve ser revista, por exemplo, adotando-se a metade dessa relação (CORDINI, 2004).

## 4. CARACTERIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO

O reservatório de Barra Bonita tem área de 310 km<sup>2</sup>, e sua barragem está localizada na sub-bacia do Médio Tietê Inferior. As Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) que contribuem para sua formação são as de número 5 (correspondente à Bacia Hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá – BHPCJ) e 10 (correspondente à Bacia Hidrográfica dos rios Tietê/Sorocaba – BHTS) (FIPAI, 2005). A Figura 12 apresenta as UGRHs do Estado de São Paulo, destacando as citadas. O braço direito do reservatório está inserido na BHPCJ, que influenciam bastante na qualidade de suas águas (FIPAI, 2005).

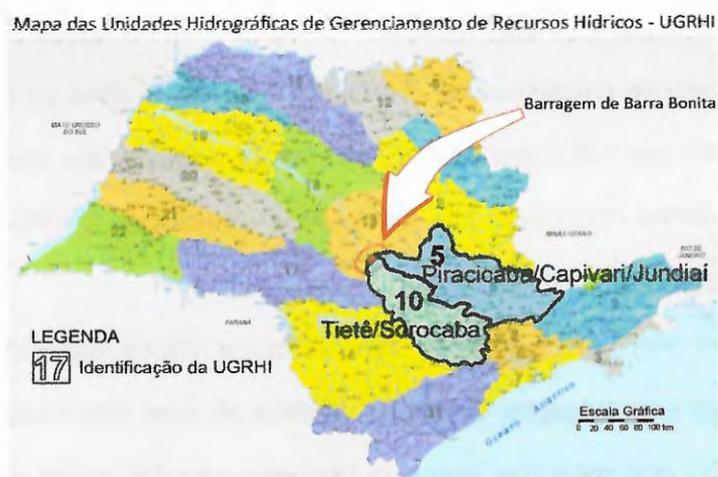


Figura 12: Distribuição das UGRH's (modificado de IGC, 2006).

A BHTS abrange a porção da bacia do Tietê que vai desde a Barragem de Pirapora, passando pela UHE de Rasgão, até o Reservatório de Barra Bonita, com 367 km de extensão e área de drenagem de aproximadamente 6.830 km<sup>2</sup>. Os principais afluentes ao reservatório incluídos nesta bacia são o rio Sorocaba, na margem esquerda, e os rios Piracicaba, Capivari e Jundiá na margem direita. As principais cidades são Sorocaba, Botucatu, Itu, Tatuí, Tietê, entre outras (CBH SOROCABA/MÉDIO TIETÊ, 2000).

A afluência das águas provenientes da Região Metropolitana de São Paulo pelo rio Tietê e também dos rios Jundiaí e Capivari acabam por inviabilizar a utilização da água sem tratamento nesse trecho para usos como abastecimento, irrigação, pesca entre outros (SIGRH, 2001 apud BRAMORSKI; VILLELA, 2005).

Problemas ambientais como degradação da qualidade da água são enfrentados tanto pela BHTS quanto pela BHPCJ.

A BHPCJ tem aproximadamente 20% de sua vazão média exportados para a bacia do Alto Tietê, pelo sistema Cantareira, e por outro lado alguns de seus municípios apresentam índice de abastecimento de água abaixo de 80% e de perda na tubulação de 30% (SIGRH, 2001). A coleta de esgoto sanitário na região atinge 76%, sendo que somente 11% são tratados (PRADO, 2004). As águas subterrâneas também correm risco de contaminação, principalmente nas regiões de Campinas e São Pedro, uma vez que 1957 toneladas de lixo são geradas por dia, das quais 26% são dispostos de forma adequada, 34% em aterros controlados e 40% são formas inadequadas de disposição (PRADO, 2004).

Esta bacia é crítica em termos de disponibilidade hídrica superficial devido a demandas elevadas para irrigação, causando conflitos de usos com o setor industrial no Baixo Sorocaba/Tatuí, além dos riscos de contaminação das águas subterrâneas (BRAMORSKI; VILLELA, 2005).

Já a BHTS é muito prejudicada pela má qualidade das águas provenientes da região metropolitana de São Paulo, situação agravada ainda com a contribuição dos rios Jundiaí e Capivari, inviabilizando o uso das águas do rio Tietê, nesse trecho, para usos como irrigação e pesca (PRADO, 2004). Cinco de seus municípios apresentam índices de abastecimento de água abaixo de 80% da população, além



de alguns índices de perda de água no abastecimento na ordem de 30%. Apenas 12% dos municípios da bacia possuem tratamento de esgoto (SIGRH, 2001).

A Figura 13 indica a localização da represa de Barra Bonita no rio Tietê, além de outras importantes no Estado. É possível identificar que Barra Bonita é a primeira grande barragem no rio Tietê, de uma série de outras 4 localizadas a jusante.

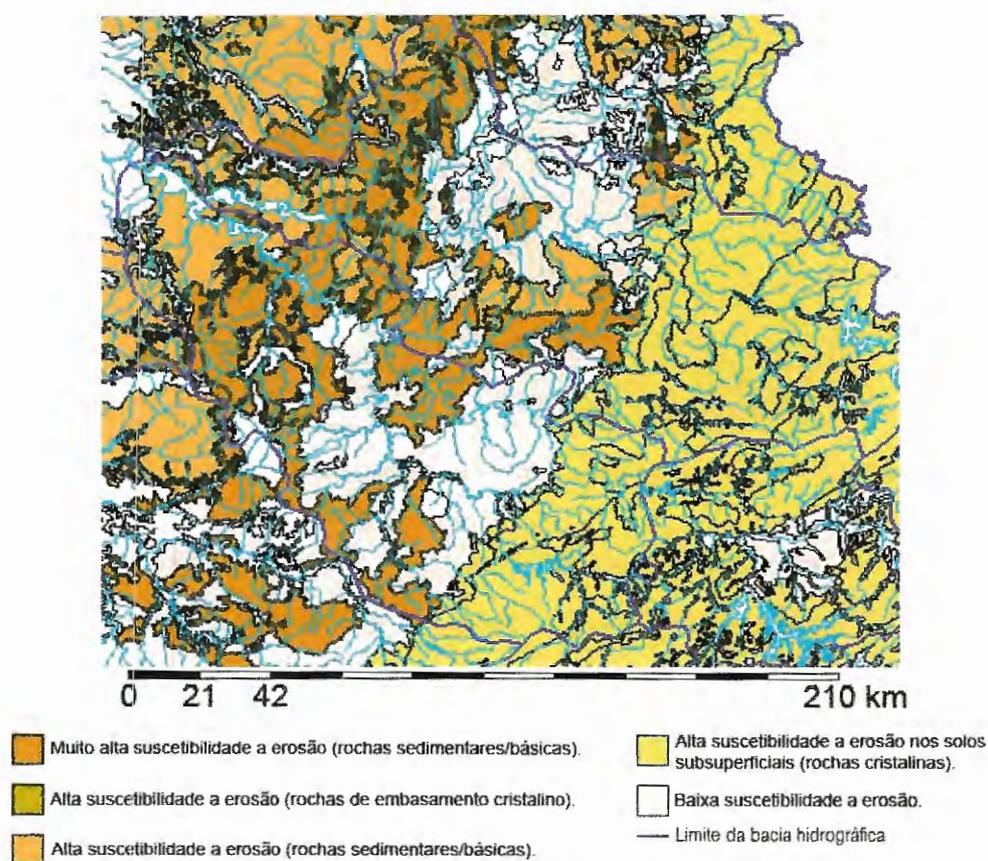


Figura 13: Localização da represa de Barra Bonita (modificado de AES TIETÊ, 2006).

A barragem tem extensão de 480 m, as cotas máxima e mínima úteis são 451,50 m e 439,50 m, respectivamente. Possui 4 turbinas com capacidade de geração de 35.190 kW/unidade e altura de queda d'água de 23,50m (AES TIETÊ, 2006).

A área total de contribuição de afluência ao reservatório é de aproximadamente 19.000 km<sup>2</sup>, sendo que se trata de uma das regiões mais populosas e desenvolvidas do interior do Estado de São Paulo, possuindo aproximadamente cinco milhões de habitantes, representando 16% da população do mesmo estado (PRADO, 2004). Os problemas referentes à qualidade da água advindos do uso e cobertura da terra são bastante representativos em toda a extensão das BHPCJ e BHTS.

Os principais setores industriais da BHPCJ são: eletroeletrônica, química, metalurgia, mecânica, agroindústria e têxtil. Na agricultura destaca-se o cultivo da cana-de-açúcar em maior escala e da laranja em menor escala. Na BHTS as principais atividades industriais estão relacionadas aos setores da metalurgia, mecânica, alimentícia, química e eletroeletrônica e na agricultura predominam os cultivos de batata, hortaliças, cana-de-açúcar (UGRHI-PCJ, 2003).



**Figura 14: Mapa de potencialidade de erosão (SIGRH, 2001).**

A Figura 14 indica as regiões identificadas pelos potenciais riscos de erosão no entorno do reservatório. Observa-se que a represa está cercada por regiões de potencial moderado ou alto, na maioria. Isso agrava ainda mais as projeções futuras de assoreamento no reservatório e comprometimento de sua vida útil.

Algumas fotos ilustram o entorno do reservatório, identificando regiões com presença de macrófitas e solo desprotegido, Figuras 15 a 18.



**Figura 15: Foto da margem do reservatório. Presença de macrófitas na água e solo desprotegido nas margens. (FIPAI, 2005)**



**Figura 16: Vista de jusante para montante do lago. Região um pouco mais protegida pela vegetação nas margens. (FIPAI, 2005)**



**Figura 17: Vista para a margem próxima ao rio Piracicaba. Solo totalmente desprotegido. (FIPAI, 2005)**



**Figura 18: Outra região com grande concentração de macrófitas. (FIPAI, 2005)**

O conceito de usos múltiplos é muito difundido atualmente, e o reservatório de Barra Bonita não poderia ser aproveitado de forma diferente. Inicialmente utilizado para a geração de energia elétrica, hoje faz parte também da hidrovia Tietê-Paraná e por sua eclusa passam 3,1 milhões de toneladas por ano de produtos como cana-de-açúcar, soja e areia (AES TIETÊ, 2006), além de exploração turística.

No que diz respeito aos usos preponderantes da água, a Figura 19 mostra a situação do Estado de São Paulo em percentagem e por bacias hidrográficas, podendo ser observado que na BHTS há um predomínio do uso da água para irrigação e na BHPCJ para o abastecimento doméstico e industrial.

## Estado de São Paulo

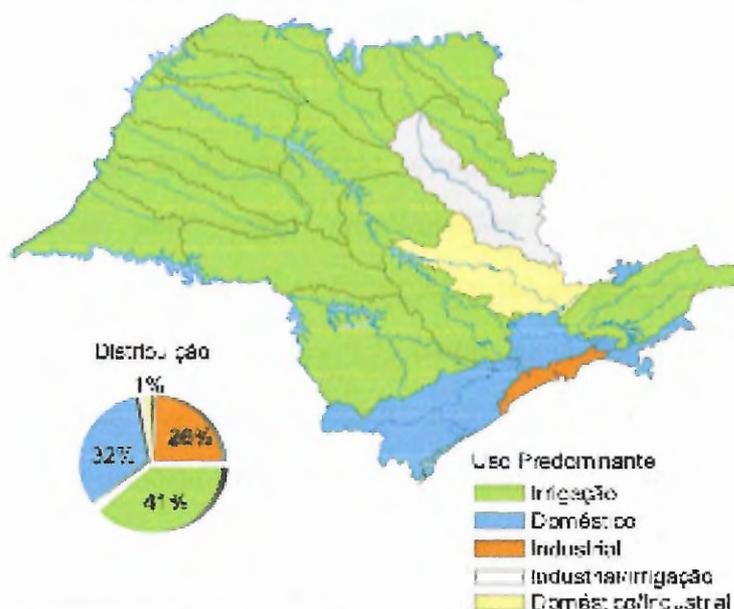


Figura 19: Usos preponderantes da água nas bacias do Estado de São Paulo com destaque para as BHTS e BHPCJ. (SIGRH, 2001).

Quanto às características naturais, o clima da região é considerado de transição entre os climas tropical e subtropical e as estações anuais não são bem definidas. Segundo a classificação de Köpen, é do tipo CWA (clima mesotérmico), com inverno seco e verão quente. De forma mais específica, segundo MONTEIRO (1973), a maior parte da área de estudo pode ser classificada, quanto aos climas zonais, como climas controlados por massas equatoriais e tropicais; quanto aos climas regionais como climas tropicais alternadamente secos e úmidos (A2) e quanto às feições climáticas individualizadas nos climas regionais segundo as unidades geomorfológicas como depressão do Perceé do Tietê (VI) (PRADO, 2004).

A classificação pedológica indica a predominância de Argissolos, Latossolos e Neossolos, sendo que as formações geológicas predominantes são Itararé, Pirambóia, Tatuí e Grupo São Roque, sendo que nas proximidades do reservatório aparecem as formações Botucatu e Serra Geral. Na geomorfologia, destacam-se os Morrotes Alongados e Espigões, Colinas Amplas e Colinas Médias, possuindo a bacia, na maior parte de sua extensão, um relevo pouco movimentado (SIGRH, 2001).

A vegetação natural foi substituída pela monocultura de cana-de-açúcar, quase que na sua totalidade (WISNIEWSKI, 1998). Cabe às Unidades de Conservação acolher os fragmentos de vegetação remanescentes. Essas Unidades são: Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí-Botucatu, APA Tietê, APA Jundiaí/Cabreúva, Parque Estadual das Monções, Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) da Mata de Santa Genebra, Estação Ecológica (ESEC) Ibicatu, Floresta Nacional (FLONA) de Ipanema e outras (PRADO, 2004).

Sendo uma área de extrema importância para o desenvolvimento do Estado de São Paulo e contando com problemas significativos no que compete aos recursos hídricos, estudos relacionados a eles se tornam necessários para o gerenciamento da bacia e o controle da qualidade da água do reservatório de Barra Bonita, que atende aos usos múltiplos na região.

## 5. METODOLOGIA

A comparação batimétrica é citada por Carvalho (2000) como sendo uma forma de medição de assoreamento do reservatório. Silva (2005) afirma que métodos computacionais para avaliação do assoreamento vêm ganhando destaque pela possibilidade de sua simulação e previsão de cenários futuros.

Nessa linha, esse trabalho pretende fazer uso das ferramentas computacionais de forma a comparar os mapas batimétricos datados de 1980, trabalho realizado para a CESP pela empresa HIDROCONSULT, Consultoria Estudos e Projetos LTDA., para o Projeto do Traçado do Canal de Navegação do Médio Tietê e Piracicaba, e outro do ano de 2005, sendo uma parceria, via projeto de P&D, entre a concessionária de energia AES/Tietê, FIPAI e o Núcleo de Hidrometria do CRHEA/SHS/EESC/USP, coordenado pelo Prof. Dr. Frederico F. Mauad.

Além das cartas batimétricas, a CESP disponibilizou 2 gráficos Cota X Área X Volume, datados de 1966 e 1977. Esses gráficos foram também utilizados para que a comparação do avanço da perda de volume pudesse ser mais representativa. A metodologia de obtenção desses 2 gráficos não foi disponibilizada, sendo que apenas os valores das curvas puderam ser avaliados.

### 5.1. Tratamento dos dados de 1980

Mapas batimétricos datados de 1980 foram fornecidos pela CESP em papel, tornando-se necessária sua conversão para digital. Diversos métodos podem ser utilizados, como a digitalização com scanner ou com mesa digitalizadora

Os equipamentos utilizados nos levantamentos de 1980 são descritos a seguir (HIDROCONSULT, 1980):

- Sistema Radar Trisponder – Modelo R03C Decca Survey Systems Inc.;
- Ecobatímetro Raytheon – Modelo DE-719;
- Transceivers Tokai – Modelo TC-506;
- Teodolitos Wild – Modelo T1-A;
- Distanciômetros eletrônicos Wild – Modelo DI-3S e DM-2000.

Esse levantamento foi planejado sobre cartas do IBGE na escala 1:50.000, com seções transversais a cada 100 m, sendo que em trechos críticos foi de 50 m, como no corpo principal da represa, à jusante da confluência dos rios Piracicaba e Tietê. À montante dessa confluência os espaçamentos foram arbitrários. (HIDROCONSULT, 1980).

O processo de digitalização corresponde à conversão de linhas de um mapa convencional para um formato compatível com a utilização de meio computacional (NERO, 2000).

As etapas para elaboração do MDT e construção das curvas características (Cota X Área X Volume) de 1980 estão listadas abaixo:

1. Escaneamento dos mapas em papel;
2. Georreferenciamento dos mapas escaneados;
3. Vetorização das informações contidas nos mapas como curvas de nível, estradas, marcos geográficos, etc.;
4. Elaboração do MDT;
5. Construção das curvas características.

As etapas 1, 2 e 3 representam todo o processo de digitalização de cartas. Essa etapa necessita de cuidado, atenção e precisão, para que o MDT gerado e, conseqüentemente, as curvas características, possuam informações consistentes e o mais precisas possíveis. Os erros cometidos em cada uma das 3 primeiras etapas

se somam, mas o cuidado e a atenção do operador podem diminuir as conseqüências significativamente.

OS equipamentos utilizados para digitalização das cartas:

- Computador compatível IBM-PC;
- Scanner Cannon;
- Software ArcGIS;
- Software TopoGRAPH;
- Software Microsoft Excel;
- Software AutoCAD.

#### **5.1.1. Escaneamento dos mapas em papel**

Essa etapa consistiu em transportar para o computador os mapas elaborados e impressos. Pelas dimensões dos mapas, formato A2, um scanner convencional não é capaz de realizar essa etapa. Diante disso, um convênio firmado com a Universidade Federal de Itajubá propiciou que se realizasse essa operação.

Como os mapas antigos são separados em cartas por trechos do reservatório, totalizando 24 cartas com escala de 1:5.000, a operação foi repetida para cada uma delas. A Figura 20 é uma foto do processo de escaneamento.

Além das cartas em escala 1:5.000, também existe uma carta mestre, mostrando uma visão geral da divisão realizada no reservatório e a identificação de cada uma delas, Figura 21.



Figura 20: Carta batimétrica sendo captada pelo scanner. (Fonte: O autor)



Figura 21: Divisão das cartas sobre o reservatório de Barra Bonita. (HIDROCONSULT, 1980)

Escanear as imagens não é o suficiente para que se possam gerar informações digitais para uso posterior, porém essa etapa é primordial para resultar em trabalhos com precisão significativa, uma vez que é a partir dessas imagens que todo o trabalho é realizado.

### **5.1.2. Georreferenciamento dos mapas escaneados**

O processo de georreferenciamento consiste em transformar as informações disponíveis nos mapas impressos em um conjunto de informações possíveis de serem interpretadas pelo computador. Para tal, o software ArcGIS foi utilizado para realização dessa etapa.

Georreferenciar é atribuir coordenadas a um ponto, vinculando-o à um sistema de coordenadas, no caso dos dados disponíveis, O sistema de projeção utilizado foi UTM, zona 23 S, datum Córrego Alegre. Esse também é o sistema de coordenadas utilizado nos mapas confeccionados pelo Núcleo de Hidrometria em 2005. O sistema de coordenadas e da projeção utilizada devem ser padronizados para que qualquer operação, pós-processamento ou utilização desses dados, possa ser realizado de forma consistente, e evitando erros primários, como por exemplo, gerar informações com diferentes projeções. As projeções são ajustadas para melhor representar a superfície terrestre para uma determinada região. Isso significa que, quando não se utiliza projeções iguais para os mapas, podemos incorrer em erros de localização dos pontos.

### **5.1.3. Vetorização das informações contidas nos mapas**

De posse das imagens digitais e georreferenciadas, iniciou-se a vetorização das informações contidas nessas imagens. Esta é a etapa que transforma imagens em cartas digitais. As cartas digitais contêm informações possíveis de serem processadas por *softwares*, informações do autor do trabalho, além de possibilitar a reprodução e divulgação de uma forma muito mais ágil.

Ainda através do ArcGIS, todas as curvas de nível representadas nas cartas, contorno do reservatório, marcos geográficos e outras informações relevantes foram vetorizadas. Cada uma dessas informações foi separada em *layers*, sendo possível

trabalhar individualmente ou em conjunto. Os *layers* receberam os nomes das respectivas representações, facilitando a compreensão para se trabalhar com essas informações.

A operação de vetorização consiste em percorrer a imagem e gerar linhas, polígonos e pontos com as mesmas informações contidas no material impresso. É um processo repetitivo e que merece um cuidado grande para minimização de erros que prejudiquem a qualidade final do trabalho.

Os *layers* criados foram **Contorno**, **Marcos Geográficos**, **Eixo da Hidrovia**, além das **Curvas de Nível**, cada uma delas representada separadamente.

A Figura 22 ilustra um trecho do reservatório digitalizado. Essa configuração deve ser padronizada para todas as cartas de forma a manter a facilidade de tratamento de dados.

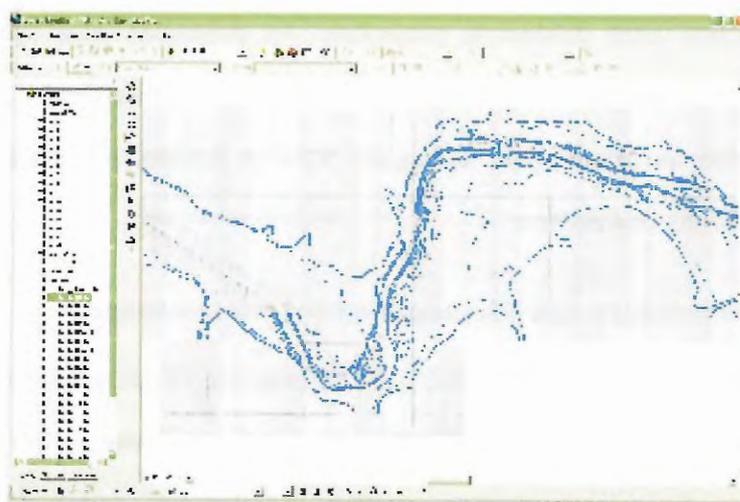


Figura 22: Tela do Software ArcGIS durante o processo de digitalização. (Fonte: O autor)

Com todas as informações relevantes elaboradas de forma digital, tornou-se possível o pós-processamento das cartas com a finalidade de geração do MDT e das curvas Cota X Área X Volume.

#### 5.1.4. Geração do MDT

De posse dos dados digitalizados, para que fosse gerado o MDT foi necessário inserir as informações no software TopoGRAPH. As formas de entrada desse software são através de tabelas ASCII ou de arquivos com extensão DXF. A segunda opção foi escolhida, uma vez que a informação visual é muito mais simples de ser interpretada num eventual erro de importação dos dados.

Através do Modelo Digital de Terreno, obtêm-se as Curvas de Nível de cada uma das cotas submersas, representadas em 3D. As curvas de nível obtidas na digitalização não contêm informações de altitude, uma vez que se preferiu gerar o mapa num plano. Essa preferência se deve à facilidade de utilização do TopoGRAPH para a finalidade de elaboração de MDT.

A cota máxima de contorno estipulada pela HIDROCONSULT (1980), que realizou os levantamentos antigos é de 448,0 m. Por esse motivo, mesmo o levantamento realizado em 2005 tendo adotado a cota máxima de 453,0 m, considerou-se apenas os valores contidos até a cota de referência 448,0 m.

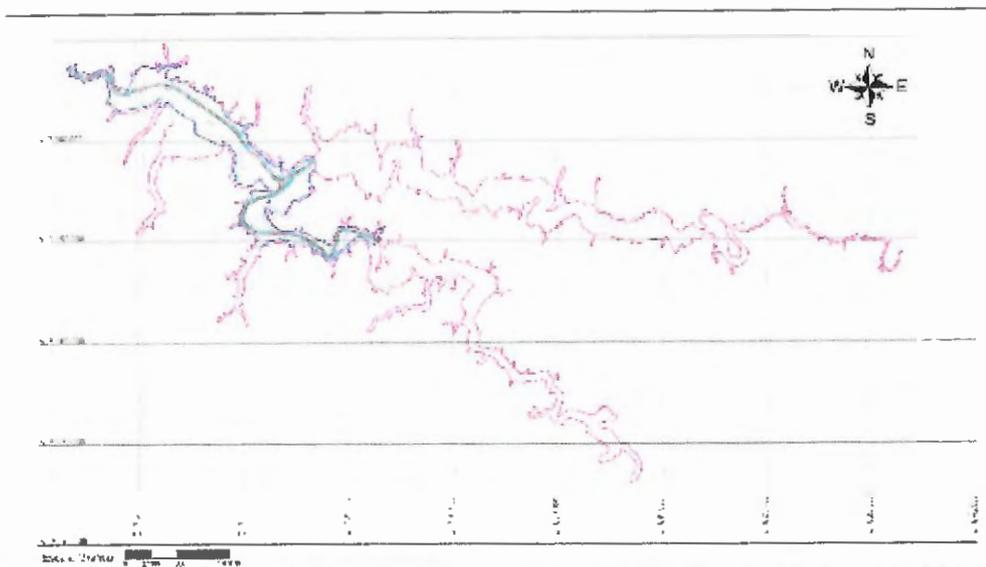
O TopoGRAPH utiliza o método de triangulação, que consiste relacionar pontos vizinhos segundo algum critério, de forma a estabelecer uma subdivisão do espaço que ocupam.

Uma triangulação qualquer nem sempre é adequada para certo problema. Para a maior parte dos algoritmos que precisam de triangulações, os triângulos precisam ser os mais equiláteros possíveis. A triangulação de Delaunay utiliza critérios para possibilitar resultados que atendam essa necessidade.

Além da triangulação de Delaunay, o TopoGRAPH possibilita a alteração dos vértices gerados, para possibilitar um melhor ajuste entre o modelo gerado e a representação da realidade.

A Figura 23 representa as informações de profundidade contidas nos mapas de 1980, comparando-se com a extensão total do reservatório (linha roxa).

Nesse ponto, houve a necessidade de decidir qual a melhor maneira para gerar as curvas batimétricas, uma vez que o levantamento disponível não contemplou uma parte significativa do reservatório (Figura 23).

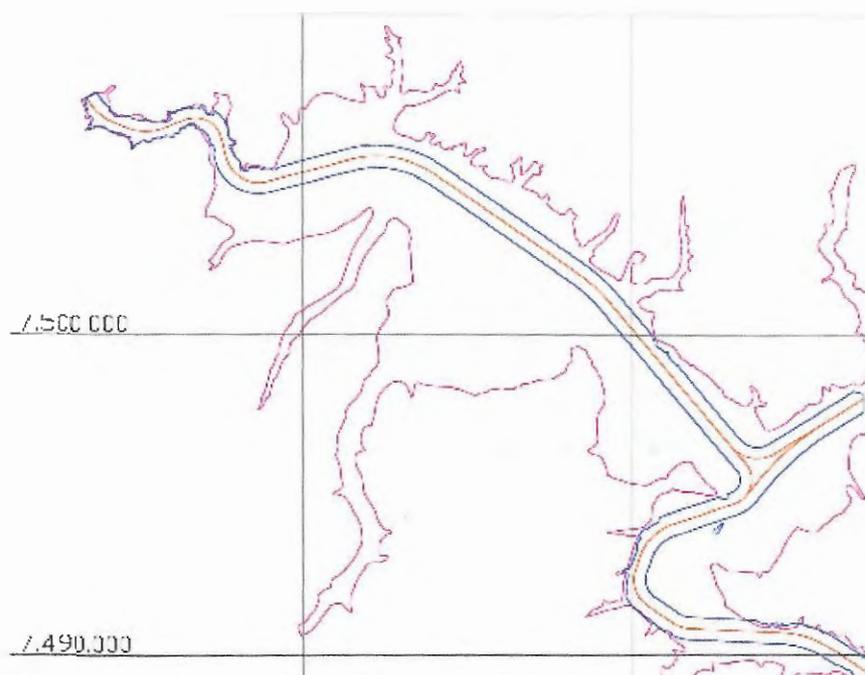


**Figura 23: Mapa obtido pela digitalização das cartas batimétricas de 1980. (Fonte: O autor)**

A alternativa encontrada foi de criar um novo contorno, correspondente às linhas paralelas ao eixo da hidrovia, distanciadas em 300 m tanto para esquerda quanto para direita, além de delimitar ao sul como sendo o final do trecho contemplado com dados do levantamento. Dessa forma, a região de comparação ficou resumida em uma pequena área localizada ao redor do eixo projetado para a hidrovia, sendo que as informações de profundidade que se encontrava fora desses limites foram desconsideradas (linha azul escuro na Figura 24).

Outro ponto a ser observado para delimitação do contorno final é que além desse limite lateral delimitado pelas linhas paralelas ao eixo da hidrovia, também foi necessário levar em consideração os próprios limites do contorno na cota de

referência. A área superficial total do reservatório é de 350,64 km<sup>2</sup> e a da região delimitada é de 34,80 km<sup>2</sup>, representando aproximadamente 10% da área total do reservatório.



**Figura 24:** Limites considerados para a geração do MDT. (Fonte: O autor)

Após delimitar o contorno e inserir os pontos no TopoGRAPH, através da ferramenta de interpolação obteve-se o MDT representativo para a região de estudos. Esse MDT possibilita a elaboração das curvas de nível, além do cálculo de volume de aterro (volume ocupado até uma determinada cota). Todas essas informações obtidas foram transferidas para uma tabela no Excel e formam a base para a elaboração das curvas características. A Figura 25 é o resultado da elaboração do MDT, gerando um mapa de curvas de nível igualmente espaçadas a cada 2 m.

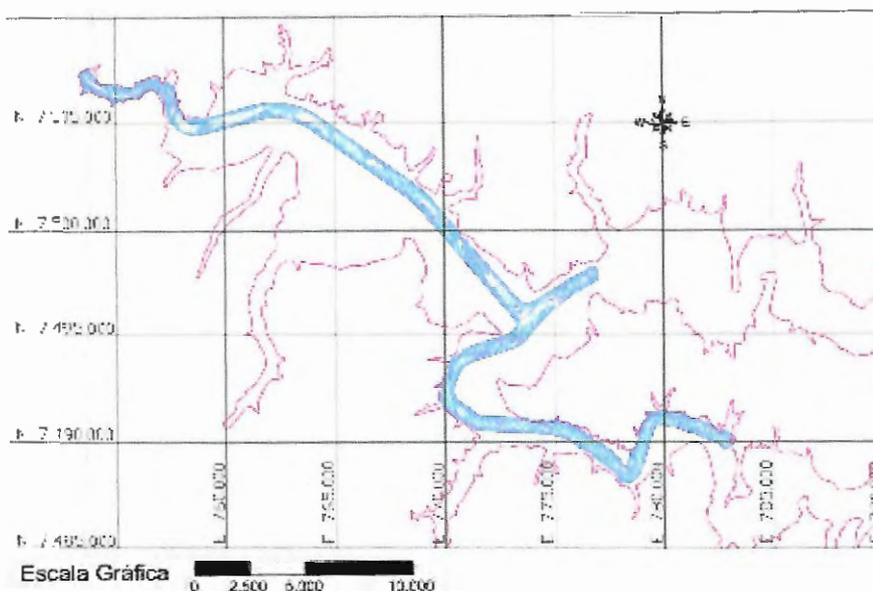


Figura 25: Mapa de curvas de nível gerado através dos dados de 1980. (Fonte: O autor)

### 5.1.5. Construção das curvas características.

Essas curvas representam o comportamento do reservatório para cada cota associada. A partir da análise delas é possível relacionar o volume útil acumulado, área alagada, cotas cujos valores sofrem alguma alteração brusca e correlacionar essas informações a qualquer outra característica de interesse.

Saber o volume útil acumulado é importante, pois é essa água acumulada que será utilizada para o turbinamento, operação da eclusa e fonte de abastecimento. O monitoramento dessa informação é um subsídio importante para a correta operação de geração de energia das máquinas hidráulicas. Em tempos de estiagem ou de crise de abastecimento, o nível de precisão exigido nessa tarefa é ainda mais restritivo.

A informação sobre a área alagada propicia que, num balanço hídrico, se contabilize perdas por evaporação corretamente. Na fase de implantação do

empreendimento essa informação é muito importante, pois a área alagada também se reflete diretamente sobre as áreas de relocação da população e terras a serem desapropriadas e indenizadas. Também é possível identificar até que cota o terreno é mais encaixado, alagando relativamente pouca área e ganhando bastante altura de queda, e se existe uma tendência de assoreamento em alguma profundidade.

As curvas características são importante instrumentos para o gerenciamento do lago, principalmente quando este é de usos múltiplos. A

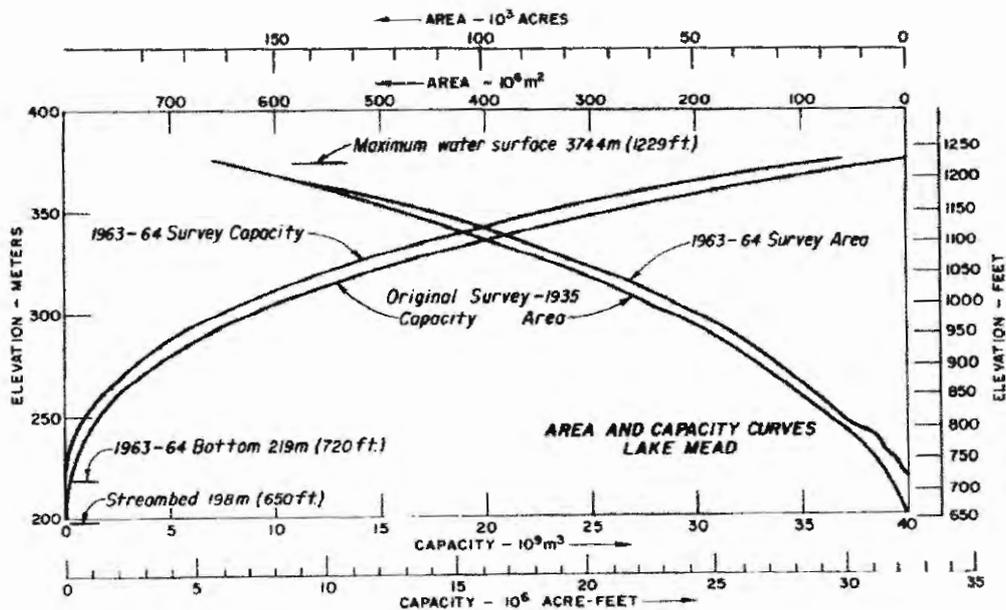


Figura 26 é um exemplo de curva característica do Lago Mead, rio Colorado, EUA. É possível perceber também a comparação de volume acumulado e área alagada para os anos de 1935 e 1963/64.

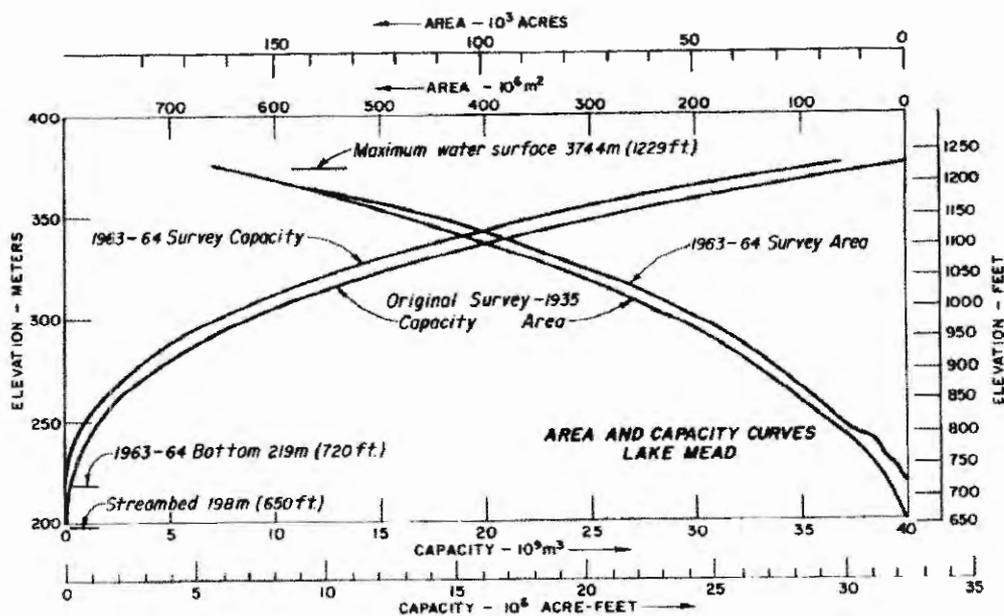


Figura 26: Exemplo de curva Cota x Área x Volume. (Fonte: USDI, 1987)

## 5.2. Tratamento dos dados de 2005

Diferentemente dos dados de 1980, no levantamento realizado em 2005 foram utilizados equipamentos que possibilitaram a geração de dados digitalizados. Isso proporcionou a não necessidade de digitalização, sendo que os dados brutos gerados precisaram apenas de algumas pequenas correções e filtros para se obter o MDT e as curvas características em questão.

No caso da batimetria realizada em 2005, o planejamento das seções transversais foi delimitado em folhas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE na escala 1:50.000., espaçadas em 500 metros perpendiculares ao eixo longitudinal do rio. As coordenadas das seções foram armazenadas no DGPS para serem utilizadas durante a navegação.

Os equipamentos utilizados nas campanhas são descritos a seguir:

- Acoustic Doppler Profiler – SonTek;

- DGPS GS20 – Leica Geosystems;
- Computador IBM-PC compatível;
- Software River Surveyor;
- Software Microsoft Excel;
- Software AutoCAD;
- Software TopoGRAPH.

No total foram contabilizadas 640 seções transversais ao longo do reservatório.

Para a realização da batimetria foi utilizada uma sonda ADP de 1500 kHz, da marca Sontek, trabalhando em conjunto com um DGPS, ambos conectados em um laptop, onde foi utilizado o software denominado River Surveyor para a obtenção e processamento dos dados recolhidos, exemplo ilustrado na Figura 27.

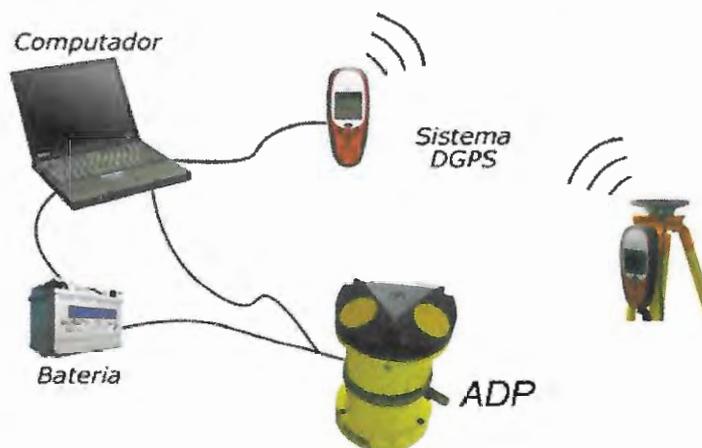
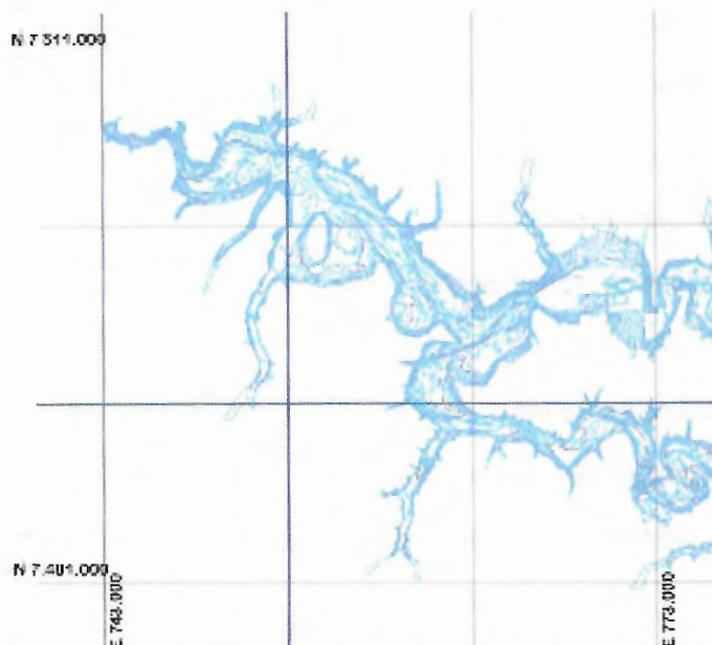


Figura 27: Esquema de trabalho do ADP acoplado a um DGPS (modificado de FIPAI, 2005).

De forma similar ao realizado nas etapas 4 e 5 do tratamento de dados de 1980, o processamento dos dados, filtragem e possíveis correções utilizou softwares como o River Surveyor, Excel, TopoGRAPH e AutoCAD de forma a obter então os

mapas batimétricos digitais. A Figura 28 ilustra um trecho do reservatório com as curvas batimétricas.



**Figura 28:** Trecho do reservatório obtido através da triangulação pelo TopoGRAPH. (Fonte: O autor)

A quantidade maior de dados possibilitou que se realizasse a modelagem para todo o reservatório, porém para se realizar uma comparação mais criteriosa, o mesmo contorno considerado para o modelo antigo foi considerado nesse.

Após o recorte realizado no mapa, o resultado final ficou representado pela Figura 29. A partir desses dados é que se geraram as curvas Cota X Área X Volume.

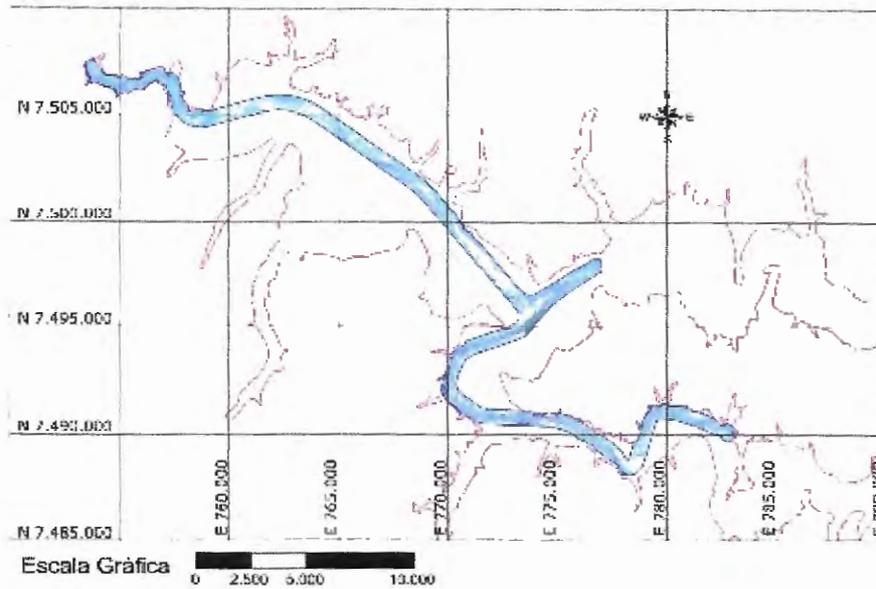


Figura 29: Mapa de curvas de nível obtido através dos dados de 2005. (Fonte: O autor)

De posse de 2 curvas distintas, foi possível comparar ambas e contabilizar, por exemplo, o quanto de volume de acumulação o reservatório perdeu para a cota desejada, Figura 30.

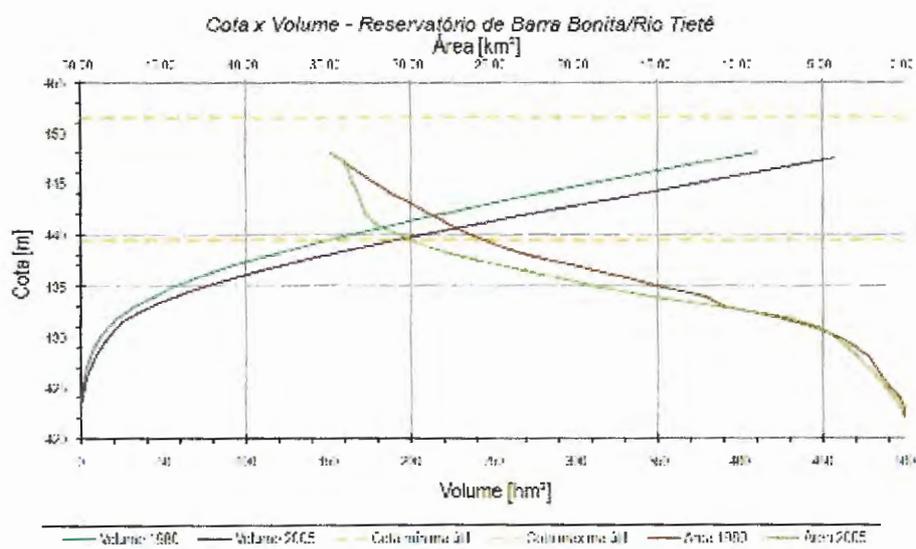
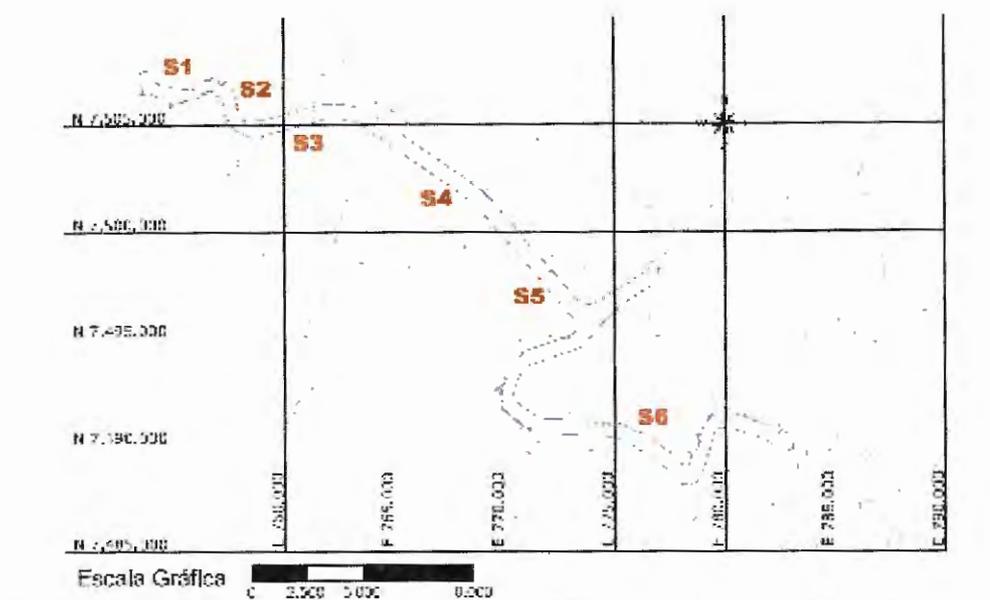


Figura 30: Comparação entre as curvas características. (Fonte: O autor)

Algumas seções de controle foram definidas para avaliar as alterações ocorridas durante o período de estudos. Essas seções são úteis na análise, uma vez que as informações de profundidade ficam mais claras de serem interpretadas, Figura 31.



**Figura 31: Seções de controle definidas no reservatório. (Fonte: O autor)**

A Figura 32 ilustra o que pode ocorrer com o fundo do reservatório após alguns anos de operação. Não só a deposição de sedimentos altera o fundo do reservatório, pois a erosão em regiões isoladas também pode ocorrer, uma vez que a presença da água e dos ventos, formando ondas, acaba incidindo em regiões do solo que não sofriam uma ação direta dessas forças antes do reservatório ser formado.

Uma vantagem do MDT é a possibilidade de identificar regiões onde os efeitos da sedimentação foram mais atuantes e, dessa forma, identificar seções de controle para o monitoramento sistemático desse local.

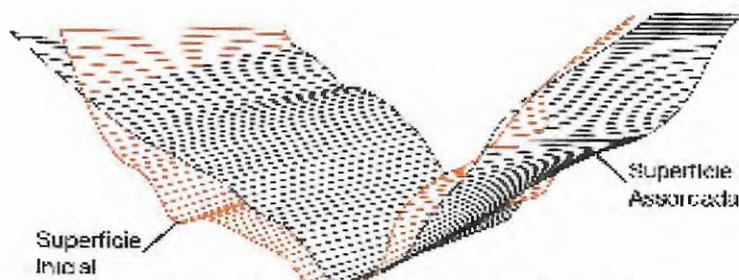
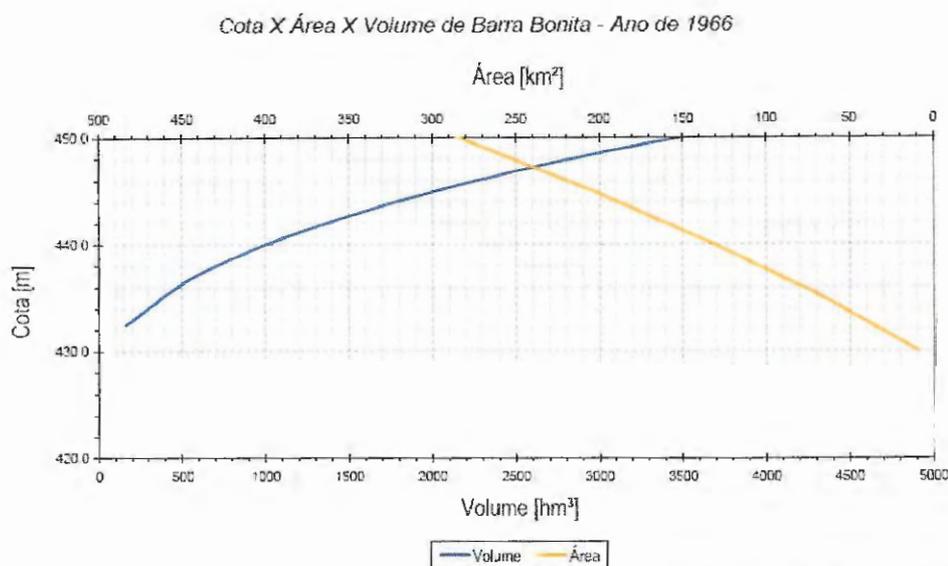


Figura 32: Exemplo de volume assoreado numa seção de estudo. (Fonte: O autor)

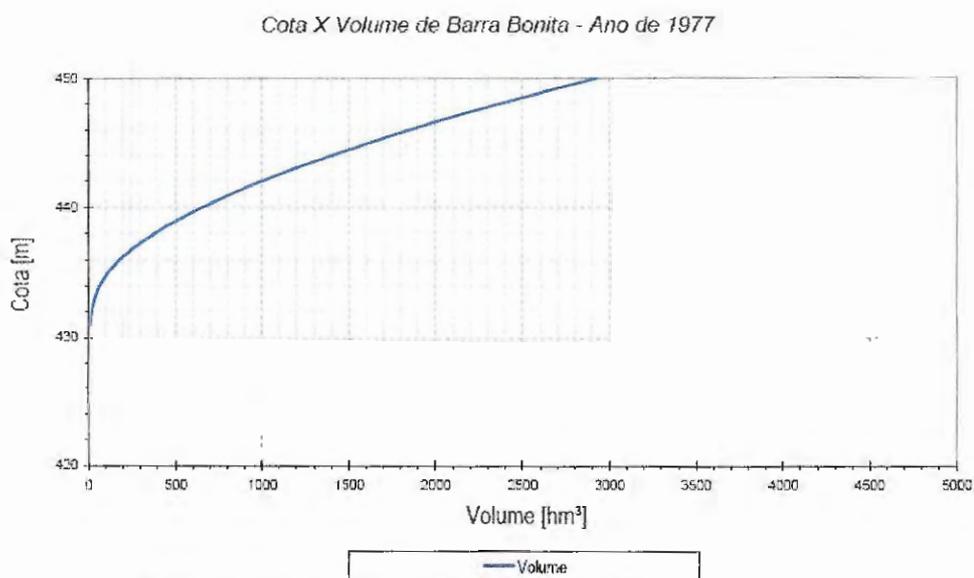
Além dos mapas batimétricos de 1980 e 2005, as curvas características de 1966 e 1977 também foram analisadas. Essas curvas se apresentaram em formato gráfico exclusivo. A obtenção de seus valores, para que fosse possível a geração de dados digitais, foi realizada manualmente com auxílio de escalímetro. Em ambos os casos, apenas os valores de volume e área alagada até a cota de referência, 448,0m foram considerados.

Para o ano de 1966 o volume total acumulado até a cota de referência foi de aproximadamente 2800 hm<sup>3</sup> e a área alagada na mesma cota foi de aproximadamente 253 km<sup>2</sup>, conforme observado na Figura 33. Já para o ano de 1977, apenas informações sobre o volume acumulado foram disponibilizadas (Figura 33) sendo que o valor para a cota de referência é de aproximadamente 2300 hm<sup>3</sup>.

A qualidade de impressão do material comprometeu um pouco sua interpretação, uma vez que problemas com a identificação das datas e até mesmo valores expressos acabaram por dificultar o processo. Essas dificuldades não impediram a identificação dos dados necessários, apenas exigiram um pouco mais de atenção e até alguns cálculos para se confirmar alguns valores.



**Figura 33: Curva Cota X Área X Volume para o reservatório, obtida em 1966. (Fonte: O autor)**



**Figura 34: Curva Cota X Volume, obtida em 1977. (Fonte: O autor)**

Diante dos dados obtidos e analisados, os resultados encontrados ao final da pesquisa estão dispostos no próximo item, além das devidas ponderações e recomendações, visando o aprimoramento das técnicas utilizadas, bem como a

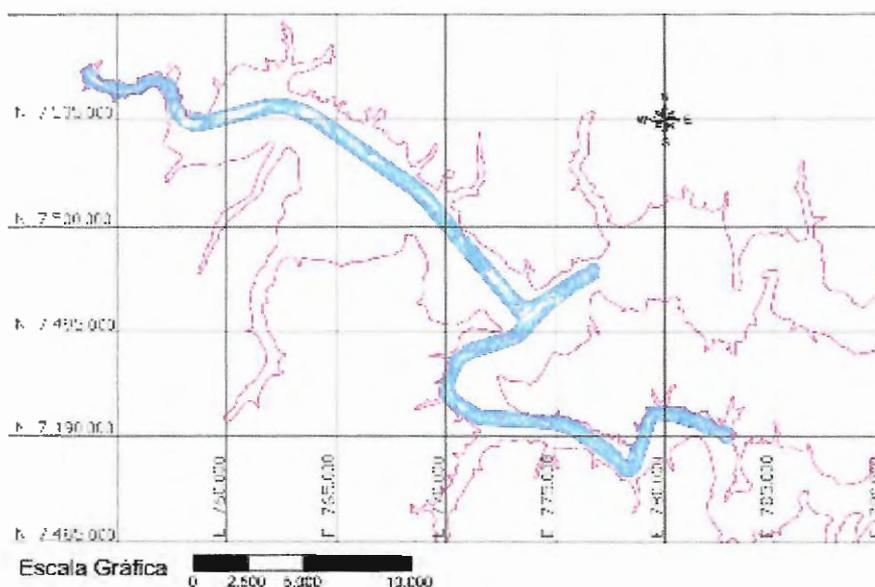
calibração de um modelo que possibilite até a realização de previsão da vida útil com uma precisão significativa.

## 6. Resultados

A partir desse capítulo os resultados obtidos nas diversas comparações e estudos realizados nesse trabalho serão apresentados e discutidos, de forma clara e objetiva.

### 6.1. Resultados obtidos pela comparação dos mapas batimétricos

A digitalização de 1980 resultou no mapa representado pela Figura 35. Como já citado, esses dados são referentes a aproximadamente 10% da área total do reservatório, sendo concentrados na região central do mesmo.



**Figura 35: Mapa batimétrico digitalizado de 1980. (Fonte: O autor)**

Os dados obtidos pela digitalização das cartas estão listados na Tabela 3, enquanto que os obtidos pelo levantamento batimétrico de 2005 estão na Tabela 4.

A Figura 36 representa os valores para o ano de 1980. É possível perceber que houve um pequeno salto na curva que representa a área, próximo à cota 433,0

m Esse comportamento não representa um problema maior. Uma explicação simples para esse fato é que o fundo do reservatório, em média, apresenta uma maior declividade lateral nessa cota, acarretando num pequeno incremento de área comparativamente ao incremento de cota, resultando em curvas de nível com espaçamento menor.

**Tabela 3: Valores de Área e Volume obtidos dos mapas de 1980.**

Cota [m]	Área [km <sup>2</sup> ]	Volume	
		intervalo [hm <sup>3</sup> ]	acumulado [hm <sup>3</sup> ]
422,0	0,02	0,01	0,01
423,0	0,08	0,04	0,05
424,0	0,31	0,18	0,22
425,0	0,93	0,66	0,84
426,0	1,34	1,33	1,99
427,0	1,78	2,21	3,54
428,0	2,20	3,32	5,53
429,0	2,94	4,75	8,06
430,0	4,02	6,78	11,52
431,0	5,52	9,49	16,27
432,0	7,86	13,41	22,90
433,0	10,94	18,93	32,34
434,0	12,13	24,94	43,87
435,0	14,88	32,36	57,30
436,0	17,40	41,03	73,39
437,0	20,10	51,11	92,15
438,0	22,76	62,51	113,63
439,0	24,70	74,87	137,38
440,0	26,30	88,05	162,91
441,0	27,55	101,82	189,86
442,0	28,73	116,22	218,04
443,0	29,88	131,16	247,38
444,0	31,12	146,76	277,92
445,0	32,09	162,79	309,55
446,0	33,03	179,35	342,13
447,0	33,93	196,28	375,63
448,0	34,80	213,71	410,00

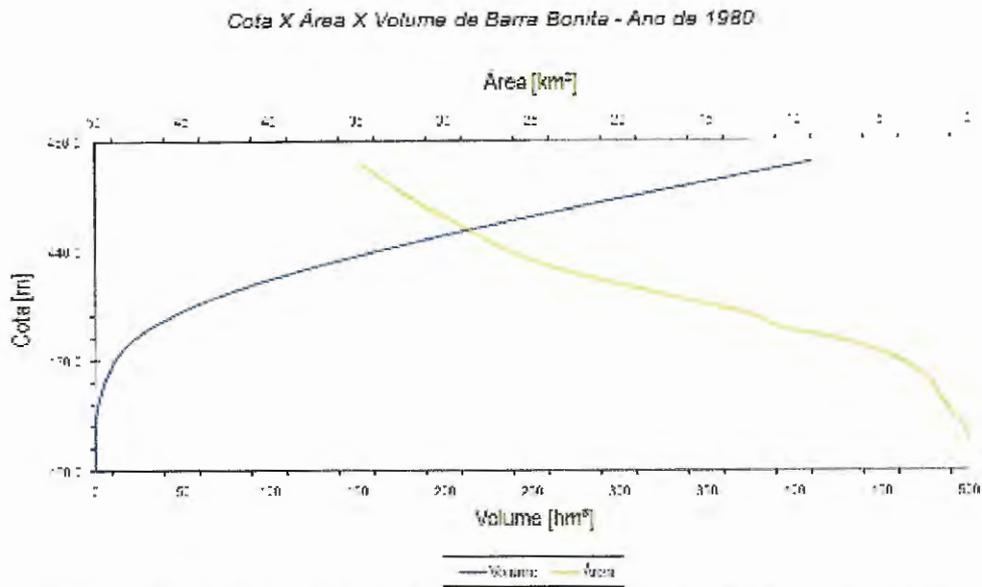


Figura 36: Curva Cota X Área X Volume gerada com dados de 1980. (Fonte: O autor)

Em 2005 (Figura 37) houve uma resposta no incremento de área ainda mais acentuada para as cotas acima de 441,0 m. Nesse caso, a explicação se dá pelo corte realizado para ajuste da área de comparação. Os efeitos desse corte serão mais explorados com o decorrer da análise dos resultados.

Tabela 4: Valores de Área e Volume obtidos no levantamento de 2005.

Cota [m]	Área [km <sup>2</sup> ]	Volume do intervalo [hm <sup>2</sup> ]	Volume acumulado [hm <sup>2</sup> ]
422,0	0,07	0,01	0,01
423,0	0,24	0,15	0,16
424,0	0,64	0,44	0,60
425,0	1,16	1,06	1,50
426,0	1,66	1,85	2,91
427,0	2,27	3,03	4,88
428,0	2,86	4,42	7,44
429,0	3,47	6,19	10,61
430,0	4,22	8,26	14,45
431,0	5,28	10,94	19,20
432,0	7,33	14,57	25,51
433,0	11,25	20,23	34,80
434,0	15,41	27,90	48,12
435,0	18,79	37,33	65,22
436,0	21,60	48,09	85,42
437,0	24,52	60,39	108,48
438,0	27,11	73,90	134,29
439,0	29,17	88,52	162,43
440,0	30,64	103,81	192,33
441,0	32,05	119,87	223,67
442,0	32,68	136,17	256,04
443,0	32,95	152,69	288,86
444,0	33,19	169,24	321,93
445,0	33,47	186,02	355,26

Cota [m]	Área [km <sup>2</sup> ]	Volume do intervalo [hm <sup>3</sup> ]	Volume acumulado [hm <sup>3</sup> ]
446,0	33,71	202,84	388,85
447,0	33,89	219,82	422,66
448,0	34,80	251,19	472,01

Cota X Área X Volume de Barra Bonita - Ano de 2005

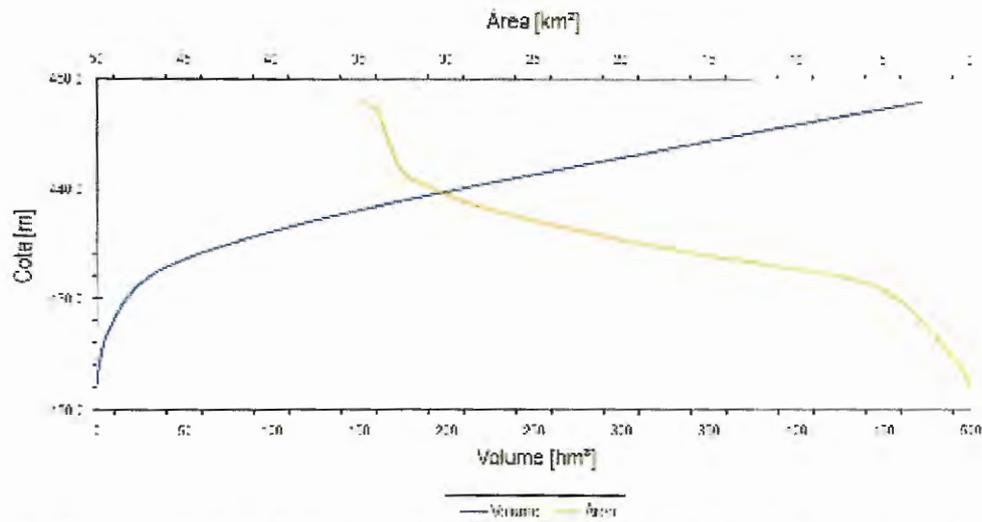
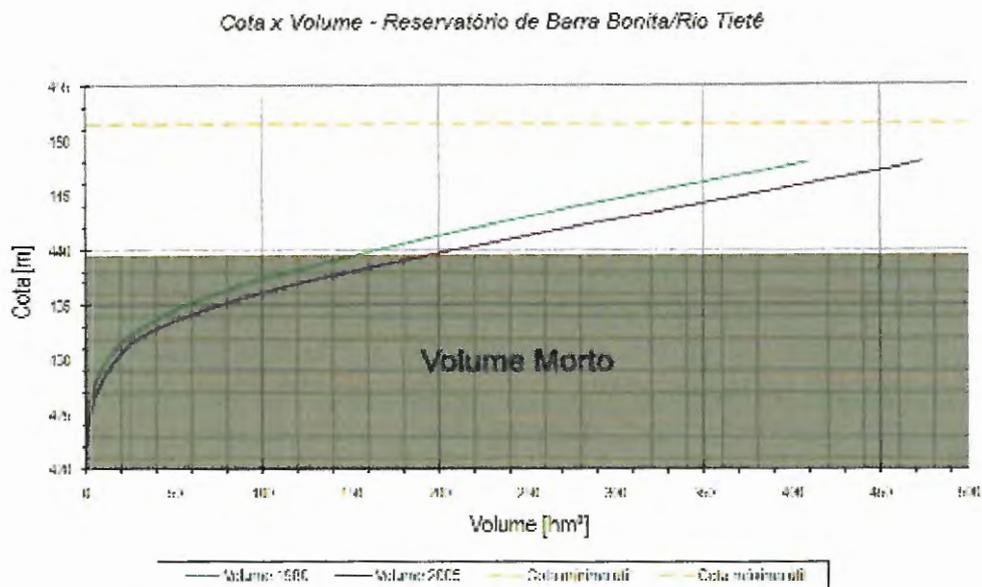


Figura 37: Curva Cota X Área X Volume gerada com dados de 2005. (Fonte: O autor)

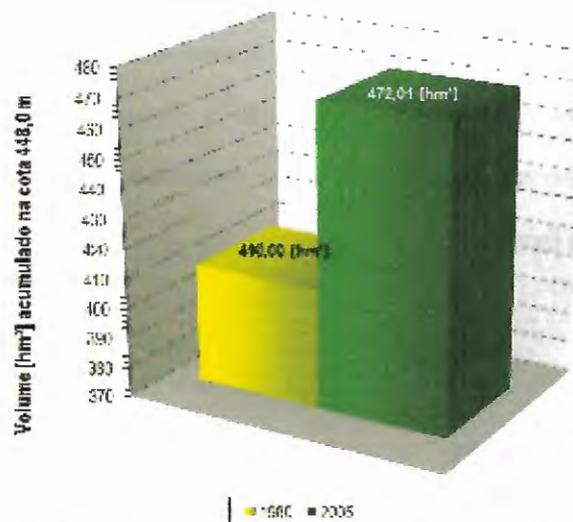
Diante dessas curvas características, foi possível elaborar um gráfico representando o comportamento de volume e área para ambos os casos. A Figura 38 representa a sobreposição das curvas Cota X Volume, além de indicar as cotas de operação do reservatório, possibilitando a identificação do volume morto do reservatório de Barra Bonita.



**Figura 38: Sobreposição das curvas Cota X Volume. (Fonte: O autor)**

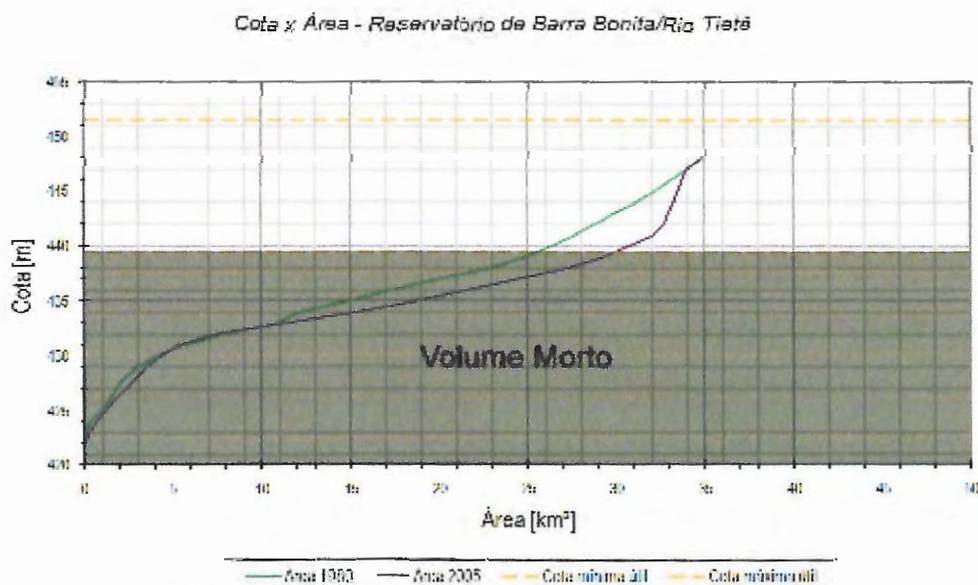
O volume total acumulado sofreu um acréscimo, passando de 410 hm<sup>3</sup> para 472,01 hm<sup>3</sup>, um aumento de 15% aproximadamente, como observado na Figura 39.

*Comparação dos volumes acumulados em épocas diferentes*



**Figura 39: Volumes acumulados obtidos. (Fonte: O autor)**

Pela Figura 40, a variação de área alagada foi mais significativa, porém o fato de se adotar um mesmo contorno recortado no interior do reservatório acabou por igualar os valores para a cota de referência.



**Figura 40: Sobreposição das curvas Cota X Área (Fonte: O autor)**

Os valores de área apresentam acréscimos, por exemplo, quando comparados na cota 439,0 m, cujo valor obtido em 1980 foi de 25,5 km<sup>2</sup> e em 2005 esse valor foi de 30,1 km<sup>2</sup>, um aumento de 4,6 km<sup>2</sup> (18%).

Comparar os volumes armazenados para as distintas épocas, utilizando ferramentas de MDT é uma metodologia recente e que possibilita avaliar mais precisamente as alterações ocorridas em toda extensão do reservatório, quando se dispõe de dados suficientes. Porém, uma prática muito utilizada para avaliação de avanço das condições iniciais de erosão e sedimentação nos cursos d'água, e também em reservatórios, é o acompanhamento da modificação de seções transversais, sendo necessário delimitar seções de controle para que se possa comparar.

Essas seções são avaliadas, pontualmente, elaborando um perfil topobatimétrico que contém informações de profundidade para elas e assim, quando se dispõe de valores de épocas distintas, a sobreposição desses dados retorna a condição de variação para a época determinada.

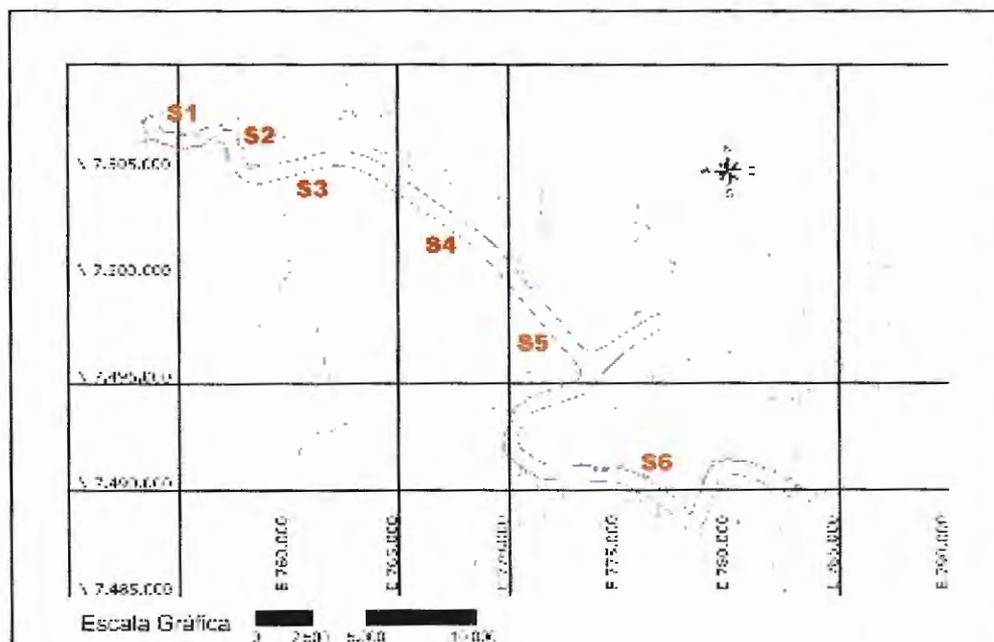
Em casos de cursos d'água naturais, a modificação do perfil transversal pode ocorrer repetidas vezes durante um período de acompanhamento. Isso porque as condições da bacia e o próprio local escolhido para demarcação da seção favorecem esse comportamento variável. Em casos de reservatórios de grande porte, essa variação sazonal do perfil não deve ocorrer, uma vez que as velocidades de fluxo e o próprio barramento não permitem que os sedimentos ultrapassem os limites da barragem. O que ocorre é o transporte de sedimentos da região inicial do reservatório (onde se forma o remanso) para o interior do mesmo.

Com finalidade de estudar o comportamento de seções transversais no interior do lago de Barra Bonita, foram delimitadas 6 seções de controle cujas coordenadas estão dispostas na Tabela 5.

Tabela 5: Coordenadas que delimitam as seções de controle

Seção	Margem Esquerda		Margem Direita	
	Norte [m]	Este [m]	Norte [m]	Este [m]
S1	7.506.336	753.936	7.507.085	754.411
S2	7.505.984	757.094	7.506.302	757.992
S3	7.504.765	761.049	7.505.899	760.702
S4	7.502.133	767.191	7.503.041	767.885
S5	7.497.511	771.359	7.498.362	772.374
S6	7.489.805	775.720	7.490.682	776.359

A Figura 41 ilustra a posição das seções sobre o contorno do reservatório.



**Figura 41: Identificação das seções de controle. (Fonte: O autor)**

Diante das seções determinadas, apresentam-se as comparações nas seções de controle para os mapas de 1980 e 2005 (Figuras 42 a 47).

As seções S1 e S2 se localizam num trecho cuja delimitação do contorno considerado na geração do MDT é praticamente coincidente ao contorno total do reservatório. Nesse caso, seria possível que as observações nessas duas seções pudessem retornar valores de perda de volume para o período.

As demais seções apresentam profundidades máximas similares entre os anos de 1980 e 2005, com exceção da seção S4, cuja diferença observada é da ordem de 2 m.

Comparação de seções batimétricas - Seção 1

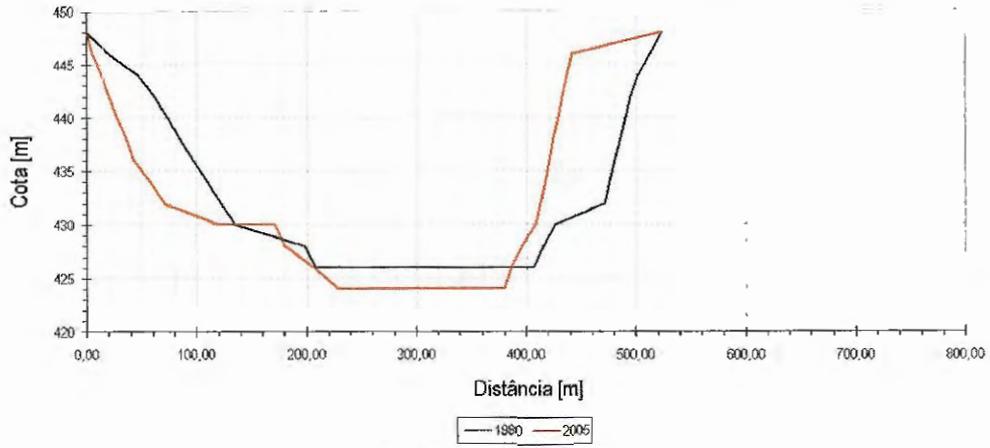


Figura 42: Seção S1.

Comparação de seções batimétricas - Seção 2

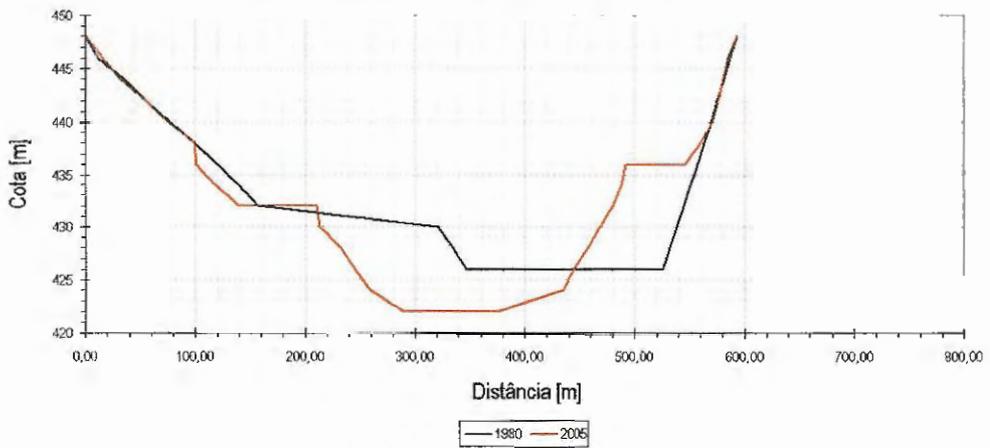


Figura 43: Seção S2.

Comparação de seções batimétricas - Seção 3

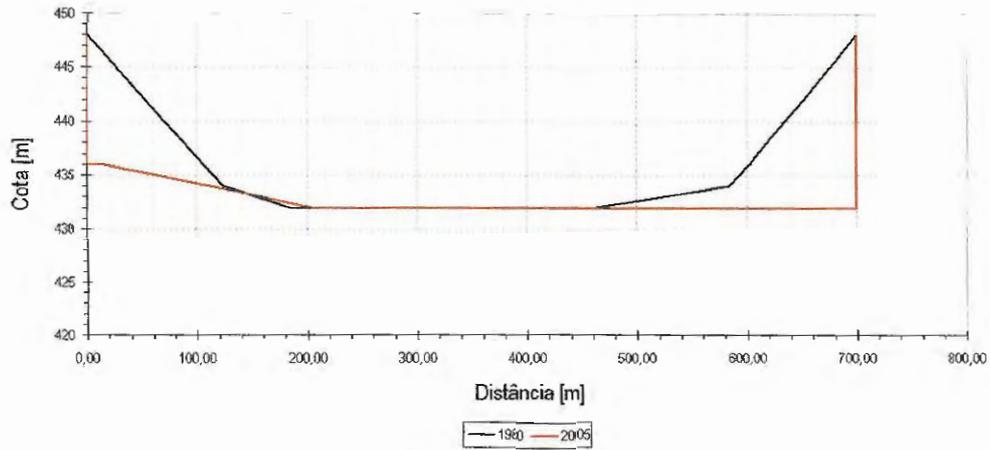


Figura 44: Seção S3.

Comparação de seções batimétricas - Seção 4

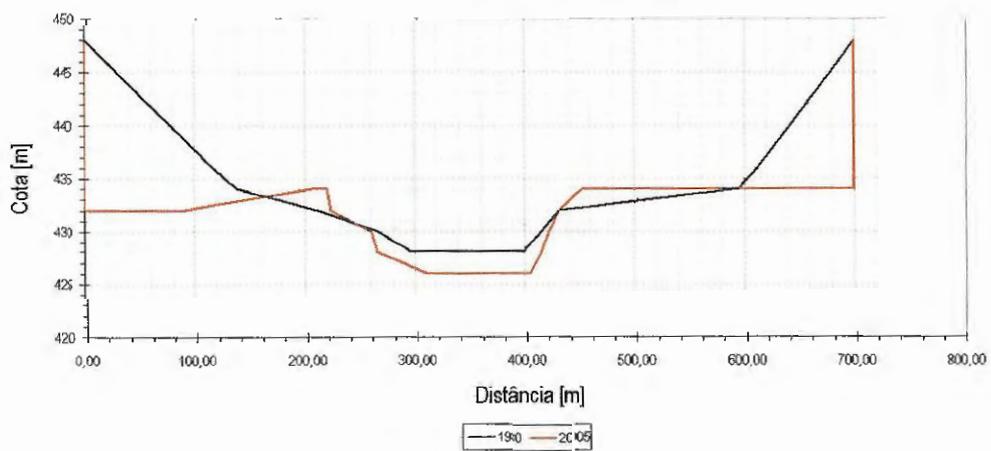
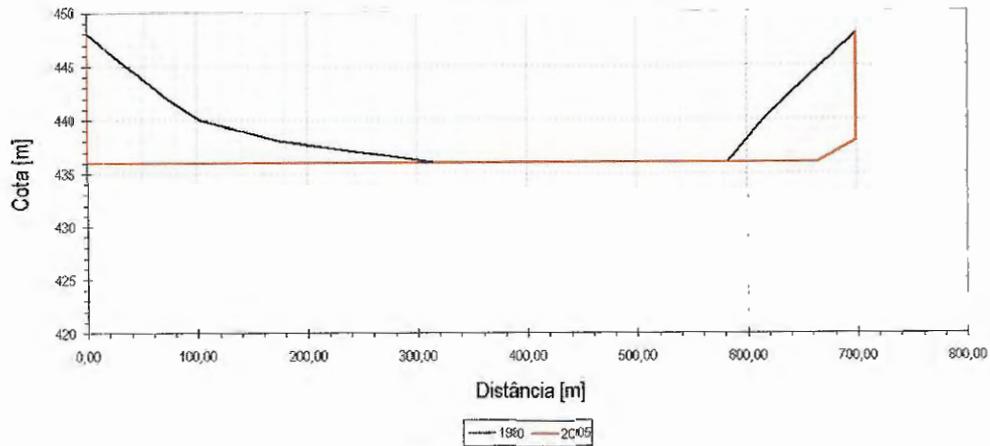


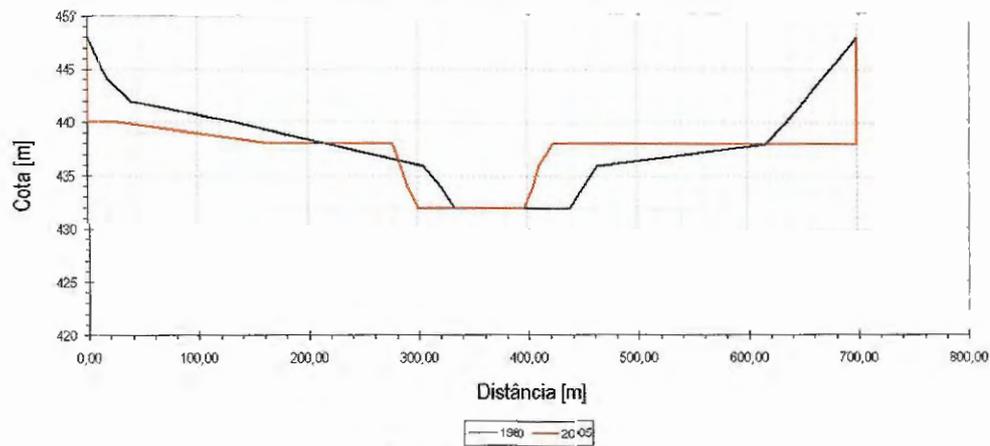
Figura 45: Seção S4.

**Comparação de seções batimétricas - Seção 5**



**Figura 46: Seção S5.**

**Comparação de seções batimétricas - Seção 6**



**Figura 47: Seção S6.**

O comportamento das seções S3 à S6 mostra que o recorte realizado, forçando os limites superficiais do reservatório a estarem inseridos no polígono formado pelas linhas paralelas ao eixo da hidrovia e os limites do próprio contorno na cota 448,0 m, influenciaram diretamente nos resultados obtidos.

Pode-se perceber que, no caso de 2005, o perfil do fundo do reservatório sofre uma interrupção brusca de seu traçado, formando uma linha na vertical até a cota de referência. A Figura 48 ilustra como poderia ser o comportamento do fundo

do reservatório, porém os limites admitidos para o processamento dos dados, linhas roxas, não possibilitou considerar essas variações.

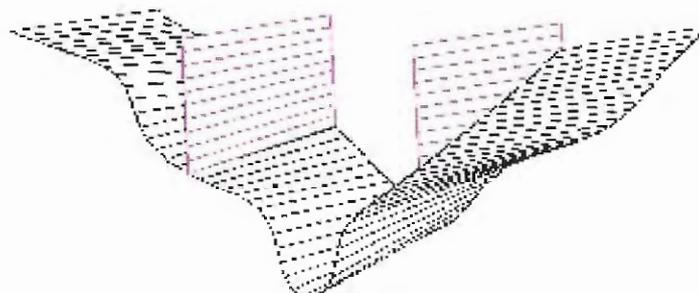
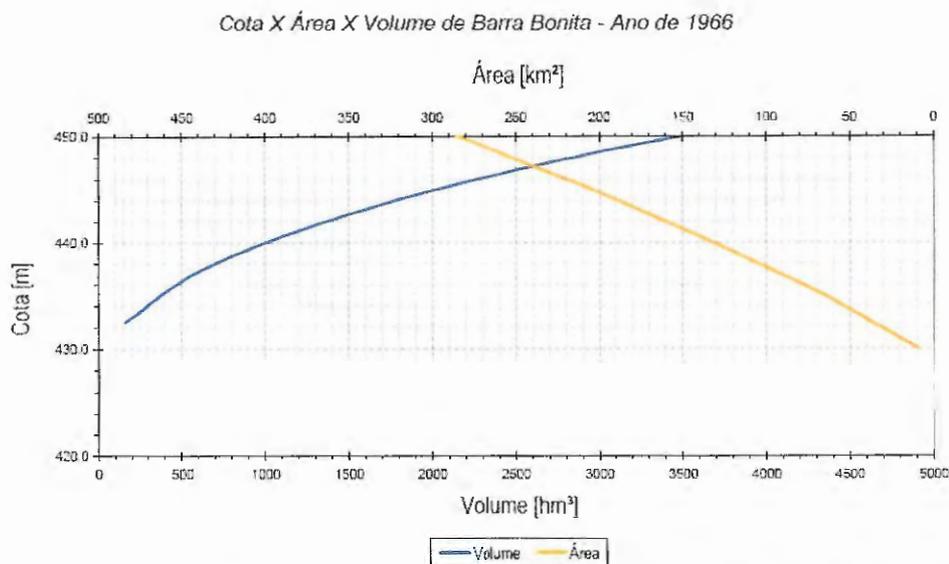


Figura 48: Interferência do contorno forçado. (Fonte: O autor)

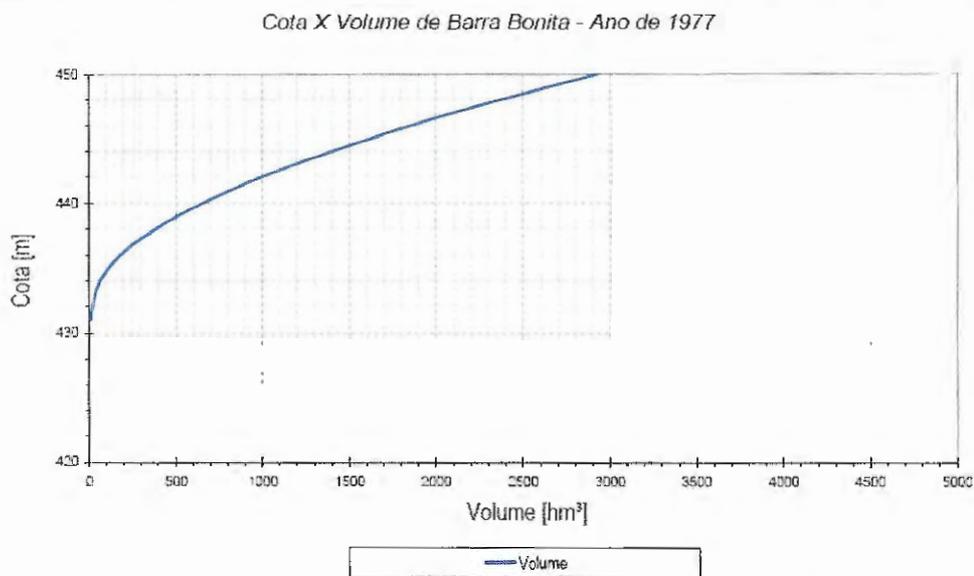
## **6.2. Resultados obtidos pela comparação entre as curvas características de 1966, 1977 e 2005.**

A comparação entre essas curvas permite identificar a variação entre os volumes admitidos pela empresa geradora de energia até que um levantamento mais detalhado possa ser realizado, e os valores, atualizados.

Não existe metodologia catalogada de obtenção de nenhuma das curvas de 1966 e 1977, tendo sido disponibilizado apenas os gráficos, em forma de papel. Essa falta de informação sobre a metodologia impede qualquer tipo de discussão sobre os resultados obtidos, possibilitando apenas algumas considerações quanto às diferenças de tecnologia, nível de detalhamento, entre outros. A seguir, as curvas características são rerepresentadas.



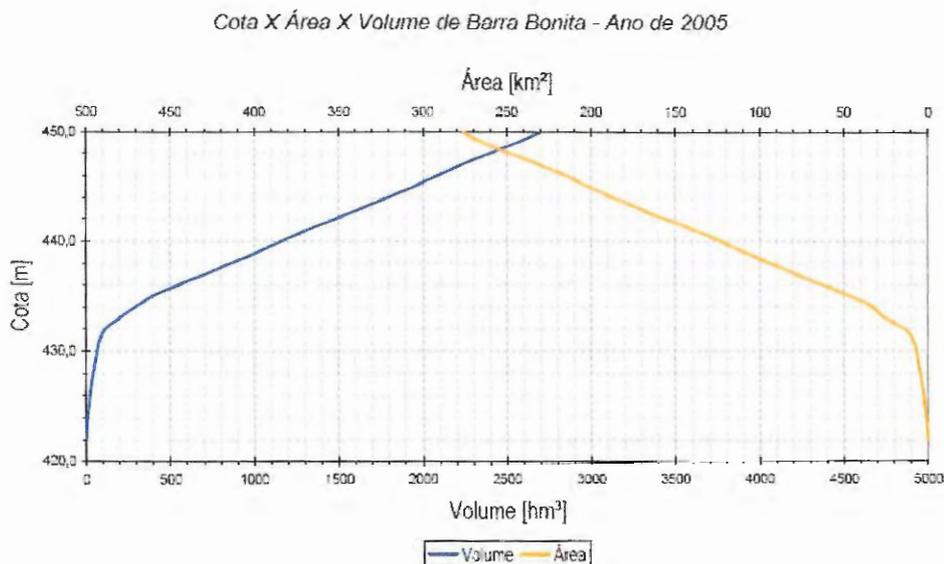
**Figura 49: Curva Cota X Área X Volume para o reservatório, obtida em 1966. (Fonte: O autor)**



**Figura 50: Curva Cota X Volume para o reservatório, obtida em 1977. (Fonte: O autor)**

Essas curvas eram admitidas para todo o reservatório, assim como o levantamento de 2005 contemplou. Dessa maneira, a comparação entre elas pode mostrar as diferenças de valores considerados pela empresa e a situação conseguida através do levantamento batimétrico de todo o reservatório, tendo

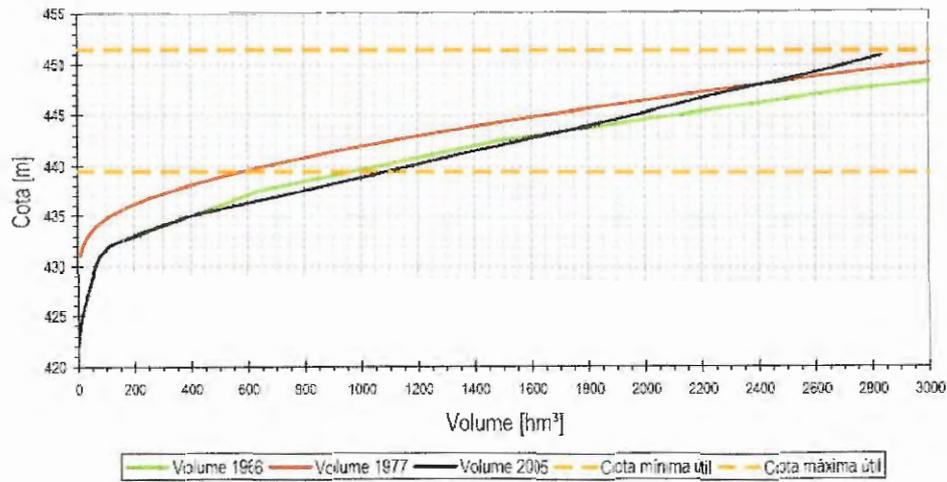
seções batimétricas bem definidas e espaçadas, e utilizando equipamentos eletrônicos com grandes índices de precisão. A Figura 51 é o resultado do levantamento de 2005.



**Figura 51: Curvas características obtidas para o reservatório em 2005. (Fonte: O autor)**

A sobreposição das curvas, Figura 52, mostra como a variação dos valores de volume armazenado no reservatório se modificaram.

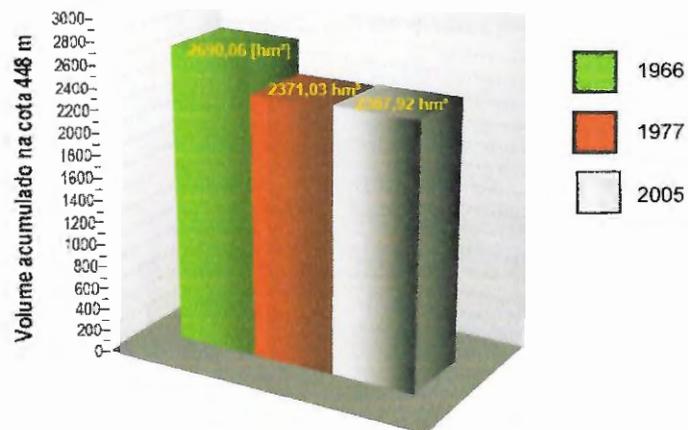
*Cota x Volume - Reservatório de Barra Bonita/Rio Tietê*



**Figura 52: Comparação das curvas características. (Fonte: O autor)**

Quando comparados na cota de referência, as variações são relativamente pequenas, como mostrado na Figura 53.

*Comparação dos volumes acumulados em épocas diferentes*



**Figura 53: Comparação dos volumes acumulados na cota referência. (Fonte: O autor)**

Pode-se observar que o volume acumulado do reservatório pouco variou, passando de 2690,06 hm<sup>3</sup> em 1966 para 2387,92 hm<sup>3</sup> em 2005, uma diminuição de 11,20% em 39 anos de operação, lembrando que os dados de 1977 indicam um volume acumulado ainda menor que o de 2005.

Como nenhuma metodologia de elaboração dessas curvas antigas foi disponibilizada, não é possível realizar nenhuma outra consideração sobre esses valores.

## 7. Conclusões e Recomendações

Como se pôde observar no capítulo anterior, muitos dos resultados obtidos não foram suficientes para encontrar uma possível correlação que valesse para determinar a perda de volume acumulado para o reservatório de Barra Bonita. Isso porque os dados considerados não eram suficientes.

Ao se analisar a batimetria realizada em 1980, com apenas um trecho do reservatório contemplado, e comparar esses dados com os dados de um mesmo trecho, recortado de um levantamento batimétrico completo, pode-se observar que a não continuidade de informações na direção do leito de lago foi o principal fator que impossibilitou conclusões mais concretas.

A área que possui dados possíveis de comparação é de apenas 10% da superfície total do reservatório. Isso impossibilita qualquer tipo de extrapolação, tendenciando os resultados obtidos num trecho do lago a valerem para todo o reservatório.

Quando se compara as seções S1 e S2 (Figuras 42 e 43) respectivamente, observa-se que em 2005 as profundidades eram maiores. Estando essas seções em regiões cujo contorno considerado é praticamente coincidente com a borda do reservatório, essa constatação mostra-se totalmente contrária ao que a bibliografia aponta, ou seja, que as profundidades observadas num período mais recente deveriam ser menores que as observadas em épocas mais antigas. Esse comportamento deve ser melhor estudado, realizando coletas de amostras de sedimentos de fundo e de sólidos em suspensão, e realizando um acompanhamento das atividades no reservatório, porém uma possível causa desse comportamento é o fato de as seções correspondentes ao ano de 1980 terem sido obtidas através de

cartas batimétricas e não dos dados brutos de profundidade. Diversos fatores podem influenciar a correta elaboração de uma carta batimétrica, não sendo possível identificar qualquer anomalia quando se possui apenas o resultado final, ou seja, as curvas elaboradas.

Observar os gráficos de 1967, 1977 e 2005 (Figura 53) mostra que houve um decréscimo no volume de acumulação do reservatório mais acentuado entre as 2 primeiras estimativas e um acréscimo entre a 2ª e a 3ª. Como a metodologia de obtenção das 2 primeiras estimativas não pôde ser consultada, não se pode afirmar qualquer coisa sobre esse comportamento. O que se vê é que o volume de acumulação realmente decresceu algo em torno de 11,20% entre 1967 e 2005.

Algumas recomendações para que se possa realizar uma comparação com mais representatividade são listadas a seguir.

É necessário ter total acesso aos dados brutos de quaisquer levantamentos realizados anteriormente, visto que o produto final (cartas batimétricas) não contém informações auxiliares importantes como freqüência de captação dos dados pelos equipamentos utilizados e correta posição dos pontos da profundidade. É importante também que a metodologia de filtragem e consistência dos dados seja bem explícita no relatório final que acompanha as cartas, o que não ocorreu no caso estudado. Dessa forma, possuindo os dados brutos pode-se tratá-los com a mesma metodologia que se pretende para o novo levantamento, evitando assim que erros não catalogados se propaguem e influenciem no resultado final das comparações.

A utilização de equipamentos com precisões diferentes não é recomendado, uma vez que essa diferenciação prejudica a comparação. O ideal é que se utilizem os mesmos equipamentos, ou similares, tendo em vista que a qualidade do tratamento e o pós-tratamento dos dados dependem exclusivamente da qualidade

dos dados brutos captados. Quando se utilizam equipamentos com especificações diferenciadas, os resultados das etapas subseqüentes são afetados. Mesmo que se tenha acesso aos dados brutos e que seja realizado um novo tratamento dos dados, nos moldes do realizado para a tecnologia mais atual, ainda assim é inevitável que se insira um elemento de incerteza, cuja determinação no resultado final é muito difícil.

Para que se obtenham valores mais confiáveis sobre a perda de volume do reservatório, é necessário realizar outras campanhas de batimetria, respeitando os mesmos padrões de tratamento de dados, nível d'água de referência, freqüência de operação dos sensores e época de levantamento de dados.

As campanhas de batimetria devem ser complementadas por campanhas de coleta de sedimentos, cuja freqüência deve ser, no mínimo, de 4 ao ano, 2 na estação chuvosa e 2 na seca. Utilizando-se dos resultados dessas medições, é possível obter curvas de correlação Volume Acumulado x Tempo mais precisas.

Como o fenômeno de erosão é diretamente afetado pelas chuvas na região, uso e ocupação do solo, emprego ou não de técnicas de manejo do solo, presença de vegetação nativa, etc., faz-se necessário conhecer o entorno da área estudada, através de mapas de declividade, mapeamento de áreas com vegetação e tipos de culturas cultivadas nas terras próximas à região de estudos. A elaboração de um banco de dados contendo todas essas informações, sendo atualizadas todo ano, fornece um subsídio muito valioso para as análises de perda de volume. Todas essas informações, aliadas ao avanço dos mapas batimétricos e aos dados obtidos nas campanhas de coleta de sedimentos propiciam não apenas uma avaliação mais criteriosa das condições já consolidadas, mas também permite atuar em pontos de maior expressão sobre o assoreamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AES TIETÊ. Disponível em <http://www.aestiete.com.br/artigo146.asp>. Web site acessado em 03/08/2006.
- ANDERSON, P. S. **Princípios da cartografia topográfica. Vol.1.** DSG, Diretoria de Serviço Geográfico e FIBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Brasília, 1982.
- ANNANDALE, G.W. **Developments in water science – Reservoir Sedimentation.** Ed. Elsevier Science Publishing Company. New York, 1987.
- BELLINASSO, T. B. **Monitoramento hidrossedimentométrico e avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica urbana de encosta.** 2002. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade de Santa Maria. Santa Maria, 2002.
- BORGES, F. S. P.; ROTUNNO FILHO, O. C.; WILSON JUNIOR, G. **Estimativa de batimetria utilizando sensoriamento remoto e krigagem bayesiana.** Estudo de caso: reservatório Morro Grande, Rio de Janeiro. XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. São Pedro, 2004.
- BRAMOSKI, J.; VILLELA, S. M. **Estoque de nutrientes em sedimentos do reservatório de barra bonita: uma abordagem integrada dos padrões de desenvolvimento regional.** PPG-SEA: trajetórias e perspectivas de um curso multidisciplinar. Organizado por Evaldo Luiz Gaeta Espíndola e Edson Wendland. Rima Editora. São Carlos, 2005.
- BRUK, S. **Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs.** UNESCO. IHP- II Project A.2.6.1. Paris, 1985.
- CABRAL, J. B. P. **Caminhos de geografia** 6 (14), 2005, 62-69 p.
- CÂMARA, G.; CASANOVA, M.A.; HEMERLY, A.; MEDEIROS, C.M.B.; MAGALHÃES, G. **Anatomia de sistemas de informação geográfica.** SBC, Escola de Computação, Campinas, 1996.
- CAIADO, M. A. C. **Inter-relações entre ambientes e qualidade das águas do Rio Itapemirim.** 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 1994.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. ELETROBRÁS/Centrals Elétricas Brasileiras SA. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatório**. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Brasília, 2000.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SOROCABA-MÉDIO TIETÊ. **Relatório Zero**: Relatório da situação atual dos recursos hídricos na bacia hidrográfica. Disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br>. Web site acessado em 20/08/2004.

CORDINI, J. **Novos desenvolvimentos em ciências geodésicas**. 2004.

EAGLESON, P.S. **Dynamic Hydrology**. McGraw-Hill Book Company, 1970, 462 p.

FIPAI (Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial).

**Previsão do assoreamento de reservatórios formados por barragens**.

Levantamento batimétrico e geração da curva cota-área-volume: Represa de barra bonita. Convênio Universidade de São Paulo - AES Tietê. São Carlos, 2005.

GOUVEIA, M. I. F. **Plano integrado de controle de erosão no estado de São Paulo**. PICESP. II Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Rio de Janeiro, 1996.

HIDROCONSULT Consultoria, Estudos e Projetos S. A. **Projeto do traçado do canal de navegação de médio Tietê e Piracicaba**: Reservatórios de Bariri e Barra Bonita. Vol. 1. São Paulo, 1980.

HAMED, Y.; et. al. **Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion-sensitive semiarid catchment**. CATENA (50), 2002, 1-16 p.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (IGC). **Mapa das unidades hidrográficas de gerenciamento de recursos hídricos (UGRHI)**. Edição 1996. Disponível em [http://www.igc.sp.gov.br/copm\\_ugrhi.htm](http://www.igc.sp.gov.br/copm_ugrhi.htm). Web site acessado no dia 31/07/2006.

LEITE, M. A. **Variação espacial e temporal da taxa de sedimentação no reservatório de Salto Grande (Americana – SP) e sua influência sobre as características limnológicas do sistema**. 1998. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Departamento de Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos/USP. São Carlos, 1998.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. **Engenharia de recursos hídricos**. Ed. McGRAW-HILL. São Paulo, 1978.

- MAIA, A. G. **As conseqüências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens**. 2006. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) Departamento de Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2006.
- MAROT D.; BOUCHARD J. P.; ALEXIS A. **Reservoir bank deformation modeling: application to Grangent reservoir**. Journal of Hydraulic Engineering. 131(7). 2005. 586-595 p.
- MARTINS, M. A.; COIADO, E. M. **Produção de sedimentos em microbacia cultivada com citros**. CD DO VII ENES (Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos) em 2006. Porto Alegre, 2000.
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e aplicação**. Coleção Geoprocessamento; Vol. 1. Porto Alegre: ABRH, 2001.
- MONTEIRO, A. M. V. et al. **Introdução a Ciência da Geoinformação**, Capítulo 7. INPE. São José dos Campos, 2001.
- MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use**. McGraw-Hill. New York, 1997.
- NAGLE G. N.; FAHEY T. J.; LASSOIE J. P. **Management of sedimentation in tropical watersheds**. Environmental Management. 23 (4), 1999, 441-452 p.
- NERO, M. A. **Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia dos Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2000.
- PAIVA, E. M. C. D.; COSTAS, M. F. T. **Produção de sedimentos em bacias urbanas**. CD DO VII ENES (Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos) em 2006. Porto Alegre, 2002.
- PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Editora da ABRH. Porto Alegre, 2003.
- PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D.; PARANHOS, R. M. **Produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais**. CD DO VII ENES (Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos) em 2006. Porto Alegre, 2000.

- PALMIERI, A., SHAH, F. e DINAR, A. **Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams**. Journal of Environmental Management. 61 (2), 2001, 149-163 p.
- POLETO, C.; MERTEN, G. **Qualidade dos Sedimentos**. Editora da ABRH. Porto Alegre: 2006.
- PRADO, R. B. **Geotecnologias aplicadas à análise espaço temporal do uso e cobertura da terra e qualidade da água do reservatório de Barra Bonita, SP, como suporte à gestão de recursos hídricos**. 2004. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Departamento de Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos/USP. São Carlos, 2004.
- RIDENTE JÚNIOR, J. L. **Previsão e controle da erosão em áreas urbanas**. CD DO VII ENES (Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos) em 2006. Porto Alegre, 2002.
- SENHORELO, A. P.; TEIXEIRA, E. C. **Inter-relações entre bacias hidrográficas com diferenciados usos/ocupação da terra, solos e características físicas e aporte de sedimentos a cursos d'água**. CD DO VII ENES (Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos) em 2006. Porto Alegre, 2000.
- SILVA, R. M.. **Previsão hidrossedimentológica numa bacia periurbana através do acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.
- SILVA, R. C. V.; JÚNIOR, G. W. **Hidráulica Fluvial. Volume II**. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.
- SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO (SIGRH). **Plano estadual de recursos hídricos**. Banco de Dados, 2001. Disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br>. Web site acessado no dia 12/11/2006, 2001.
- STERBERG, R. **Damming the river: a changing perspective on altering nature**. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 10 (2006), 2004, 165-197 p.
- TUCCI C. E. M. et al. **Hidrologia: ciência aplicada**. 3ª edição. Editora da UFRGS/ABRH. Porto Alegre, 2004.
- TUNDISI J. G. **Reservoir as complex systems**. Ciên. E Cul., vol. 48, n 5/6, 1996, 383-387 p.

UGRHI-PCJ. **Plano de Bacia Hidrográfica 2000-2003**. Comitê das Bacia Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, 2003.

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR (USDI). **Design of Small Dams**. Bureau of Reclamation, 1987.

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**. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, 2003.

WHITE, P.; BUTCHER, D.P.; LABADZ, J.C. **Reservoir sedimentation and catchment sediment yield in the Strines catchment**. Physics and Chemistry of the Earth. 22(3), U.K: 1997, 321-328 p.

XIXI LU e HIGGITT, D. L. **Recent changes of sediment yield in the upper Yangtze, China**. Environmental Management. 22(5), 2001, 697-709 p.