



**MARIA CLARA ALBUQUERQUE MOREIRA**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA BARRAGEM DE BARRA  
BONITA-SP NA MORFODINÂMICA DO RIO TIETÊ E SEUS  
IMPACTOS À NAVEGAÇÃO**

**Campinas**

**2012**





UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**MARIA CLARA ALBUQUERQUE MOREIRA**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA BARRAGEM DE BARRA BONITA-SP  
NA MORFODINÂMICA DO RIO TIETÊ E SEUS IMPACTOS À  
NAVEGAÇÃO**

**Orientador: Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA MARIA CLARA ALBUQUERQUE MOREIRA E ORIENTADA PELO PROF. DR. TIAGO ZENKER GIRELI.

ASSINATURA DO ORIENTADOR \_\_\_\_\_

**Campinas**

**2012**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M813a           Moreira, Maria Clara Albuquerque  
                  Avaliação da influência da barragem de Barra Bonita-  
                  SP na morfodinâmica do rio tietê e seus impactos à  
                  navegação / Maria Clara Albuquerque Moreira. --  
                  Campinas, SP: [s.n.], 2012.

                  Orientador: Tiago Zenker Gireli.  
                  Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
                  Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e  
                  Urbanismo.

                  1. Transporte de sedimentos. 2. Modelos numéricos.  
                  3. Reservatórios - Barra Bonita (SP). 4. Navegação  
                  interior. I. Gireli, Tiago Zenker, 1980-. II. Universidade  
                  Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil,  
                  Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Assessment of the influence of Barra Bonita-SP dam on  
                  morphodynamics and its impacts on navigation

Palavras-chave em Inglês: Sediment transport, Numerical models, Reservoirs -  
                  Barra Bonita (SP), Inland

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Tiago Zenker Gireli, Antonio Carlos Zuffo, Frederico Fabio  
                  Mauad

Data da defesa: 19-12-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

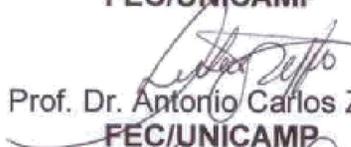
**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA BARRAGEM DE BARRA  
BONITA - SP NA MORFODINÂMICA DO RIO TIETÊ E SEUS  
IMPACTOS À NAVEGAÇÃO**

**Maria Clara Albuquerque Moreira**

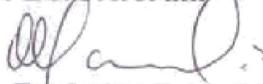
**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



**Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli  
Presidente e Orientador  
FEC/UNICAMP**



**Prof. Dr. Antonio Carlos Zuffo  
FEC/UNICAMP**



**Prof. Dr. Frederico Fabio Mauad  
EESC/USP**

Campinas, 19 de dezembro de 2012



## Dedicatória

*Ao meu amor supremo,  
Rainha soberana da minha vida,  
Luz dos meus dias.  
Geny*



## Agradecimentos

Ao meu orientador, pela confiança depositada em mim, por todas as oportunidades oferecidas e principalmente pela oportunidade de fazer parte do projeto que resultou nesta dissertação, meu muito obrigado.

À AES Tietê, por acreditar na capacidade deste grupo, do Departamento de Recursos Hídricos FEC/UNICAMP, sendo parceira em diversos projetos P&D, do qual tenho orgulho de ter participado e espero ter contribuído a altura.

Aos professores Zuffo e Gilberto Dalfré, que muito contribuíram para minha formação, seja nas disciplinas cursadas ou fora delas. Em especial ao professor Zuffo, por toda atenção dispensada às minhas dúvidas durante a modelagem.

Aos amigos do DRH, Maiara e Bruno, pelas conversas de corredor pelos litros de cafezinho na copa (valeu, Bruno!).

Ao Hélio, meu querido, pelos anos mais que agradáveis que tivemos, pelo incentivo acadêmico, pelas cervejinhas no escritório e por todas as deliciosas manhãs, tardes e noites passados juntos, catando sapos e viajando.

Aos herpetólogos, meus preferidos! Rachel, Bibi e André, lindos!

Ao Marcel, amigo querido, fiel companheiro, que quero levar para a vida toda.

À “pequena família” chamada Clara, Thais e Felipe, pela amizade e companheirismo, fundamental para uma carioca recém chegada. MUITÍSSIMO Obrigada!

À minha amiga, irmã da vida, Fernanda, que sempre teve uma mão estendida para mim, mesmo com toda minha ausência, fosse qual fosse a situação, deixando de lado suas próprias questões para me ouvir. Eu não mereço a amiga que tenho! Te amo!

À minha curumim Raio de Sol, Maria, que foi mesmo um raiozinho de sol quando eu estava à beira de um ataque de nervos. Linda! Obrigada!

Aos meus amigos tão queridos, tão amados, meus braços e pernas, Rafa e Ana Paula (Bruxa!), simplesmente por fazerem parte da minha vida. Vocês são as cores do mundo! Muito amor!

À Nora, querida, pelos livros, risadas, tardes maravilhosas na Casa das Letras, pela ajuda valiosa nos abstracts da vida, e pelos que ainda virão!

À Ana, minha “irmã por parte de tio”, menina doce que tem a força de uma leoa, sempre correndo atrás dos seus objetivos com determinação e alegria! Melhor mochileira que eu poderia encontrar! Amo muito!

À minha irmã Maria Eugênia, que tanto amo, desde o barrigão da mamãe...A menina que eu tanto esperei ver no mundo, que me fez treinar com um jacaré de pano que a mamãe costurou para que eu pudesse aprender a segurar o bebê. O amor mais puro e verdadeiro que eu tenho. Obrigada por esses 20 anos que se passaram e pelos muitos 20 anos que ainda virão. Te amo.

Por último mas não menos importante, aos meus pais. Ao Zé Paulo, que sempre acreditou em mim, mesmo, e principalmente, quando eu mesma já não acreditava. Aquele que nunca me disse um não, que nunca me deixou lamentar o fracasso e sempre me fez olhar pra frente. Meu maior entusiasta, meu Vascaíno preferido! Obrigada, Zé! À Alice, sempre cuidando para que eu tivesse tecnologias disponíveis para trabalhar melhor. Um exemplo de dedicação aos estudos, uma profissional de rara competência, uma exímia Perita e agora a mais nova advogada do pedaço. Uma apaixonada pelo que faz, que tanto me motiva a buscar na minha vida um trabalho que ame. Estou conseguindo, mãe!

À todos aqueles que direta ou indiretamente participaram desta etapa tão importante na minha vida, meu muito obrigado.

*"Mas o Dono da Tabacaria chegou à porta e ficou à porta.  
Olho-o com o desconforto da cabeça mal voltada  
E com o desconforto da alma mal-entendendo.  
Ele morrerá e eu morrerei.  
Ele deixará a tabuleta, eu deixarei os versos.  
A certa altura morrerá a tabuleta também, os versos também.  
Depois de certa altura morrerá a rua onde estive a tabuleta,  
E a língua em que foram escritos os versos.  
Morrerá depois o planeta girante em que tudo isto se deu.  
Em outros satélites de outros sistemas qualquer coisa como gente  
Continuará fazendo coisas como versos e vivendo por baixo de coisas como tabuletas."*

*(Fernando Pessoa)*

*"Que rio é este  
Pelo qual flui o Ganges?  
Que rio é este cuja fonte é inconcebível?"  
(...)*

*"De matéria perecível fui feito, de misterioso tempo"*

*(Jorge Luis Borges)*



## RESUMO

Os reservatórios de barragens são lagos artificiais e sofrem processo de sedimentação desde sua implantação, em decorrência das alterações hidráulicas provocadas no curso fluvial onde se instalou a barragem. Tal processo se encontra em estágio avançado no trecho de remanso do reservatório da Usina Hidroelétrica de Barra Bonita, localizada no interior do Estado de São Paulo e vem causando dificuldades ao transporte hidroviário. A usina, por sua vez, está instalada na Hidrovia Tietê-Paraná, a mais importante hidrovia do país, responsável pelo escoamento de uma parcela significativa da produção agrícola de exportação. Esta dissertação se propôs a estimar o volume, a taxa anual de assoreamento e a evolução espacial dos depósitos de leito observada no trecho especificado, a partir de uma metodologia que envolve a geração de modelos digitais de elevação e modelagem numérica em ambiente computacional. A partir dos resultados obtidos, foi possível reconhecer os mecanismos envolvidos no processo de sedimentação no reservatório em estudo, permitindo assim o posterior estudo e implementação de medidas estruturais e não estruturais, que visem minimizar os impactos deste processo de sedimentação à navegação na hidrovia Tietê-Paraná.

*Palavras-chave:* transporte de sedimentos, modelos numéricos, reservatórios - Barra Bonita (SP), navegação interior.



## **ABSTRACT**

The dam reservation is an artificial lake and the sedimentation process occurs since its inception, due to hydraulic changes caused on the natural river where the dam is installed. This process is at an advanced stage in the backwater stretch of the hydroelectric plant's reservoir of Barra Bonita, located within the State of Sao Paulo and has been causing difficulties for water transportation. The plant, in turn, is installed in the Tietê-Paraná, the most important waterway in the country, responsible for disposing of a significant portion of agricultural production for export. This dissertation aimed to estimate the volume, the annual rate of sedimentation and spatial evolution of the deposits observed in the bed section specified, from a methodology that involves the generation of digital elevation models and numerical modeling in computational environment. The results presented here were positive to recognize the mechanisms involved in the sedimentation reservoir under study, as well as create subsidies for the adoption of structural and nonstructural to minimize the impact of the sedimentation process in the navigation Tiete-Parana waterway.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação da capacidade de carga (Adaptado de ST/SP, 2003;Lopes,2010) .....	2
Figura 2: Plano para desenvolvimento e equilíbrio de modais (PNLT,2007).....	4
Figura 3: Consumo de energia elétrica nas diferentes regiões do Brasil (ONS,2010) .....	5
Figura 4: Esquematização dos perfis inicial e final de um curso aluvionar.....	10
Figura 5: Confluência dos rios Tietê e Piracicaba e Reservatório de Barra Bonita .....	21
Figura 6: Mapa da Hidrovia Tietê-Paraná .....	22
Figura 7: Duração de vazão e incremento computacional. Adaptado de HEC-RAS Reference Manual, 2010. ....	24
Figura 8: Cálculos no volume de controle da seção. Adaptado de HEC-RAS Reference Manual, 2010.....	26
Figura 9: Perfis De Concentração De Rouse. Adaptado de HEC-RAS Reference Manual, 2010.....	30
Figura 10: Hipóteses De Mistura E Proteção De Camada: Exner5 e Método Camada Ativa. Adaptado de HEC-RAS Reference Manual, 2010.....	31
Figura 11: Teoria da velocidade de queda da partícula. ....	32
Figura 12: Área de abrangência do levantamento batimétrico .....	35
Figura 13: Sobreposição dos levantamentos realizados pelo DH-SP. ....	37
Figura 14: Localização dos postos fluviométricos .....	38
Figura 15: Demarcação das bacias e sub-bacias de contribuição da área de estudo....	39
Figura 16: Transformação de coordenadas geográficas em seções transversais.....	43
Figura 17: Composição das batimetrias e contorno do reservatório. ....	44
Figura 18: Localização dos pontos de coleta de sedimento .....	47
Figura 19: Seções transversais em toda extensão do reservatório de Barra Bonita .....	48
Figura 20: Interface da entrada de dados de geometria no programa de modelação ....	49
Figura 21: Entrada de dados sedimentológicos no modelo.....	51
Figura 22: Modelo digital de elevação referente ao ano de 2006.....	58

Figura 23: Modelo digital de elevação referente ao ano de 2007.....	59
Figura 24: Modelo digital de elevação referente ao ano de 2010.....	60
Figura 25: Modelo digital de elevação referente ao ano de 2010.....	61
Figura 26: Subtração de superfícies 2007-2006.....	64
Figura 27: Subtração de superfícies 2010-2007.....	65
Figura 28: Histórico da calibração do modelo sedimentológico.....	67
Figura 29: Resultado da Calidação do modelo sedimentológico.....	68
Figura 30: Resultado da Validação do modelo.....	69
Figura 31: Ilha consolidada no ano de 2010.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação da eficiência do transporte hidroviário.....	3
Tabela 2: Descrição dos levantamentos batimétricos realizados por DH-SP.....	36
Tabela 3: Declividade da linha de energia para diferentes valores de coeficiente de <i>Manning</i> .....	62
Tabela 4: Volumes de referência obtidos a partir dos MDE's.....	63



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma$ : peso específico da água ( $1000 \text{ kgf/m}^3$ )

$\gamma_s$ : peso específico do grão ( $265 \text{ kgf/m}^3$ )

$g$ : aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ )

$R$ : raio hidráulico (m)

$S$ : declividade ( $\text{km.km}^{-1}$ )

$V$ : velocidade média no canal (m/s)

$d_{50}$ : diâmetro médio do grão (mm)

$d_{35}$ : diâmetro tal que 35% da amostra é mais fino (mm)

$d_{65}$ : diâmetro tal que 65% da amostra é mais fino (mm)

$\tau'_0$ : tensão de arraste devido à resistência do grão ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$\tau_c$ : tensão crítica de arraste ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$v$ : velocidade média do escoamento (m/s)

$d$ : profundidade do escoamento (m)

$D$ : profundidade efetiva de escoamento da partícula (m)

$u_*$ : velocidade de atrito (m/s)

$\nu$ : viscosidade cinemática do fluido ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$G_{ssl}$ : sedimentos em suspensão na zona inferior ( $\frac{\text{ton}}{\text{dia}}/\text{m}$ );

$G_{ssm}$ : sedimentos em suspensão na zona média ( $\frac{\text{ton}}{\text{dia}}/\text{m}$ );

$G_{ssu}$ : sedimentos em suspensão na zona superior ( $\frac{\text{ton}}{\text{dia}}/\text{m}$ );

$G_{sb}$ : carga de sedimentos do leito ( $\frac{ton}{dia}/m$ );

$M$ : parâmetro da concentração de sedimentos ( $g/cm^3$ );

$C_l$ : concentração de sedimentos na zona inferior ( $g/cm^3$ )

$k_r$ : coeficiente de rugosidade, adimensional

$k'_r$ : coeficiente de rugosidade em função da partícula, adimensional

$g_s$ : taxa de transporte de sedimentos unitária ( $\frac{g}{s}/m$ )

$C_m$ : Concentração de sedimentos ( $g/cm^3$ );

# SUMÁRIO

RESUMO.....	XIII
ABSTRACT .....	XV
<b><u>1. INTRODUÇÃO .....</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>2. OBJETIVOS.....</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b><u>3. REVISÃO DE LITERATURA .....</u></b>	<b><u>9</u></b>
3.1. MORFOLOGIA FLUVIAL.....	9
3.2. BARRAGENS E RESERVATÓRIOS.....	11
3.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	13
<b><u>4. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO .....</u></b>	<b><u>21</u></b>
<b><u>5. DESCRIÇÃO DO MODELO HEC-RAS.....</u></b>	<b><u>23</u></b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	23
5.1.1 ESCOAMENTO “QUASI-UNSTEADY FLOW” .....	23
5.1.2 CONTINUIDADE DE SEDIMENTAÇÃO .....	25
5.1.3 COMPUTAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	26
5.2. CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	26
5.2.1 POTENCIAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	27
5.2.2 CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	27
5.3. LIMITAÇÕES DE CONTINUIDADE .....	28
5.3.1 LIMITAÇÃO TEMPORAL DE DEPOSIÇÃO .....	28
5.3.2 LIMITANTE TEMPORAL DE EROÇÃO .....	28
5.3.3 PROFUNDIDADE EFETIVA DE TRANSPORTE .....	29
5.3.4 MISTURA E PROTEÇÃO DE LEITO.....	30

5.4. VELOCIDADE DE QUEDA DA PARTÍCULA .....	32
5.5. RESULTADO FINAL DE ALTERAÇÃO DO LEITO.....	33
<b><u>6. METODOLOGIA.....</u></b>	<b><u>35</u></b>
6.1. AQUISIÇÃO DE DADOS.....	35
6.2. DEFINIÇÃO DA ÁREA DA MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	41
6.3. PROCESSAMENTO DOS LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS .....	42
6.4. DADOS HIDROLÓGICOS.....	45
6.5. DADOS SEDIMENTOLÓGICOS.....	45
6.6. ENTRADA DE DADOS NO MODELO UNIDIMENSIONAL .....	48
<b><u>7. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....</u></b>	<b><u>53</u></b>
7.1. METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	53
7.2. VALIDAÇÃO DO MODELO.....	55
<b><u>8. RESULTADOS.....</u></b>	<b><u>57</u></b>
8.1. PROCESSAMENTO DOS LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS .....	57
8.2. COEFICIENTE “ <i>N</i> ” DE <i>MANNING</i> .....	62
8.3. RESULTADO DOS VOLUMES DE REFERÊNCIA .....	62
8.4. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO SEDIMENTOLÓGICO .....	66
<b><u>9. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.....</u></b>	<b><u>71</u></b>
<b><u>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u></b>	<b><u>75</u></b>
<b><u>ANEXO I – RESULTADOS DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SEDIMENTOS .....</u></b>	<b><u>77</u></b>
<b><u>ANEXO II – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DE SEÇÕES BATIMÉTRICAS DURANTE OS ANOS DE 2006, 2007 E 2010. ....</u></b>	<b><u>83</u></b>
<b><u>ANEXO III – COMUNICADO “ALTERAÇÃO DE CALADO” (EPN-TORQUE, 2012) ...</u></b>	<b><u>98</u></b>

## 1. INTRODUÇÃO

Apesar da notória hidrografia e figurando no ranking dos países mais abundantes em águas superficiais e subterrâneas do mundo, a navegação de interior no Brasil não ocupa nem de longe uma posição de destaque na matriz de transportes brasileira. O transporte aquaviário corresponde a apenas 13,6% dos modais, ficando atrás do modal ferroviário que representa 27% da matriz liderada pelo modal rodoviário em 58%, conforme boletim divulgado pelo Plano Nacional de Logística de Transportes, o PNLT, em 2007.

Dos mais de 40.000 quilômetros de vias potencialmente navegáveis no Brasil, metade da malha hidrográfica é naturalmente navegável, ou seja, dispensa totalmente ou quase totalmente obras de infraestrutura que permitam o tráfego, e apenas 8.500 quilômetros estão sendo navegados comercialmente (ARHANA, 2010).

Mesmo com baixos custos de implantação e manutenção, o modal hidroviário foi preterido ao rodoviário na década de 50, momento em que as indústrias estrangeiras do setor automobilístico se instalaram no país, atraídas pela contrapartida do governo brasileiro de investir em rodovias. Hoje, contudo, o sistema de transporte rodoviário está próximo de uma situação de colapso.

Além do alto custo de manutenção, custos devidos aos impactos ambientais causados tanto pelo consumo de combustível dos caminhões quanto pela emissão de gases de efeito estufa, a falta de manutenção de muitas estradas brasileiras contribui para o alto número de acidentes fatais. Como muito material contaminante é transportado pelas rodovias, estes acidentes resultam em ainda mais prejuízos sociais, econômicos e ambientais.

A eficiência natural do transporte hidroviário é expressiva frente aos outros modais, principalmente quando comparada ao rodoviário. Até o ano de 2010, o calado máximo permitido para embarcações, era de 2,5 metros. Nestas condições, o Comboio Tietê, embarcação padrão para transporte de cargas na hidrovia, transporta de uma só vez 2.200 toneladas de carga, o equivalente a 88 caminhões com capacidade para 25 toneladas cada. Após o ano de 2010, a permissão para calado máximo passou a ser

3,0 metros, possibilitando que os comboios trafegassem com mais carga, e a capacidade do Duplo Tietê passou de 4.400 toneladas (equivalente a 176 caminhões) para aproximadamente 5800 toneladas.(Figura 1).

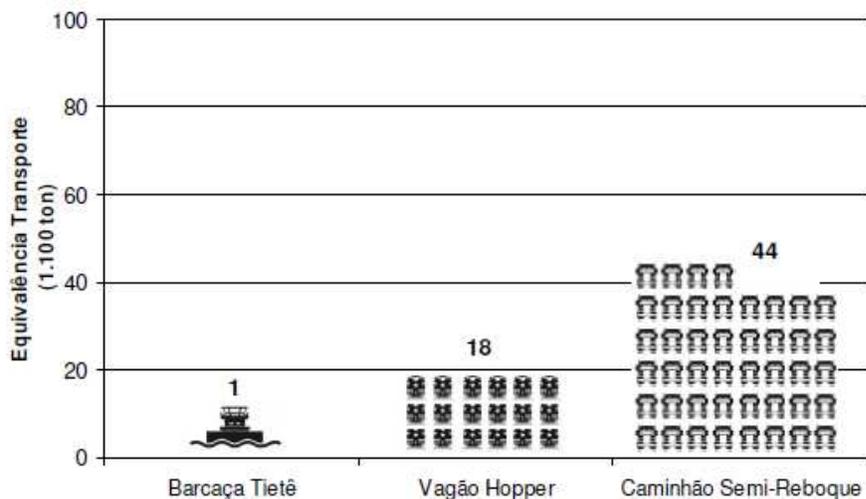


Figura 1: Comparação da capacidade de carga (Adaptado de ST/SP, 2003;Lopes,2010)

Iqbal & Hasegawa (2001) compararam a eficiência ecológica e econômica entre os dois modais, para nove rotas comerciais diferentes no Japão, cujos resultados foram traduzidos na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação da eficiência do transporte hidroviário

<b>Substância</b>	<b>Unidade</b>	<b>Caminhão</b>	<b>Navio Cabotagem</b>
<b>Energia Consumida</b>	MJ/ton-Km	2,88	0,499
<b>Radiação Solar</b>	MJ/kg-fuel	42,7	40,7
<b>Emissão CO<sub>2</sub></b>	Kg/ton-km	0,288	3,95 x 10 <sup>-2</sup>
<b>Emissão NO<sub>x</sub></b>	Kg/ton-km	4,10 x 10 <sup>-3</sup>	7,11 x 10 <sup>-4</sup>
<b>Emissão SO<sub>x</sub></b>	Kg/ton-km	3,43 x 10 <sup>-4</sup>	5,95 x 10 <sup>-5</sup>
<b>Emissão N<sub>2</sub>O</b>	Kg/ton-km	5,50 x 10 <sup>-6</sup>	9,54 x 10 <sup>-7</sup>
<b>Emissão Metano</b>	Kg/ton-km	2,77 x 10 <sup>-4</sup>	4,81 x 10 <sup>-5</sup>
<b>Emissão Amônia</b>	Kg/ton-km	6,19 x 10 <sup>-9</sup>	1,07 x 10 <sup>-9</sup>
<b>Emissão HCL</b>	Kg/ton-km	4,66 x 10 <sup>-7</sup>	8,07 x 10 <sup>-8</sup>
<b>Emissão HF</b>	Kg/ton-km	4,87 x 10 <sup>-8</sup>	8,44 x 10 <sup>-9</sup>
<b>Emissão CxHy</b>	Kg/ton-km	1,36 x 10 <sup>-6</sup>	2,37 x 10 <sup>-7</sup>
<b>Emissão Benzeno</b>	Kg/ton-km	8,38 x 10 <sup>-6</sup>	1,42 x 10 <sup>-6</sup>
<b>Emissão Partículas em Suspensão</b>	Kg/ton-km	9,39 x 10 <sup>-5</sup>	1,63 x 10 <sup>-5</sup>

Fonte: K.S. Iqbal and K. Hasegawa: Inland transportation impact on ecology and economics

No que concerne aos poluentes mais nocivos à atmosfera, a tabela mostra diminuições nos totais emitidos, como por exemplo, a diminuição de mais de sete vezes na emissão de CO<sub>2</sub> (7,29 vezes) e mais de cinco vezes (5,75 vezes) na emissão de gás metano, quando se comparam os dois meios de transporte.

Atualmente, o Governo Brasileiro, através do Programa Nacional de Logística de Transportes (PNLT) está incentivando o desenvolvimento das hidrovias brasileiras, e propôs como meta a ser alcançada até 2025, maior equilíbrio entre os modais de transporte, no intuito de minimizar para 33% a participação rodoviária além de aumentar para 32% a participação ferroviária e 29% a hidroviária. A Figura 2 ilustra este cenário.

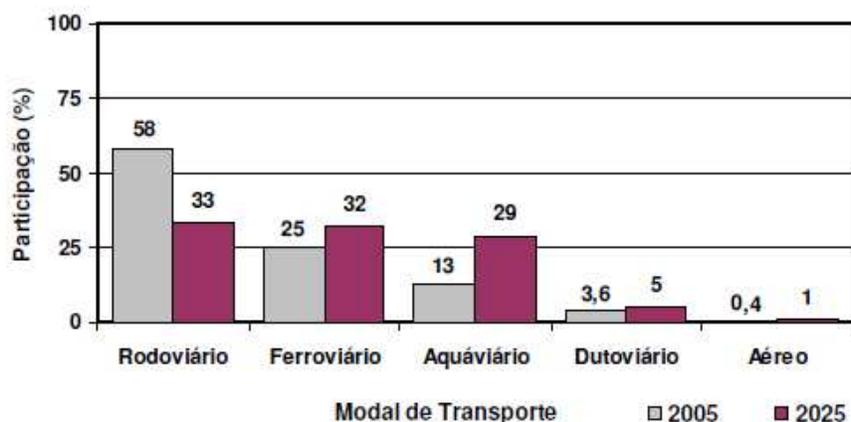


Figura 2: Plano para desenvolvimento e equilíbrio de modais (PNLT,2007)

Além de hidrovias, os grandes cursos fluviais são largamente empregados na geração de energia elétrica. A energia gerada por usinas hidrelétricas é de baixo custo final ao consumidor, quando comparada a outras fontes de energia, e é considerada energia limpa e renovável, pois não há queima de combustíveis fósseis, a exemplo das fontes térmicas, e não apresenta os riscos das fontes nucleares. No entanto, seria impossível dizer que a instalação de uma usina energética não tenha efeitos deletérios ao meio ambiente, como será abordado em momento oportuno.

Segundo o Banco de Informações de Geração – BIG pertencente à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil, até o ano de 2010, possui 2.323 usinas de geração de energia elétrica em operação, cuja capacidade instalada total é de 111.522 MW. Deste total, 174 usinas são hidrelétricas, porém, representam 76,9% do total da capacidade instalada em operação no Brasil (BIG, 2010), que ainda tem um potencial a ser explorado estimado em 260 mil MW. A região sudeste, onde está situada a Usina de Barra Bonita, consome anualmente 293.790,10 GWh de energia, superando, por exemplo, em quatro vezes o total consumido na região Sul (Figura 3), a segunda maior consumidora de energia no Brasil. (ONS, 2010).

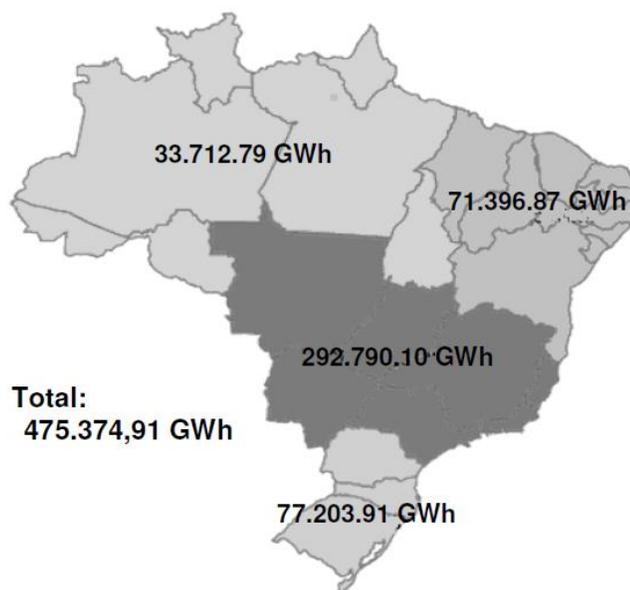


Figura 3: Consumo de energia elétrica nas diferentes regiões do Brasil (ONS,2010)

A hidrovía Tietê-Paraná, especificamente, abrange 220 municípios, com área de influência de 800.000 km<sup>2</sup> e sua cascata de barragens possui 22.600 MW de potência instalada. A região sobre a qual a hidrovía se insere ocupa uma área de 76 milhões de hectares, distribuídos por cinco estados, onde se concentra a produção agrícola de exportação e os mais importantes e expressivos pátios industriais, tornando-se a região econômica mais influente do Brasil, responsável pela geração de 50% do Produto Interno Bruto.

Um dos principais impactos a serem observados após a construção de uma barragem é a diminuição drástica da vazão sólida escoada pelo rio. Diversos são os impactos oriundos diretamente da presença de barragens. A regularização da vazão, obtida com o reservatório, diminui o efeito da sazonalidade hidrológica, isto é, os períodos de pluviosidade e estiagem que são determinantes para a vazão natural do rio deixam de agir sobre o sistema fluvial, alterando as características físico-químicas da água e afetando a fauna local.

No âmbito da engenharia, os reservatórios de grandes barragens retêm aproximadamente 99% da carga de sedimentos transportada pelo rio (Williams e Wolman, 1984), que, associada à diminuição da vazão líquida, promove a erosão das margens e assoreamento do leito, bem como o assoreamento no interior do reservatório, cuja capacidade de armazenamento de volumes de água é diminuída ano após ano em função da retenção de sedimentos. Este último efeito é o tema que será abordado nesta dissertação.

Para além do ambiente fluvial, a retenção de sedimentos provocada pelos barramentos é responsável por situações extremamente agravadas de erosão costeira. O rio São Francisco teve sua vazão diminuída em 30% durante os anos de 1980 e 2000, e as cargas e descargas de material em suspensão reduzidas em mais de 10 vezes nos últimos 20 anos (Medeiros, 2003), sendo um caso emblemático de erosão das praias próximas a sua foz. Outro caso notório é o do rio Paraíba do Sul, em que a praia localizada próximo à sua foz vem avançando em direção ao continente a uma taxa de progradação de 7,5 m/ano (Bastos, 1997).

Neste contexto, esta dissertação tem como principal objetivo a modelação numérica unidimensional do Reservatório de Barra Bonita, para que se possa entender como se dá o processo de sedimentação no reservatório de Barra Bonita e assim poder prover subsídios necessários para que seja possível minimizar o impacto da frente de sedimentos carregada pelo rio em direção à soleira da barragem, que atualmente gera limitações ao transporte hidroviário.

## **2. OBJETIVOS**

O presente estudo teve por objetivo a modelação hidrodinâmica e sedimentológica do reservatório da Usina Hidroelétrica de Barra Bonita.

O local de estudo foi escolhido por estar contido na região da hidrovia de maior importância econômica do país, por onde são escoados 80% da produção agrícola e de minérios diversos. Por se tratar de um reservatório multifinalitário, em que a necessidade de geração de energia elétrica esbarra na imposição de profundidades mínimas a serem mantidas para tráfego de embarcações na hidrovia, o conflito de interesses é hoje um dos maiores entraves na operação de Barra Bonita.

A modelação numérica unidimensional foi conduzida a partir do mapeamento e delimitação do material já depositado dentro e fora da faixa balizada de navegação, e da estimativa de volumes e taxa de assoreamento ao longo dos anos, tendo por base dados de 2006 a 2011.

A modelação hidrodinâmica e o entendimento da geomorfologia nesta porção do rio Tietê geram subsídios necessários para modelamento e execução de obras de melhoria para os trechos críticos, viabilizando manter profundidades mínimas exigidas para o tráfego hidroviário neste local.



### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. Morfologia Fluvial**

Em definição simplificada, os cursos d'água são formados a partir do afloramento do lençol freático para a superfície, e então, na presença de relevo acidentado, começa a escoar sob a ação da força da gravidade e por fim encontra o mar. Este processo envolve três etapas bem definidas: a formação do leito, modelação do leito e estabilização do curso fluvial.

O início do curso d'água e definição daquilo que será sua bacia hidrográfica se dá na fase de formação do rio, onde o afloramento do lençol freático juntamente com a recarga pluvial escoam em direção às linhas de maior declividade no terreno até encontrar o talvegue natural. Em virtude da declividade elevada, o escoamento nesta etapa é de alta velocidade e conseqüente poder erosivo elevado, fragmentando as rochas que irão conformar seu leito a jusante.

A hidrodinâmica erosiva nesta etapa, que, no momento em que o rio estiver estabilizado será chamado de trecho de alta bacia ou curso superior, resulta na progressiva diminuição da declividade da calha a jusante, em função do nível de base, ou seja, há o aprofundamento do leito do rio, que vai se conformando em um vale encaixado em forma de V, de tendência retilínea (Ramos, 1984). A fragmentação das rochas gera transporte de material sedimentar não selecionado, variando de argila a grandes blocos, que irá se depositar à jusante.

Uma segunda fase neste processo morfológico é a modelação do leito. À medida que o rio em formação atinge menores declividades, há uma conseqüente diminuição na velocidade de escoamento e também no poder erosivo. É na planície aluvionar que se tem início a conformação meandrante dos rios, na qual o escoamento tem tendência erosiva na margem côncava e deposicional na margem convexa, até atingir o equilíbrio entre declividade e velocidade de escoamento. Ainda há a tendência de aprofundamento da seção transversal e encaixe do leito, porém, o processo que atua com maior intensidade nesta fase é o de sedimentação do material anteriormente

fragmentado e transportado pelo escoamento. Este será o trecho fluvial correspondente à média bacia ou curso médio.

Por fim, à medida que a declividade do leito torna-se cada vez menor, menor também se torna a distância altimétrica entre o nível de repouso da água e o nível de base. A energia do sistema é mínima e basicamente serve apenas a garantir o próprio escoamento da água até a foz. A hidrodinâmica neste estágio já perdeu quase totalmente sua capacidade erosiva, e há tendência constante da formação de bancos de areias em diversos pontos, até a desembocadura no mar. A situação inicial do perfil longitudinal e conformação do perfil de equilíbrio estão ilustradas pela Figura 4.

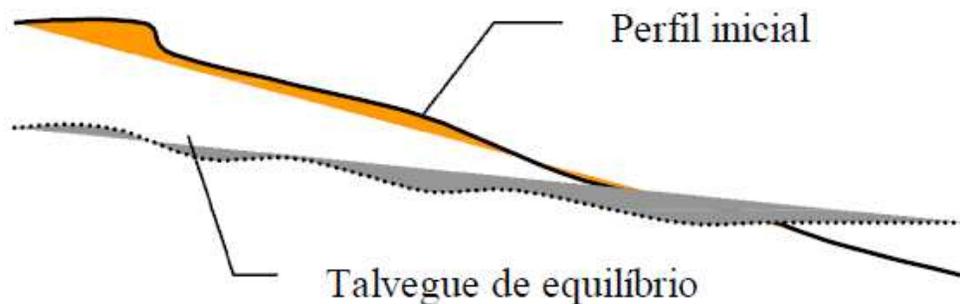


Figura 4: Esquemática dos perfis inicial e final de um curso aluvionar

O processo fluvial é um processo dinâmico, que evolui sobre seus próprios depósitos sedimentares, erodindo e depositando o material do leito continuamente, sofrendo constante recarga dos aquíferos e da pluviosidade. O estado de equilíbrio alcançado por um rio é então um equilíbrio dinâmico, atingido quando o balanço entre erosão e deposição não produzem alterações significativas de forma no curso d'água (Alfredini, 2004). Sendo este equilíbrio um equilíbrio dinâmico, causas naturais ou antropogênicas são capazes de interferir e alterá-lo, rompendo a condição natural de equilíbrio e forçando o mesmo a migrar para uma nova condição de equilíbrio.

### **3.2. Barragens E Reservatórios**

Barragens são estruturas hidráulicas instaladas transversalmente no curso dos rios que tem por finalidade a obtenção de um lago, um reservatório, para desta forma garantir o abastecimento urbano, industrial, gerar energia elétrica e auxiliar no controle de cheias.

Os primeiros registros de construção de barragens remontam ao ano 3000 AC no rio Jordão (Schmitter, 1994), e a quantidade de reservatórios e barragens no mundo aumentou conforme a própria população e suas necessidades aumentaram. Em 1900, havia 427 grandes barragens ao redor do mundo, ou seja, aquelas com altura superior a 15 metros ou com vazão superior a 2.000 m<sup>3</sup>/s. Em 1950, já se contabilizavam 5.268 barragens, em 1986, aproximadamente 39.000 (ICOLD, 1988). Nos dias de hoje já são 45.000 grandes barragens espalhadas pelo mundo.

Nas últimas décadas a construção de novas barragens e reservatórios se concentrou em regiões de clima quente, elevadas taxas de precipitação e intensa perda de solo (Gleick, 1993 apud Brandt, 2001) como América do Sul e Ásia. No Brasil não foi diferente e praticamente todos os grandes reservatórios aparecerem nas décadas de 1960 e 1970, com a construção das represas de Três Marias, Paulo Afonso e Sobradinho, todas no rio São Francisco (CHESF, 2010).

A interrupção do fluxo natural de um curso d'água provoca uma série de efeitos de ordem hidrológica e geomorfológica nos rios. Cunha (2001) ressalta que as características do leito e o padrão de drenagem, associadas à geometria do canal, conferem uma dinâmica de escoamento e de processos fluviais específicas para cada rio.

A velocidade do escoamento é função basicamente de três parâmetros: a declividade do perfil longitudinal, forma da seção transversal e rugosidade do leito. Estes fatores, mais o volume de água que atravessa o perfil, promovem a dinâmica de erosão e sedimentação das margens, que é erodida em um ponto e em seguida tem seu material depositado em outro, mais a jusante.

A relação entre a capacidade de transporte do fluxo e a carga de sedimentos que é liberada após a barragem, em conjunto com a erodibilidade do leito e a

erosividade do fluxo, irá determinar alterações no leito fluvial, que irá se ajustar a uma nova condição de equilíbrio (Brandt, 2000). Estas alterações produzem respostas geomorfológicas relativamente rápidas, e se por um lado elas podem ser extremamente danosas para os ambientes fluviais e costeiros, exigindo um olhar crítico e abrangente sobre seus efeitos, por outro lado propicia estudos bem detalhados no âmbito acadêmico.

A compreensão dos fenômenos associados à construção de barragens representa um assunto estratégico para o desenvolvimento econômico, porém, estudos integrativos sobre o tema apenas foram realizados mais recentemente. Muitos estudos restringiam-se à sedimentação apenas nos reservatórios e tinham por finalidade verificar a vida útil do mesmo (Eakin 1939, Gimenez et al 1981, Tundisi et al 1998), negligenciando os efeitos provocados nos leitos e margens. Volker & Henry (1988) trouxeram uma abordagem mais abrangente sobre diversos efeitos oriundos do represamento de rios, Barrow (1987) estudou os efeitos de barragens e reservatórios nos trópicos e Xu (1990) observou os efeitos para o trecho a montante de barragens.

Detalhados estudos geomorfológicos foram realizados por Petts (1979,1984), Williams e Wolman (1984) e Carling (1988), ainda com foco sobre a erosão no canal principal logo abaixo das barragens, por suas implicações operacionais nas usinas. Outros estudos, como os de Petts (1980,1982) e Gregory (1987) incluem a questão do assoreamento nos tributários a jusante e Brandt (2000) traz um panorama sobre a previsão das alterações geomorfológicas após a construção de barragens.

Harvey (1969) talvez tenha sido um dos primeiros autores a não se focar apenas nas implicações operacionais causadas pelas alterações de morfologia do leito. Em seu estudo o autor traz a compreensão de que, em última análise, o equilíbrio do leito era governado pela relação entre a capacidade erosiva e associada a altas vazões, e o processo de assoreamento pela relação entre o crescimento da vegetação associado às baixas vazões.

### **3.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

#### 3.3.1 Introdução

O transporte sólido durante o escoamento se dá quando as tensões hidrodinâmicas superam as tensões de resistência dos grãos. Uma vez que a tensão de arraste promovida pelo escoamento supere a tensão crítica de arraste do grão, haverá a movimentação do material de fundo, na forma de erosão e transporte de material sólido. A resistência do grão às tensões de arraste varia de acordo com a natureza dos sedimentos, se coesivos ou não coesivos, e com parâmetros físicos, tais como fator de forma e peso específico.

Os sedimentos coesivos são os siltes e argilas, sedimentos finos sujeitos às forças de coesão entre partículas, em que a atração química entre eles é o maior impeditivo da ação hidrodinâmica. Os sedimentos chamados não coesivos são os de maior granulometria, como areias, seixos, cascalhos e pedregulhos, normalmente encontrados nos rios de cabeceira. Para esta classe de sedimentos a resistência à ação hidrodinâmica se dá em função do próprio peso do material.

Por essa diferença nas dimensões e peso das partículas, o transporte sólido se dá em duas categorias distintas, por arrastamento de fundo e por suspensão. O material mais fino e, portanto mais leve, é posto em suspensão e levado pelo escoamento, ou seja, não contribui para o processo de conformação do leito fluvial. Os sedimentos de maiores dimensões deslocam-se sobre o próprio leito, sofrendo abrasão e fragmentando-se, ao longo do curso, em partículas menores. Este processo de deslocamento e abrasão é computado como fator de conformação do leito fluvial.

As partículas em suspensão com velocidades próximas à velocidade do escoamento, deslocam-se pelo meio líquido com velocidades muito superiores do que aquelas movimentadas junto ao leito (Alfredini, 2004). Este movimento é praticamente constante enquanto que o arrastamento de fundo se dá de maneira intermitente (Ramos, 1984)

Diversos pesquisadores se inclinaram sobre essa questão na tentativa de encontrar uma equação capaz de quantificar a capacidade de transporte de sedimentos. Por se tratar de uma dinâmica complexa na qual vários são os fatores que atuam no transporte de sedimentos, como por exemplo, a natureza do sedimento, tamanho de partículas, vazões, perfil longitudinal, dentre outros, a modelagem deste fenômeno acaba sendo de difícil formulação analítica.

As formulações que serão expostas a seguir são todas empíricas, fruto de observações em campo e experimentações em laboratório, o que explica a discrepância observada na capacidade de transporte de sedimentos quando calculada, para um mesmo rio, por diferentes equações. Em alguns casos a diferença no resultado varia em ordens de grandeza.

Sendo assim, a escolha de uma ou outra equação a ser usada deve, sempre que possível, se pautar pela similaridade entre os parâmetros hidráulicos dos rios que serviram de base para a formulação da mesma e os rios a serem estudados.

### 3.3.2 Meyer-Peter & Müller (1948)

A equação de Meyer-Peter & Müller (MPM) (1948) foi uma das primeiras equações desenvolvidas e ainda é uma das mais amplamente utilizadas, sendo basicamente uma função simples da tensão de arraste. Foi desenvolvida a partir de experimentos com cascalhos e areia em fundo plano, sendo mais eficiente em leitos com predominância de cascalho. Por esse motivo, subestima o potencial de transporte para sedimentos mais bem selecionados.

Recentemente, Wong (2003) e Wong & Parker (2007), revendo os dados originais da formulação de MPM, demonstraram que esta função superestima o potencial de transporte em aproximadamente um fator de ordem dois, e propuseram uma correção na tensão crítica de Shields.

As equações necessárias para o método de cálculo são apresentadas na Equação 1 e Equação 2.

$$X = \frac{G_{gr} \cdot s \cdot d_s}{D \left( \frac{u_*}{V} \right)^n} \quad (1)$$

$$G_{gr} = C \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right) \quad (2)$$

### 3.3.3 Engelund-Hansen (1967)

Método desenvolvido com dados obtidos por modelo físico, granulometria ensaiada restrita à areia grossa, ou seja, grãos entre 0,19 mm e 0,93 mm, relativamente uniformes. O grande atrativo desta equação é a simplicidade de aplicação, que envolve apenas os parâmetros velocidade do escoamento, tensão de arraste e diâmetro efetivo médio  $d_{50}$  dos grãos.

Este método se mostra útil para os casos em que não se tem dados dos demais parâmetros do curso d'água e se deseja uma avaliação mais urgente, ainda que esta não produza o resultado mais fidedigno possível.

A equação final está descrita pela Equação 3.

$$g_s = 0,05 \gamma_s \cdot V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \cdot \left[ \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d_{50}} \right]^{3/2} \quad (3)$$

### 3.3.4 Laursen-Copeland (1968, 1989)

A equação de Laursen (1968) baseou-se inicialmente em dados de modelos reduzidos e posteriormente foi expandida por Madden, com a inclusão de dados do Rio Arkansas. Esta formulação abrange os parâmetros velocidade de atrito ( $U_*$ ), tensão de arraste do escoamento e tensão crítica do grão. Copeland em 1989 generalizou a formulação de Laursen para que a mesma pudesse ser aplicada para leitos de granulometria grosseiras, como cascalhos.

O atrativo desta formulação é sua aplicabilidade tanto para leitos de granulometria mais grosseira como para leitos siltsos, pois sua formulação inicial foi desenvolvida para sedimentos muito finos, o que resulta na não necessidade da extrapolação de dados para estes materiais.

Estudos recentes da Universidade do Colorado demonstraram que a formulação Laursen-Copeland supera em desempenho as demais equações para estimativa de potencial de transporte para sedimentos muito finos.

A Equação 4 exhibe a fórmula final do método de Laursen-Copeland.

$$C_m = 0,01\gamma \left(\frac{d_s}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right) f\left(\frac{u_*}{w}\right) \quad (4)$$

A função  $f\left(\frac{u_*}{w}\right)$  expressa uma razão entre velocidade de atrito e velocidade de queda da partícula, descrita no trabalho original do autor em 1958.

### 3.3.6 Toffaleti (1968)

Assim como Engelund-Hansen, a equação de Toffaleti (1968) é uma função de carga total de sedimentos, desenvolvida essencialmente sobre partículas da fração areia. Este método é normalmente indicado para grandes rios e vazões e de elevada carga suspensa, não sendo muito dependente das tensões críticas e de arraste.

Uma característica singular desta formulação é a subdivisão da coluna líquida em zonas distintas, e o cálculo da carga suspensa para cada uma destas zonas e o transporte é igualmente calculado para cada região da coluna líquida.

Além desta particularidade, Toffaleti usou dois diâmetros diferentes no desenvolvimento de sua formulação,  $d_{50}$  e  $d_{65}$ , impondo uma análise mais fidedigna ao potencial de transporte nas condições estudadas.

Toda a modelação sedimentológica realizada neste trabalho envolveu esta formulação, por ter sido desenvolvida em ambiente semelhante ao protótipo aqui estudado, e apresentar discretizações adequadas aos dados disponíveis e ao padrão de sedimentos encontrados na área de estudo.

A formulação de Toffaleti está apresentada nas equações 5,6,7 e 8.

- camada inferior:

$$g_{ssl} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0.756z} - (2d_m)^{1+n_v-0.756z}}{1+n_v-0.756z} \quad (5)$$

- camada intermediária:

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.224z} \left[ \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-z} \right]}{1+n_v-z} \quad (6)$$

- camada superior:

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.224z} \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-1.5v}}{1 + n_v - 1.5z} \quad (7)$$

- no leito:

$$g_{sb} = M(2d_m)^{1+n_v-0.756z} \quad (8)$$

$$M = 43.2 C_L (1 + n_v) V \cdot R^{0.756z - n_v} \quad (9)$$

A concentração de sedimentos é expressa pela Equação 10.

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_{ssb} \quad (10)$$

### 3.3.5 Ackers & White (1973)

O método de Ackers & White (1973) é uma função de carga total de sedimentos, ou seja, carga de arraste mais carga de suspensão, desenvolvida a partir de leitos de granulometria relativamente uniforme, variando de areia fina a cascalho fino ( $0,04\text{mm} < d < 4 \text{ mm}$ ). Partículas de dimensões inferiores à fração areia fina (silte) apresentam comportamento coesivo, o que não é representado pelas equações convencionais de transporte de sedimentos.

O desenvolvimento deste método foi baseado na análise adimensional dos parâmetros envolvidos no transporte sólido após quase 1000 experimentos realizados, em profundidades de escoamento de até 0,4 metros e número de Froude inferior a 0,8. O sedimento em suspensão é uma função da velocidade de queda, enquanto carga de fundo é função da tensão de arraste. Os autores comprovaram que o método não é sensível à conformação de fundo, podendo ser aplicados para leito plano, rugas ou dunas.

A equação geral para transporte de sedimentos proposta por Ackers & White é apresentada pela Equação 11 e Equação 12.

$$X = \frac{G_{gr} \cdot s \cdot d_s}{D \left( \frac{u_*}{V} \right)} \quad (11)$$

$$G_{gr} = C \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right) \quad (12)$$

### 3.3.7 Yang (1973,1974)

Yang propõe um equacionamento desenvolvido com dados de campo e dados experimentais, para carga total de sedimentos, isto é, sedimentos de leito e sedimentos em suspensão, desde areias à cascalhos. A equação foi baseada na potência de fluxo, a qual relaciona a velocidade de atrito com a declividade da calha. É composta de duas relações separadas para cada uma das duas classes de grãos envolvidas, e a fim de evitar grandes descontinuidades, a transição entre os materiais foi suavizada e correlacionada.

As velocidades do fluxo e de queda tendem a ser mais influentes nos resultados desta equação do que nas outras. A Equação 13 é aplicada para fração areia,  $d_m < 2$  mm; e a Equação 14 para fração cascalho,  $d_m \geq 2$  mm.

$$\log C_t = 5,435 - 0,286 \log \frac{wd_m}{\nu} - 0,457 \log \frac{u_*}{w} + \left( 1,799 - 0,409 \log \frac{wd_m}{\nu} - 0,314 \log \frac{u_*}{w} \right) \log \left( \frac{VS}{w} - \frac{V_{cr}S}{w} \right) \quad (13)$$

$$\log C_t = 6,681 - 0,633 \log \frac{wd_m}{\nu} - 4,816 \log \frac{u_*}{w} + \left( 2,784 - 0,305 \log \frac{wd_m}{\nu} - 0,282 \log \frac{u_*}{w} \right) \log \left( \frac{VS}{w} - \frac{V_{cr}S}{w} \right) \quad (14)$$

## 4. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A UHE Barra Bonita está localizada no rio Tietê, na sub-bacia do Médio Tietê Inferior (Figura 5) e pertence à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê – Sorocaba (UGRHI 10), conforme definido pelo Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo – SigRH. O braço direito da confluência é o rio Piracicaba que está inserido na bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. De acordo com o Comitê de Bacia Hidrográfica do Médio Tietê, dos sete municípios que compõe esta sub-bacia, quatro não possuem nenhum ou quase nenhum tipo de tratamento de esgoto, e os efluentes são lançados in natura no corpo hídrico. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental classifica o reservatório de Barra Bonita como eutrófico.

O reservatório de Barra Bonita (Figura 5) é o primeiro de uma cascata de reservatórios subsequentes que juntos produzem 22,60 GW de potência em suas usinas, distribuídas ao longo da Hidrovia Tietê-Paraná, uma das mais importantes do Brasil.



Figura 5: Confluência dos rios Tietê e Piracicaba e Reservatório de Barra Bonita



## 5. DESCRIÇÃO DO MODELO *HEC-RAS*

### 5.1. Introdução

#### 5.1.1 Escoamento “quasi-unsteady flow”

A modelagem numérica da área em estudo foi realizada no ambiente do *software HEC-RAS 4.1 (U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center, 2010)*. Este é um *software* integrado, desenvolvido para modelagem numérica unidimensional em ambiente fluvial, sob diversos aspectos, ou seja, além da execução da modelagem hidrodinâmica, o *software* traz consigo módulos específicos para análise e simulação em movimento permanente, análise e simulação de fluxo para movimento não permanente, geomorfologia de leitos (o que inclui análise de transporte de sedimentos) e análise de qualidade de água.

A análise de transporte de sedimentos executada pelo *software* parte de uma simplificação comum a diversos modelos neste tipo de análise, chamada de “*quasi-unsteady flow*”. Esta simplificação consiste em aproximar um hidrograma de escoamento não permanente em uma série de trechos de escoamento permanente. Estes perfis, se comparados a um modelo completo em movimento não permanente, permitem a execução de uma análise mais fácil e rápida para o programa.

Esta análise se dá de forma unidimensional e o deslocamento das margens e/ou do leito é resultante de processos de erosão e deposição. Embora desenvolvido para simular tendências de médio e longo prazo, efeitos resultantes de uma única precipitação intensa também podem ser calculados. As principais características do modelo incluem a capacidade de modelar toda uma bacia de drenagem, cálculo de volumes de dragagem de canais, dimensionamento de diques, deposição em reservatórios e estimativa da influência de dragagem sobre a taxa de deposição do leito além de sedimentação em canais fixos.

Adicionalmente, o modelo dá suporte ao uso de diversas equações para transporte de sedimentos, o que permite ao pesquisador calibrar e validar o modelo

computacional ao protótipo da maneira mais fidedigna possível. As equações de transporte incluídas no *HEC-RAS* foram apresentadas no item 3.3.

Para proceder com os cálculos, cada trecho simplificado é dividido e subdivido para a modelagem matemática do fluxo e do transporte de sedimentos, criando três intervalos distintos de tempo (Figura 7) a serem considerados na simulação: Duração da Vazão (*Flow Duration*), Incremento Computacional (*Computational Increment*) e Intervalo de Tempo de Mistura do Leito (*Bed Mixing Time Step*)

A Duração da Vazão é simplesmente o intervalo de tempo do escoamento no qual ele é aproximado como constante e igual a determinado valor. Este é um parâmetro de entrada para caracterização da vazão no canal.

O Incremento Computacional é o intervalo de tempo entre os cálculos que o programa usará. Este é uma divisão da Duração da Vazão, e deve ser determinado para cada Duração de Vazão inserida.

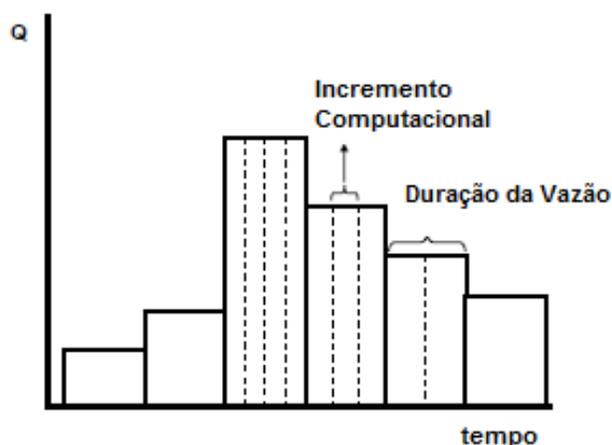


Figura 7: Duração de vazão e incremento computacional. Adaptado de HEC-RAS Reference Manual, 2010.

O Intervalo de Tempo de Mistura é a subdivisão do incremento computacional que marca o intervalo de tempo entre cálculos de deposição e erosão de fundo. Ainda

que os valores de batimetria, de parâmetros hidráulicos e de potencial de transporte permaneçam constantes, os cálculos de erosão e deposição continuam, mudando a composição do leito de cada seção, o que altera a capacidade de transporte de sedimentos mesmo enquanto os parâmetros hidrodinâmicos e de potencial de transporte permanecem constantes.

### 5.1.2 Continuidade De Sedimentação

Para o cálculo da continuidade do volume de sedimentação, o *HEC-RAS* usa a equação de Exner (Equação 16).

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (16)$$

Esta equação é calculada por meio da determinação do potencial de transporte do volume de controle (Figura 8) determinado para cada seção transversal e da diferença entre este e o volume de sedimento em transporte. Quando o potencial de transporte de sedimentos for maior que o volume de sedimento movimentado, ocorre erosão da seção transversal.

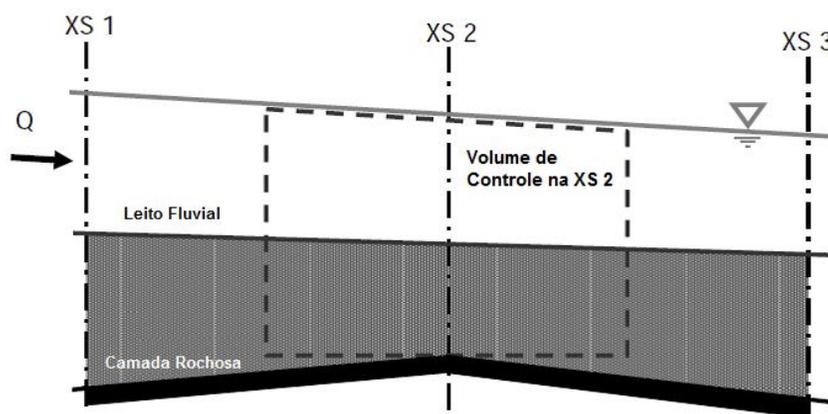


Figura 8: Cálculos no volume de controle da seção. Adaptado de HEC-RAS Reference Manual, 2010.

### 5.1.3 Computação da Capacidade de Transporte de Sedimentos

A capacidade de transporte de sedimentos em determinado fluxo é a quantidade máxima de saída de sedimentos de determinado volume de controle, e é função da circulação máxima promovida pelo fluxo, sendo computado para cada volume de controle entre seções para cada Intervalo de Tempo de Mistura.

## **5.2. Classificação Granulométrica**

Para a Computação da Capacidade de Transporte de Sedimentos, o *HEC-RAS* classifica o leito por sua granulometria, dividida em 20 classes de grãos, com diâmetros entre 0,002m e 2048,00mm. Em cada classe, as partículas são representadas por grãos de tamanho representativo, sendo este o diâmetro da mediana do intervalo.

### 5.2.1 Potencial De Transporte De Sedimentos

O Potencial de Transporte de Sedimentos é a medida, nas condições de escoamento modelado, da vazão sólida transportada por classe de grão, e pode ser calculada pelo *HEC-RAS* segundo sete tipos de equações. Cada classe de grãos possui seu valor do Potencial de Transporte de Sedimentos calculado separadamente, não sendo influenciado pela granulometria do leito.

Como o transporte de sedimentos é sensível a um número grande de variáveis, o uso de diferentes equações pode resultar em diferenças de resultados de ordens de grandeza, visto que tais equações são empíricas. Assim, a simulação do Potencial de Transporte de Sedimentos deve usar equações desenvolvidas segundo parâmetros parecidos com aqueles encontrados no problema original.

### 5.2.2 Capacidade de Transporte de Sedimentos

Uma vez que o potencial de transporte é calculado para cada classe de grãos, a capacidade de transporte do modelo em cada seção deve ser a ponderação das capacidades de transporte das classes de transporte em função do percentual de cada classe na granulometria do leito. Isto é baseado na hipótese de Einstein (1950) e Vanoni (1975) de que há a proporcionalidade direta entre percentual granulométrico e capacidade de transporte por classe granulométrica. Porém, para a simulação da sedimentação, a equação da continuidade é aplicada para cada classe separadamente, sem considerar um índice de capacidade de transporte total.

Após o cálculo da capacidade de transporte, o programa compara a oferta de grãos para cada classe com a capacidade de transporte, determinando um déficit ou superávit de oferta por seção.

### **5.3. Limitações de Continuidade**

A equação da continuidade da massa compara a capacidade de transporte com o volume de entrada de grãos para cada classe a cada intervalo de tempo. O déficit do volume de entrada em relação à capacidade de transporte implica normalmente em erosão, enquanto o superávit implica em deposição, desde que algumas condições físicas sejam respeitadas. Estas condições físicas são modeladas no *HEC-RAS* como três limitações: limitação temporal de deposição, limitação temporal de erosão e limitação de mistura e proteção do leito.

#### 5.3.1 Limitação Temporal de Deposição

A limitação temporal de deposição baseia-se na teoria simples de que as partículas em suspensão possuem uma velocidade de queda. A partir do produto desta velocidade de queda com o tempo de detenção entre duas seções, o programa determinará o percentual de sedimento capaz de se depositar em determinado volume de controle.

#### 5.3.2 Limitante Temporal de Erosão

Da mesma forma que a deposição, a erosão é um processo dependente do tempo, necessitando de limitações temporais para o modelo se adequar à realidade física. A teoria usada pelo programa, denominada Princípio do Comprimento da Vazão

Característica, assume que o campo de vazão precisa de um comprimento trinta vezes maior que o tirante para que o leito entre em déficit contínuo de massa, e cria condições matemáticas para que o valor do déficit decaia exponencialmente em função do comprimento.

### 5.3.3 Profundidade Efetiva de Transporte

Como a limitação de deposição compara a queda máxima de uma partícula com a profundidade da seção para determinar se esta toca ou não o fundo, deve-se determinar a distribuição de partículas no fluido para determinar qual o percentual que será depositada.

O programa usa a metodologia de Toffaleti, que divide a profundidade de escoamento em quatro zonas e computa o transporte separadamente para cada uma destas, fazendo uma integração discreta da superfície. Esta é uma simplificação da metodologia de Rouse (Figura 9), que usa curvas de concentração em função da profundidade relativa.

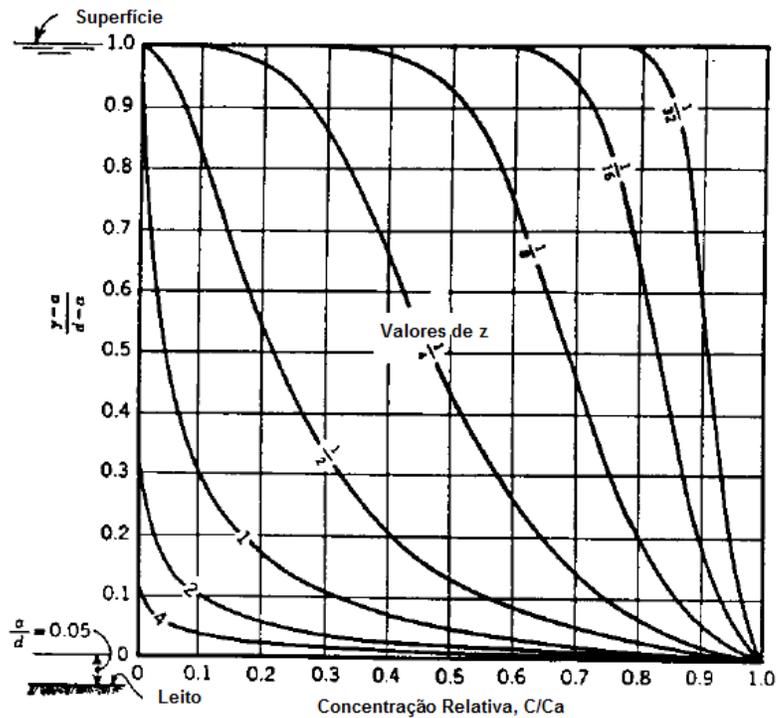


Figura 9: Perfis De Concentração De Rouse. Adaptado de HEC-RAS Reference Manual, 2010.

A abordagem usada pelo programa possui limitações: assume-se que o material encontra-se uniformemente distribuído no início de cada intervalo de tempo da simulação, e não se considera a variação vertical de velocidade na seção.

### 5.3.4 Mistura e Proteção de Leito

Em muitos rios de granulometria não uniforme, a camada ativa mais fina está superposta por uma camada de material mais graduado que funciona como uma proteção contra a erosão. Isto ocorre devido ao transporte deste material mais graduado e do transporte diferencial do material mais fino. Particularmente à jusante de

barragens, o material mais graduado permanece estático, enquanto o material fino permanece em movimento na camada abaixo.

A formação desta camada protetora tende a decrescer o transporte total, já que o material da superfície do leito possui maior inércia, dificuldade de movimentação, criando uma limitação na capacidade de transporte.

Os dois métodos de mistura entre classes de materiais são Exner 5 e Camada Ativa (Figura 10). O primeiro método assume três camadas ativas no leito que inclui a capacidade de formação da camada de proteção que limita a erosão das camadas subsuperficiais de material fino. O segundo método é uma simplificação do primeiro, com duas camadas ativas no leito, sendo apropriado apenas para leitos de material fino, apresentando alta correlação física somente quando simulado em conjunto com o método de transporte de Wilcock.

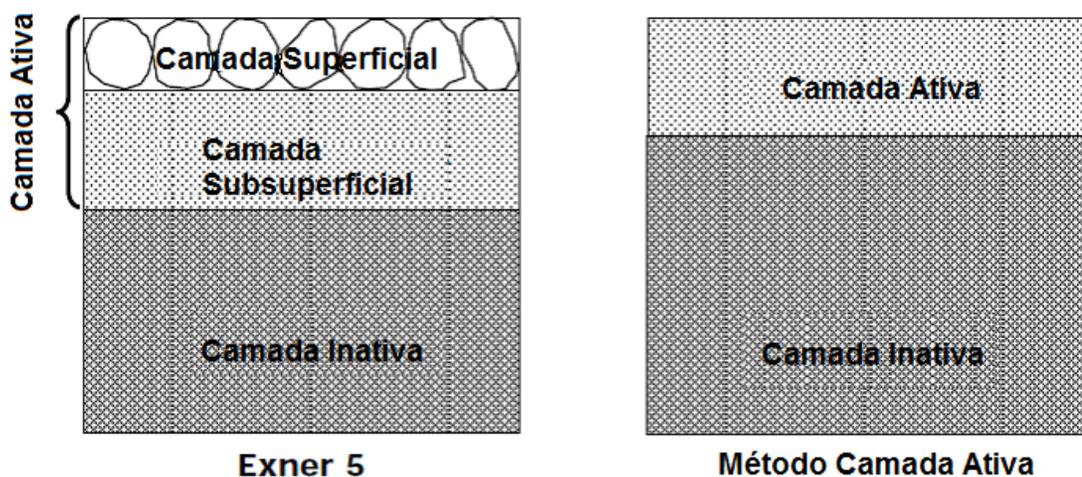


Figura 10: Hipóteses De Mistura E Proteção De Camada: Exner5 e Método Camada Ativa. Adaptado de HEC-RAS Reference Manual, 2010.

## 5.4. Velocidade de Queda da Partícula

A maior parte das teorias de velocidade de queda baseia-se no balanceamento entre força gravitacional e força de empuxo, num diagrama dinâmico como o mostrado pela Figura 11.

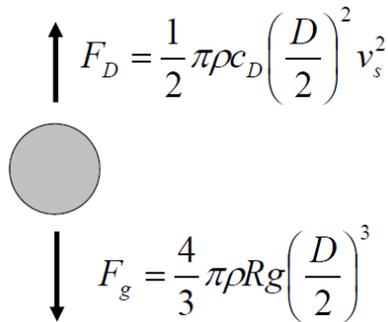

$$F_D = \frac{1}{2} \pi \rho c_D \left( \frac{D}{2} \right)^2 v_s^2$$
$$F_g = \frac{4}{3} \pi \rho R g \left( \frac{D}{2} \right)^3$$

Figura 11: Teoria da velocidade de queda da partícula. Fonte: HEC-RAS Reference Manual, 2010.

Como a aplicação destas equações depende de soluções iterativas para solução das funções implícitas, a resolução torna-se mais complicada do que parece ser.

As soluções desenvolvidas por Toffaleti, Rubey, Van Rijn e pelo Report 12 podem ser usadas pelo *HEC-RAS* para o cálculo de velocidade de queda dos sedimentos.

A solução de Rubey (1933) baseia-se em uma relação analítica entre as propriedades do fluido e dos sedimentos para explicitar as funções e resolvê-las analiticamente, enquanto Toffaleti (1968) montou uma tabela de velocidades de queda para grãos com fator de forma 0,9 e peso específico do grão de 2,65 tf/m<sup>3</sup>. Esta tabela possui valores para diferentes temperaturas e granulometrias<sup>3</sup>, com as classes de grãos variando entre areia muito fina e cascalho médio.

Van Rijn (1993) criou curvas baseadas nos resultados de experimentos do Comitê Norte-Americano Inter-Agencial de Recursos Hídricos (IACWR), usando partículas não esféricas com fator de forma 0,7 e temperatura de 20°C, resolvendo três equações analíticas. O autor usou a hipótese de Rubey como hipótese inicial e modificou os resultados em função dos dados que possuía.

Por fim, o Report 12 é uma solução iterativa que usa as curvas de Van Rijn como hipótese inicial, encontrando um valor inicial para a velocidade de queda e, a partir desta, recalcula o número de Reynolds, fazendo o processo iterativo até a convergência dos resultados com tolerância aceitável.

## **5.5. Resultado Final de Alteração do Leito**

A partir do cálculo do transporte real e do déficit ou superávit no volume de controle, o programa calcula a massa do leito que será adicionada ou subtraída do volume de controle. A massa é então convertida em volume, e este volume a ser alterado deve ser distribuído na seção.

Como o *HEC-RAS* é um programa de simulação de escoamento unidimensional, o único método de mudança do leito em função de erosão ou deposição é por meio de uma distribuição uniforme do volume na cunha formada entre as duas seções transversais.

No caso da deposição, pode-se selecionar a opção de deposição fora dos limites da simulação, que cria uma situação na qual o volume de transporte na seção de deságue pode ser maior que zero. A ativação desta opção não altera a modelagem da erosão.



## 6. METODOLOGIA

### 6.1. Aquisição De Dados

A campanha batimétrica realizada pelo Núcleo de Hidrometria da EESC/USP nos anos 2004-2005 contemplou o levantamento de seções transversais com espaçamento médio de 500 metros, perpendiculares ao eixo longitudinal do curso d'água principal e o número de transectos batimétricos percorridos foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Morris & Fan (1997), a qual correlaciona a área do reservatório, em hectares, com um coeficiente empírico. O levantamento teve por objetivo atualizar os polinômios cota x área x volume do reservatório e foi realizado no corpo central do reservatório de Barra Bonita, bem como nos seus afluentes, totalizando 640 seções. A área de abrangência está ilustrada na Figura 12.

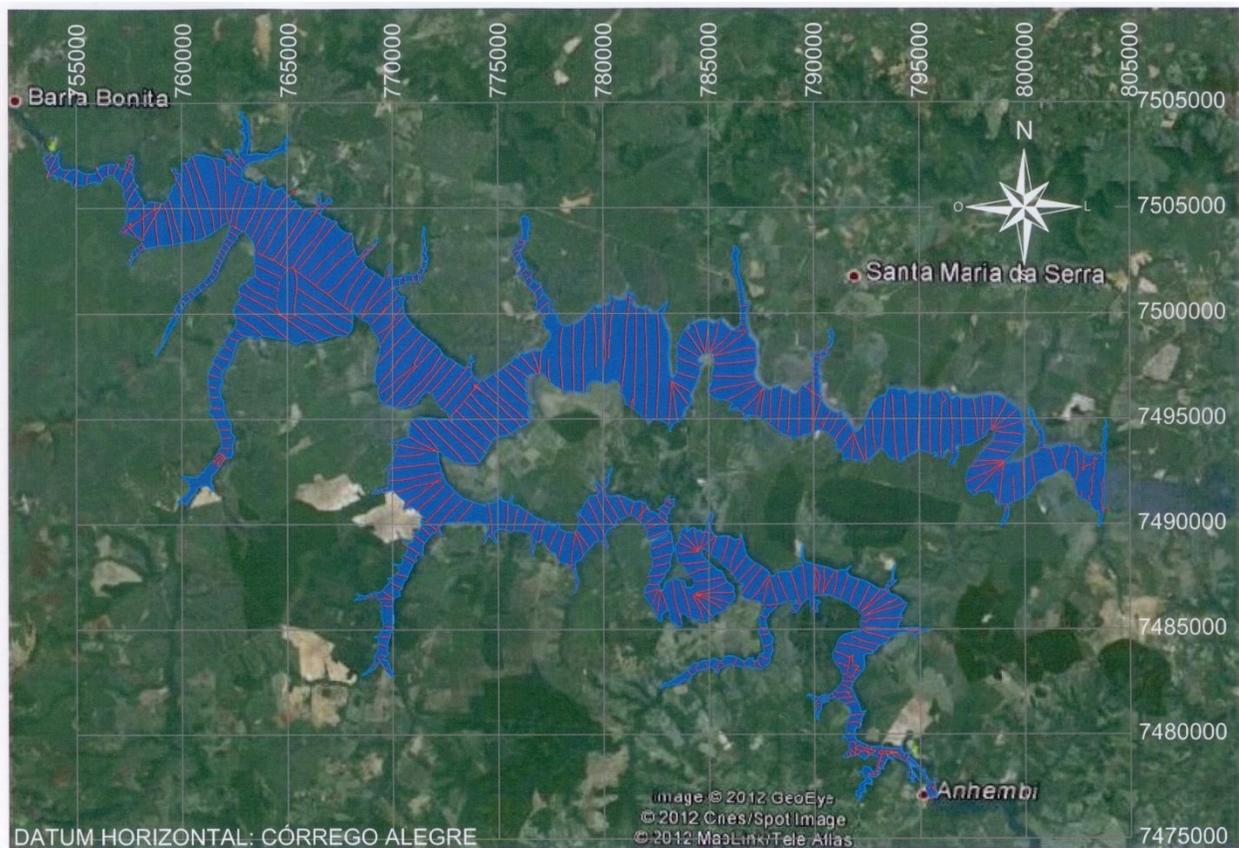


Figura 12: Área de abrangência do levantamento batimétrico

A segunda campanha de levantamentos batimétricos contempla dados levantados durante quatro anos, a saber: 2006, 2007, 2010 e 2011. Não há dados referentes aos anos de 2008 e 2009. O trabalho de campo foi realizado pelo Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo (DH-SP), o qual igualmente cedeu o material para a realização desta pesquisa. As informações sobre composição do material de fundo e granulometrias utilizadas para a modelação matemática também são de propriedade do órgão e pode ser consultada no Apêndice I. A Tabela 2 apresenta a descrição dos levantamentos referentes à campanha batimétrica realizada.

Tabela 2: Descrição dos levantamentos batimétricos realizados por DH-SP

Ano do Levantamento	Resolução Espacial		Escala	Período
	Transversal	Longitudinal		
2006	5 m	15 m	1:500	03/07/2006
2006	10 m	30 m	1:1000	27/09/2006 à 03/10/2006
2007	5 m	30 m	1:500	03/09/2007 à 23/11/2007
2007	10 m	30 m	1:1000	21/11/2007 à 23/11/2007
2010	10m	15 m	1:1000	26/01/2010 à 28/04/2010
2010	50 m	15 m	1:1000	16/08/2010 à 18/08/2010
2010	10 m	15 m	1:1000	16/08/2010 à 24/08/2010
2010	10 m	15 m	1:1000	21/09/2010 à 28/10/2010
2010	10 m	15 m	1:1000	01/12/2010 à 10/12/2010
2010	20 m	-	1:1200	23/02/2010 à 23/03/2010
2011	10 m	15 m	1:1000	15/08/2011 à 31/08/2011

Para a definição da cota das bordas do reservatório, foi utilizada a poligonal vetorizada fornecida pela AES-Tietê, a qual definiu o nível máximo normal da lâmina d'água na cota 451,50 metros. A sobreposição das áreas recobertas pelos levantamentos batimétricos do DH/SP está ilustrada Figura 13.

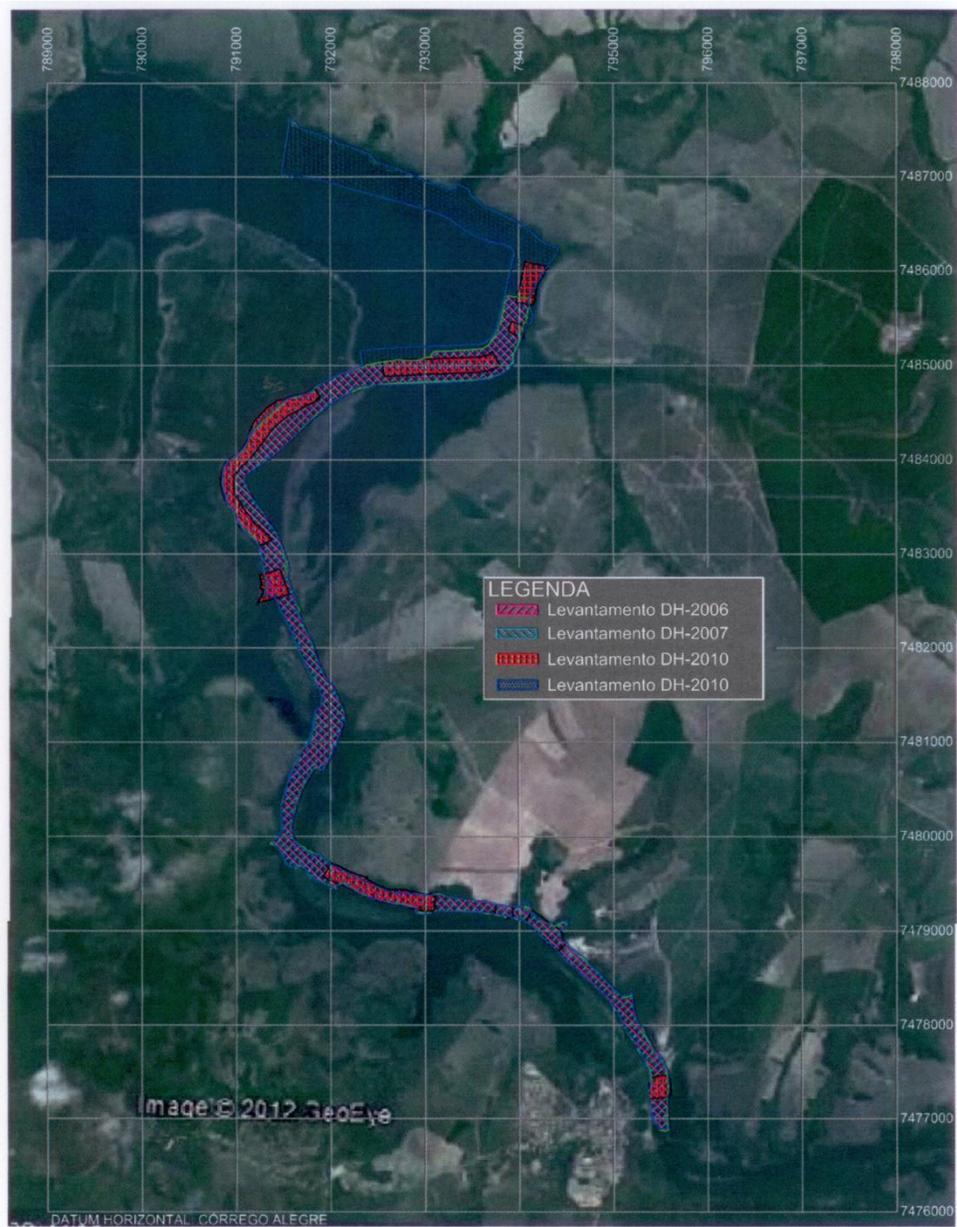


Figura 13: Sobreposição dos levantamentos realizados pelo DH-SP.

Os dados hidrológicos são oriundos de dois postos fluviométricos mantidos pela AES-Tietê, localizados a montante das seções transversais de entrada do modelo, isto é, um localizado próximo à seção de entrada do rio Piracicaba e outro próximo à seção de entrada do rio Tietê, conforme a Figura 14 ilustra. Estes postos forneceram dados

horários de vazão afluente. Tais postos continham informação do período de 20/06/2006 a 12/09/2011.

Dados de vazão defluente e de nível no reservatório de Barra Bonita foram fornecidos a partir do registro de uma régua posicionada junto ao corpo da barragem (nível), e a vazão defluente foi calculada pela soma das vazões turbinada e vertida pela UHE.



Figura 14: Localização dos postos fluviométricos

Devido a não coincidência da localização exata dos postos e das seções de entrada do modelo, as vazões que afluem efetivamente nestas seções tiveram que ser estimadas por proporcionalidade de área de influência das respectivas sub-bacias.

Para tanto, a área total das Bacias Hidrográficas do Alto e Médio Tietê foi medida a partir de imagens inseridas em ambiente CAD, como um polígono. As sub-bacias de drenagem contribuinte para cada uma das seções de entrada foram definidas seguindo-se os divisores topográficos, e uma nova demarcação foi feita sobre elas. A partir do cálculo das áreas da bacia e sub-bacias, foi possível calcular o quanto cada

área representa em percentual do total, e um coeficiente de proporcionalidade de área foi usado para transportar a vazão que aflui no posto fluviométrico para a vazão que atravessa as primeiras seções de controle. Esta análise indicou que as áreas de influência da sub-bacia do Tietê representava em um incremento de vazão da ordem de 13% e no rio Piracicaba em 34%. A Figura 15 mostra a demarcação das sub-bacias de drenagem e possibilita melhor entendimento do procedimento realizado.

A declividade da linha de energia foi obtida a partir dos dados de leitura de nível em dois pontos distintos. Uma régua encontra-se no alinhamento da barragem enquanto a outra é mantida pelo terminal portuário EPN-TORQUE, situado na altura do Km 87da hidrovía. A coleta de dados das duas régua fornece dados atualizados da declividade da linha de energia (Tabela 3).

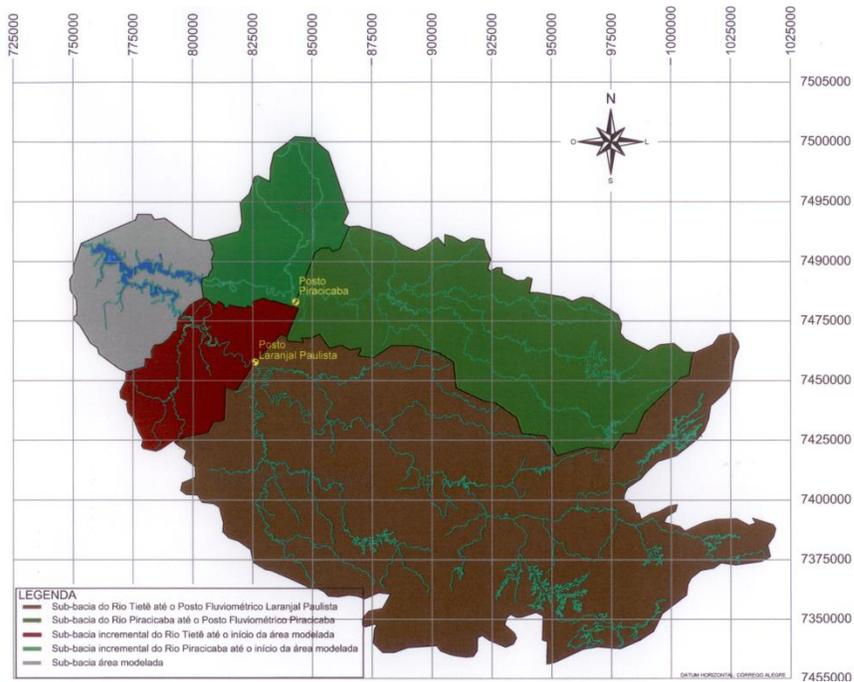


Figura 15: Demarcação das bacias e sub-bacias de contribuição da área de estudo

Tabela 3: Histórico das leituras na régua do Terminal EPN-TORQUE

LÂMINA D'ÁGUA 1,30 (m)	LÂMINA D'ÁGUA 3,00 (m)	Defluência BAB (m <sup>3</sup> /s)	Afluência BAB (m <sup>3</sup> /s)	Diferença Cotas BAB (m <sup>3</sup> /s)
RÉGUA TERMINAL TNPM	MONTANTE DA BARRAGEM N.A.min.nav. = 446,50			
MÍNIMO NO DIA				
448.5	448.37	334	245	0.13
448.5	448.35	264	204	0.15
448.5	448.31	244	185	0.19
448.42	448.27	301	153	0.15
448.4	448.25	269	180	0.15
448.35	448.21	234	175	0.14
448.35	448.21	188	158	0.14
448.35	448.19	293	175	0.16
448.3	448.17	224	165	0.13
448.3	448.17	222	193	0.13
448.3	448.17	236	207	0.13
448.3	448.17	237	208	0.13
448.3	448.17	244	215	0.13
448.3	448.15	212	183	0.15
448.25	448.12	301	213	0.13
448.2	448.1	362	245	0.1
448.2	448.06	340	252	0.14
448.2	447.99	369	194	0.21
448.2	447.92	376	202	0.28
448.15	447.88	406	203	0.27
448.15	447.82	336	182	0.33
448.15	447.76	309	165	0.39
448.05	447.76	336	250	0.29

Apenas a partir de outubro de 2012 os terminais que operam embarcações na hidrovia passaram a ter acesso às informações da leitura da régua. Antes desta data, as leituras ou não eram realizadas ou simplesmente não eram de livre acesso aos operadores da hidrovia, haja vista que o calado máximo permitido para tráfego era definido previamente. Às 00:00 horas do dia 24/10/2012 foi feito um comunicado oficial pelo DH/SP alterando as regras de navegação na hidrovia como um todo e criando um canal emergencial entre os quilômetros 75 e 81.

Este comunicado regulamentou novas regras para cálculo de calado máximo permitido na hidrovia, levando em consideração o nível instantâneo da linha d'água no reservatório. O comunicado transcrito na íntegra está no Anexo III – Comunicado “Alteração de Calado”.

## **6.2. Definição da Área da Modelação Numérica**

A área de estudo da modelação hidrodinâmica foi definida a partir do levantamento batimétrico realizado nos anos 2004-2005, pelo Núcleo de Hidrometria da EESC-USP. Este estudo abrangeu a totalidade do reservatório e trechos dos rios Piracicaba e Tietê, a montante do remanso, conforme anteriormente ilustrado pela Figura 12.

Para a modelagem sedimentológica, a área foi definida com base no levantamento batimétrico realizado pelo Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo, DH-SP.

Este levantamento se sobrepõe ao anterior com maior resolução espacial, e limita-se ao trecho balizado do canal de navegação, onde a informação de evolução dos fundos é necessária para definição de operação da hidrovia, mais precisamente entre os quilômetros 72 e 89 da Hidrovia Tietê-Paraná.

O Departamento Hidroviário/SP optou por realizar a campanha batimétrica apenas neste trecho em que o estado crítico de elevação de fundos já apresentava embargos à navegação. A localização destas seções transversais e áreas modeladas estão indicadas no item 6.3 figura 17.

### **6.3. Processamento dos Levantamentos Batimétricos**

Os dados de coordenadas geográficas georreferenciadas relativas à primeira campanha de levantamentos batimétricos foram transformados para coordenadas UTM e então trabalhados em planilha de cálculos e transformados em seções transversais, a partir da distância entre as coordenadas de cada ponto. A simples aplicação do Teorema de Pitágoras forneceu a distância entre as coordenadas UTM dos pontos levantados por GPS.

É importante ressaltar que o resultado do processamento das seções passou por uma simplificação em relação à quantidade de pontos levantados pelo ecobatímetro, pois, de outro modo, a modelagem numérica no *HEC-RAS* ficaria sobrecarregada e conseqüentemente lenta, dado que estas seções transversais são dados de entrada no modelo.

Uma medida comum em modelagem numérica hidrodinâmica é a criação de limites bem definidos restringindo a área de computação de fluxo, para que o modelo não crie situações de *overflow* durante sua rotina de cálculos. Assim, seguindo-se a inclinação da reta a partir dos pontos nas extremidades, foram criadas margens extrapoladas fixadas na cota +460 metros, ao invés da fixação da extremidade na cota real das bordas, +451,50 metros. A Figura 16 ilustra a simplificação dos pontos em cada seção transversal e esta extrapolação vertical.

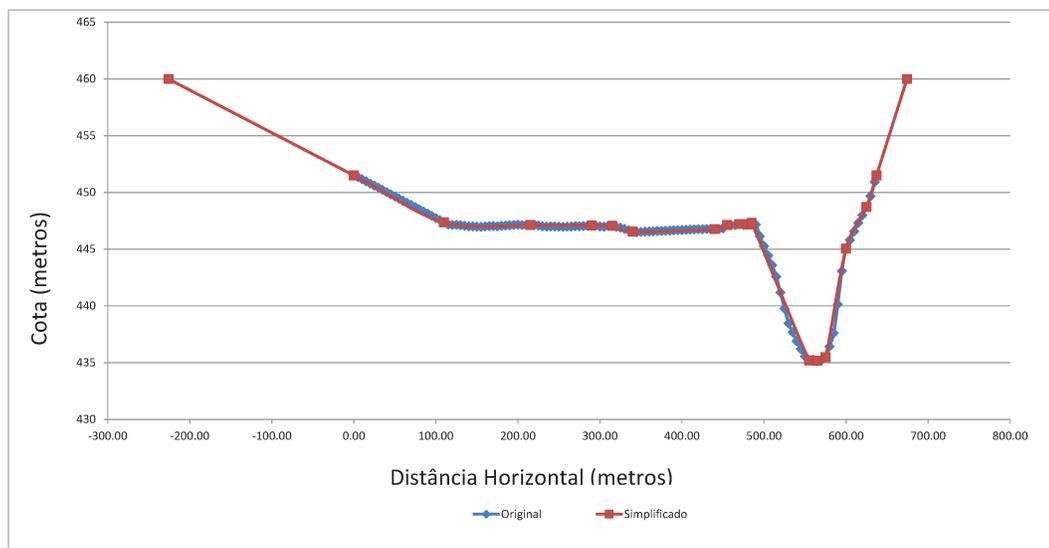


Figura 16: Transformação de coordenadas geográficas em seções transversais

Esta medida é feita apenas para que durante o processo de convergência o fluxo não extravase os limites reais do curso d'água, ou seja, após cada passo de simulação a linha d'água deve se manter dentro dos limites das cotas do reservatório.

No trecho entre os quilômetros 72 e 89 da hidrovia, no qual foi realizado o levantamento batimétrico mais recente, a criação de seções transversais envolveu uma metodologia mais precisa do que a anterior.

Para este trecho, foi feita uma sobreposição dos dois levantamentos batimétricos disponíveis, aliados ao levantamento do contorno do reservatório. Esta composição de informações permitiu a criação de um Modelo Digital de Elevação (MDE) que foi então usado como base para definição das seções de controle (Figura 17).

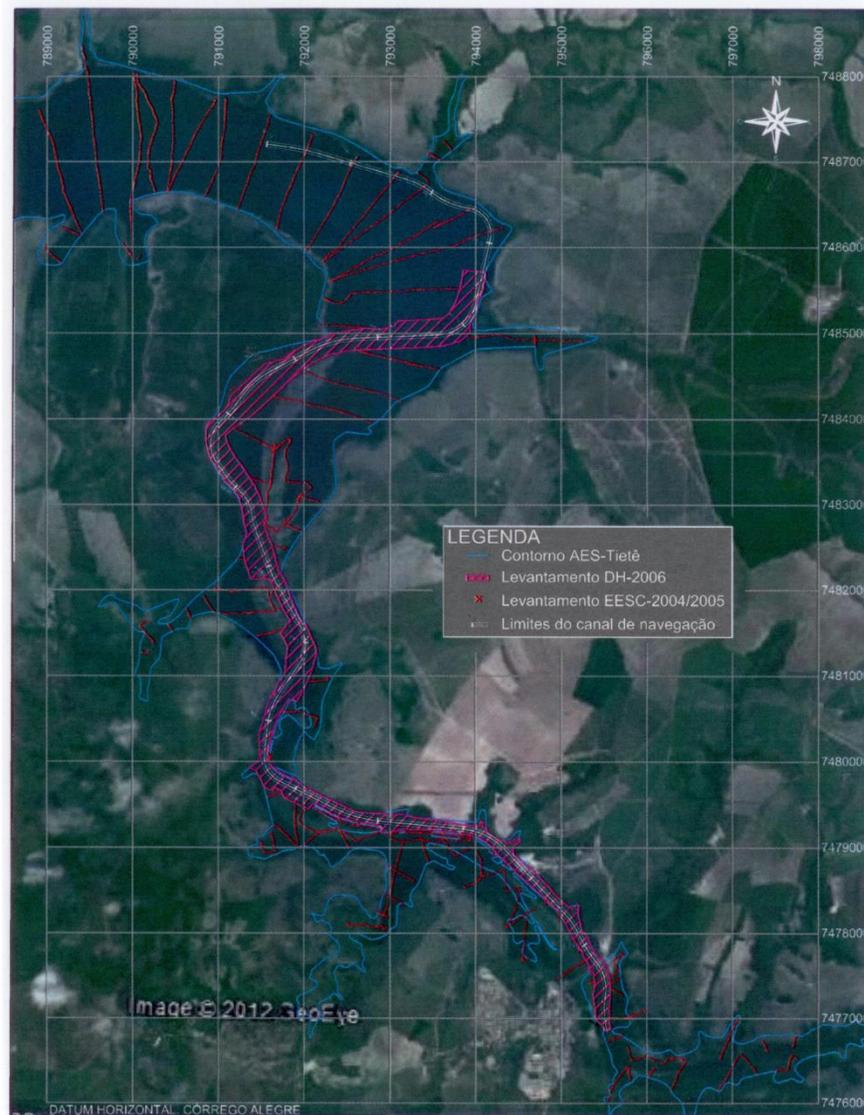


Figura 17: Composição das batimetrias e contorno do reservatório.

A partir deste mosaico, foram selecionadas seções ortogonais às linhas de fluxo, de modo a incluir os pontos de inflexão e vértices das curvas do canal principal. Em cada seção foram atribuídos pontos equidistantes de 5 metros, e então o mesmo processo de visualização e simplificação realizado para o processamento das seções do levantamento anterior foi aplicado.

#### **6.4. Dados Hidrológicos**

Os dados hidrológicos, apresentados no item 6.1, passaram por um processo de análise de consistência, onde foi possível identificar falhas no preenchimento dos dados.

Por se tratarem de dados horários de vazões, as falhas foram consideradas curtas ou longas segundo o número de horas sem preenchimento e/ou com valores discrepantes dos demais. Foi considerado aqui que falhas dentre um período de até quatro horas são curtas, e maiores que este intervalo, falhas longas. As falhas curtas puderam ser preenchidas apenas por interpolação linear.

A falhas longas foram preenchidas a partir de um coeficiente de proporcionalidade entre um posto e outro. Para cada série com ausência de dados, a curva de tendência no outro posto foi usada como parâmetro e mantendo-se a devida proporção.

As falhas longas, aquelas com mais de quatro horas de ausência ou discrepância nos dados, foram preenchidas por incrementação de vazão a partir dos valores observados no posto fluviométrico onde se tinha informação naquele mesmo instante. A diferença entre as leituras antes e depois dos horários com falhas foi distribuída no intervalo, observando-se também a tendência da série histórica do posto fluviométrico.

#### **6.5. Dados Sedimentológicos**

Os dados de composição de material de fundo e qualidade dos sedimentos foram fornecidos pelo DH/SP e estão presentes neste documento no Apêndice I. As campanhas de amostragem de sedimentos na Hidrovia Tietê-Paraná foram realizadas

nos dias 25 e 26 de outubro de 2010 pela equipe de campo da CPEA – Consultoria, Planejamento e Estudos Ambientais. No total, foram coletadas 30 amostras.

A localização dos pontos de amostragem foi definida previamente pela equipe técnica, com base na localização da área a ser dragada, na cota de dragagem e no número mínimo de amostras a serem coletadas, em cumprimento às diretrizes da Resolução CONAMA 344/04, SMA 39/2004 e DD nº 195-2005-E, conforme consta o Relatório Técnico de Dragagem de Manutenção Do Canal De Navegação De Anhembi, elaborado pelo Departamento Hidroviário/SP em 2010.

A equipe realizou coleta de sedimentos de fundo e sub-superficiais nos pontos indicados pela Figura 18. A sigla PS (“Ponto de Sedimento”) indica os pontos de amostragem, seguidas do número do ponto e da identificação referente à profundidade da camada sedimentar amostrada (S: superfície; M: camada intermediária; F: fundo).

A caracterização granulométrica dos sedimentos coletados evidenciou predominância das frações mais finas, como argilas, siltes e areias muito fina e fina.

A coleta de sedimentos se deu no período do segundo levantamento batimétrico realizado pelo DH/SP.



Figura 18: Localização dos pontos de coleta de sedimento

## 6.6. Entrada de Dados no Modelo Unidimensional

A entrada de dados no modelo numérico *HEC-RAS* se inicia com a geometria do local a ser modelado. No total, foram geradas 25 seções transversais no trecho desde o alinhamento da barragem até a confluência dos rios Tietê e Piracicaba, 35 seções transversais no rio Piracicaba a montante da confluência e 87 seções no rio Tietê (Figura 19) a montante da confluência, onde se concentrou a área de modelação sedimentológica.

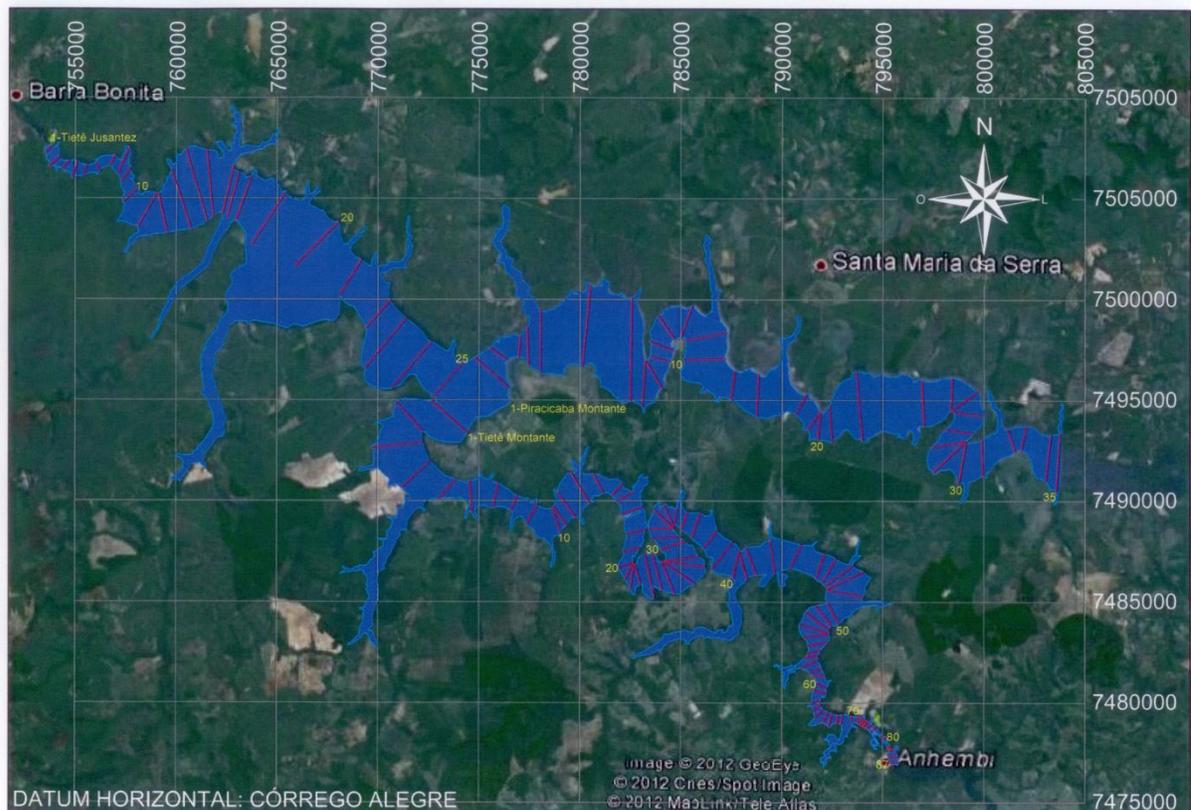


Figura 19: Seções transversais em toda extensão do reservatório de Barra Bonita

As tabelas contendo os pontos que foram então simplificados em planilha de cálculo anteriormente foram inseridas no ambiente destinados à dados de geometria. Aqui, o modelo pede a entrada do valor do coeficiente de rugosidade de *Manning*, que será abordado no item 7 – Calibração e Validação do Modelo.

A Figura 20 mostra a interface do programa nessa etapa.

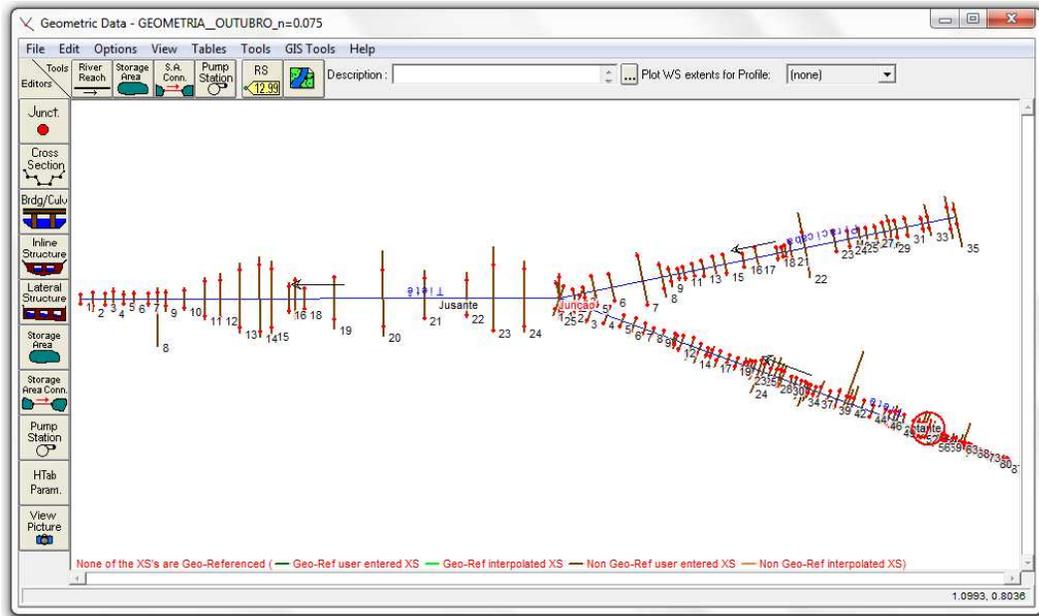


Figura 20: Interface da entrada de dados de geometria no programa de modelação

Conforme mencionado no item 5 - *Descrição do Modelo HEC-RAS*, para que o programa execute uma análise de transporte de sedimentos, é necessário que os dados de condições iniciais hidrodinâmicas sejam inseridos no modelo matemático de escoamento *quasi-unsteady flow*.

As condições de contorno de escoamento para as seções de entrada do modelo, ou seja, as seções de montante dos rios Tietê e Piracicaba, são as séries de vazões líquidas obtidas nos dois postos fluviométricos disponíveis na região, Laranjal Paulista e Piracicaba, após o preenchimento de falhas e após a aplicação do coeficiente de proporcionalidade de bacias descrito no item 6.4. No trecho do reservatório propriamente dito, a jusante da confluência dos rios, a condição de contorno inserida foi

a série contendo os níveis de água medidos na régua no reservatório, junto ao alinhamento da barragem.

Como condições adicionais de contorno, é possível inserir dados de contribuição lateral de vazão, pontual ou série de vazões, curva chave de descarga líquida, série de níveis e profundidade normal.

O programa oferece diversos ajustes e ferramentas, ficando a critério do utilizador escolher as condições que trarão melhores resultados para a modelação que se pretende. Neste trabalho foi abordado somente as capacidades do programa que de fato foram selecionadas para a execução da modelagem numérica

Para a execução da modelação de transporte de sedimentos, o programa foi alimentado com dados de condições iniciais e parâmetros de transporte, e condições de contorno.

Como condições iniciais, estão a escolha da equação de transporte de sedimentos que será utilizada, o método de cálculo da velocidade de queda da partícula e o método de mistura de classes no material da camada de fundo. Este último parâmetro está relacionado com a camada ativa de sedimentos, mais fina, que normalmente se forma em rios de material menos selecionado, e fica superposta por uma camada de material mais graduado, agindo como um limitante do transporte de sedimentos. Esta superposição de classes granulométricas atua como um limitante do transporte de sedimentos e é resolvida no programa por duas equações possíveis, conforme ilustrado no item 5.3.4 do capítulo 5.

Outra condição inicial é a distribuição granulométrica presente em cada uma das seções transversais. Para tal, seguindo o mapa de localização dos pontos de coleta de sedimento realizado pela equipe técnica que procedeu com a campanha sedimentométrica, foi atribuído a cada seção transversal a informação do ponto de coleta mais próximo a ela. Para além da seção 48 do rio Tietê, região fora do mosaico de batimetrias, ou seja, para além daqueles trechos em que só há dados do primeiro levantamento batimétrico, considerou-se a distribuição granulométrica do posto de

coleta “PS1”, o qual representa a distribuição com maior concentração de sedimentos finos. Esta escolha foi pautada pela teoria do grau de seleção dos sedimentos, a qual relaciona a distância da cabeceira do rio com o decréscimo no tamanho das partículas, devido à abrasão sofrida pela rocha durante seu transporte.

Todas estas opções de entrada podem ser observadas pela Figura 21.

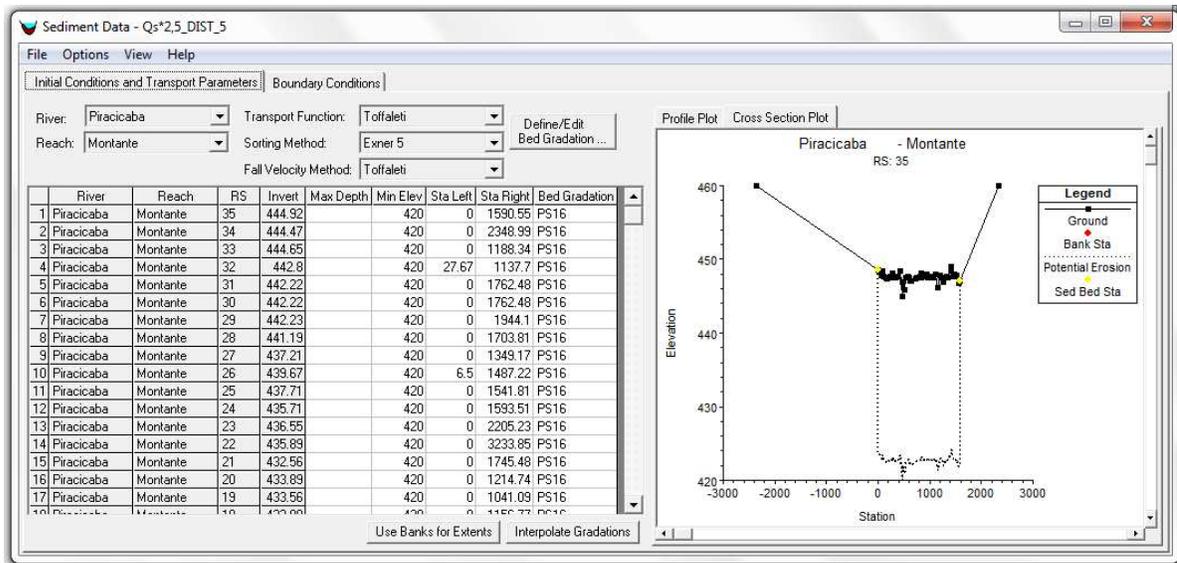


Figura 21: Entrada de dados sedimentológicos no modelo.

Como condições de contorno estão disponíveis o *input* de curva chave de vazão sólida e/ ou carga de equilíbrio para a seção de entrada.

A opção carga de equilíbrio (*equilibrium load*) na seção foi adotada para a seção de entrada do rio Piracicaba, em virtude do mesmo não fazer parte da hidrovía Tietê-Paraná e estar fora da área de modelação sedimentológica deste estudo.

Para o rio Tietê, a condição de contorno adotada foi a de curva chave de vazão sólida. A metodologia empregada para determinação da vazão sólida está descrita no item 7, “Calibração e Validação do Modelo”.

Uma vez que todas as condições iniciais e de contorno, hidrodinâmicas e sedimentológicas, foram inseridas, o programa está pronto para executar a análise.



## 7. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

### 7.1. Metodologia de Calibração do Modelo

A calibração do modelo hidrodinâmico depende inicialmente do ajuste do coeficiente de rugosidade de fundo de *Manning*, que está diretamente relacionado com a declividade da linha de energia entre a primeira seção de montante do rio Tietê com a leitura da régua na seção do alinhamento da barragem.

Para a calibração, foram simulados cinco valores possíveis para o coeficiente, começando com uma estimativa inicial de 0,035 e aumentando-se progressivamente, para 0,050; 0,065; 0,075 e 0,085.

Devido a falta de informações referentes aos níveis d'água ao longo do trecho estudado, foi impossível definir diversos coeficientes de *Manning* possíveis. Sendo assim, com base nas leituras das duas réguas de nível instaladas, uma na seção de alinhamento da barragem e outra no terminal EPN-TORQUE, foi adotado como premissa da simulação a uniformidade do coeficiente de rugosidade ao longo de todo o trecho em análise.

A simulação calibratória do modelo hidrodinâmico abrange o período de 03/07/2006 a 01:00 hora até o dia 13/10/2007 à 00:00 horas, e representa o período entre a primeira e a segunda campanha batimétrica realizada. Este período foi escolhido como calibratório de modo que o resultado deste processo pudesse ser usado no período seguinte, e assim validar o modelo aplicado. Os resultados de cada simulação foram comparados com os desníveis reais medidos pelas réguas instaladas nas seções da barragem e do terminal EPN-TORQUE, embora estas leituras não contemplem o período de simulação, e sim as leituras feitas a partir de outubro de 2012.

Para a adequada comparação de leituras, procurou-se dentro da série hidrológica pares de dados (vazão e nível) similares às leituras do mês de outubro. Os

valores dos desníveis serviram de direcionamento para os próximos coeficientes a serem simulados.

Devido à imprecisão das leituras nas réguas, em que o registro dos níveis é realizado com base em observação visual, o modelo hidrodinâmico não apresentou a mesma tendência de linha de energia que o protótipo, quando considerados períodos de níveis mais baixos e mais altos. Desta forma, o coeficiente de *Manning* foi considerado calibrado quando uma das duas tendências possíveis foi alcançada, ou seja, quando a declividade da linha de energia se manteve similar ou na situação de cheia ou na situação de mínimos. Aqui foi alcançada alta correlação na situação de níveis máximos.

Após a calibração do coeficiente “*n*” de *Manning*, procedeu-se a calibração do modelo de transporte de sedimentos.

Primeiramente, como valores de referência, foi gerado uma superfície volumétrica para cada um dos intervalos entre as seções transversais localizadas na região do mosaico de levantamentos batimétricos, ou seja, entre as seções 87 e 49, perfazendo um total de 38 seções de controle de movimentação de sedimentos. Os volumes de deposição e erosão obtidos serviram de parâmetro calibratório para a estimativa da vazão sólida. Esta metodologia foi aplicada para os anos de 2006 e 2007.

Para a calibração do modelo geomorfológico, foi empregada a metodologia de Toffaleti (1968) para estimativa da carga total de sedimentos transportada em cada seção transversal. Para tanto, foram obtidas cinco situações diferentes de vazão sólida  $Q_s$ , para cinco cenários, que representam variações no nível de água da mesma seção, distribuídas no período 2006-2007, entre a mínima cota de elevação do nível d'água encontrado e a máxima. O método de cálculo de transporte de sedimentos foi aplicado para cada uma das vazões, na seção de entrada do modelo, isto é, a seção de número 87 do trecho Tietê Montante. Este procedimento foi feito para que se pudesse então, gerar uma correlação entre vazão líquida e vazão sólida ( $Q_l \times Q_s$ ) chamada curva chave de vazões.

A partir deste ponto, a primeira simulação de transporte de sedimentos foi realizada. O resultado do processamento foi comparado com os volumes reais de deposição/erosão obtidas pelas superfícies volumétricas dos MDE's.

A calibração do modelo geomorfológico foi obtida variando-se iterativamente a curva chave  $Q_l \times Q_s$  até que se obtivesse como saída do modelo, seção por seção, volumes de deposição/erosão tão próximas dos calculados pelos levantamentos de campo quanto possíveis.

## **7.2. Validação do Modelo**

Um modelo hidrodinâmico pode ser considerado validado quando os parâmetros calibrados para uma dada situação específica são capazes de produzir resultados compatíveis com dados da realidade mesmo quando extrapolados para outra condição de simulação.

No presente trabalho, o modelo foi considerado validado quando os dados de entrada, hidrodinâmicos e sedimentológicos, agora simulados para o período de 2007 e 2010, resultaram em volumes de sedimentação/erosão similares àqueles obtidos pelo método gráfico.



## **8. RESULTADOS**

### **8.1. Processamento dos Levantamentos Batimétricos**

A partir dos levantamentos batimétricos referentes aos anos de 2006, 2007, 2010 e 2011, e do levantamento do contorno do reservatório, foram gerados os Modelos Digitais de Elevação, os quais serviram de base para a criação de superfícies volumétricas em ambiente *CAD*. Cada superfície volumétrica foi subtraída da superfície do ano anterior, de modo a estimar o volume de assoreamento e deposição ocorrido naquele ano.

Estas superfícies representam a totalidade do trecho considerado crítico e impeditivo à navegação na hidrovia, e estão localizadas entre os quilômetros 72 e 89 da hidrovia Tietê-Paraná. A partir destas, as seções transversais referentes à segunda campanha batimétrica foram definidas.

As superfícies mostram a evolução do leito ao longo dos anos considerados e estão agrupadas em dez faixas de profundidade onde cada cor da palheta representa uma faixa de dois metros.

As Figuras 23 a 26 trazem o resultado da criação dos mapas digitais de elevação.

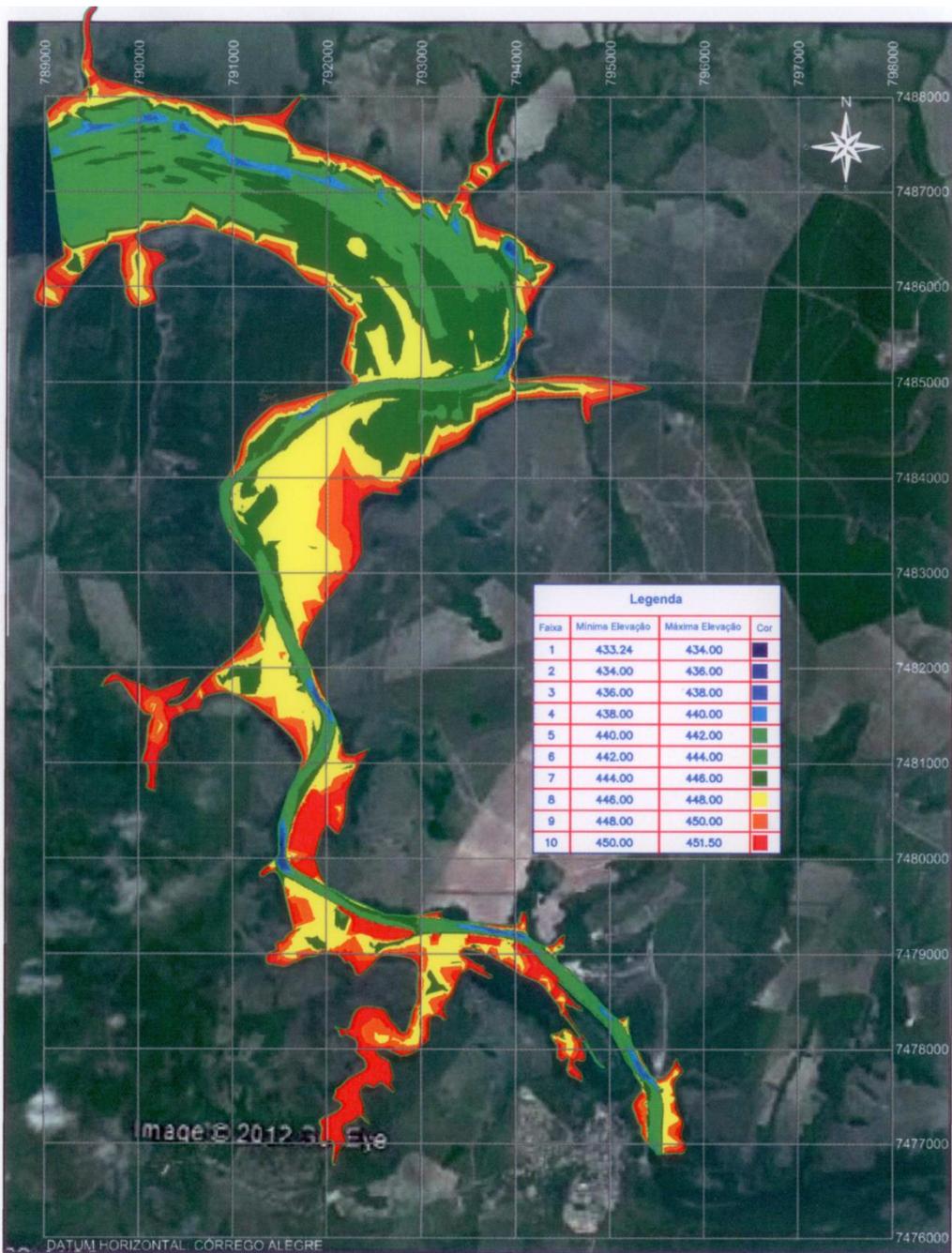


Figura 22: Modelo digital de elevação referente ao ano de 2006

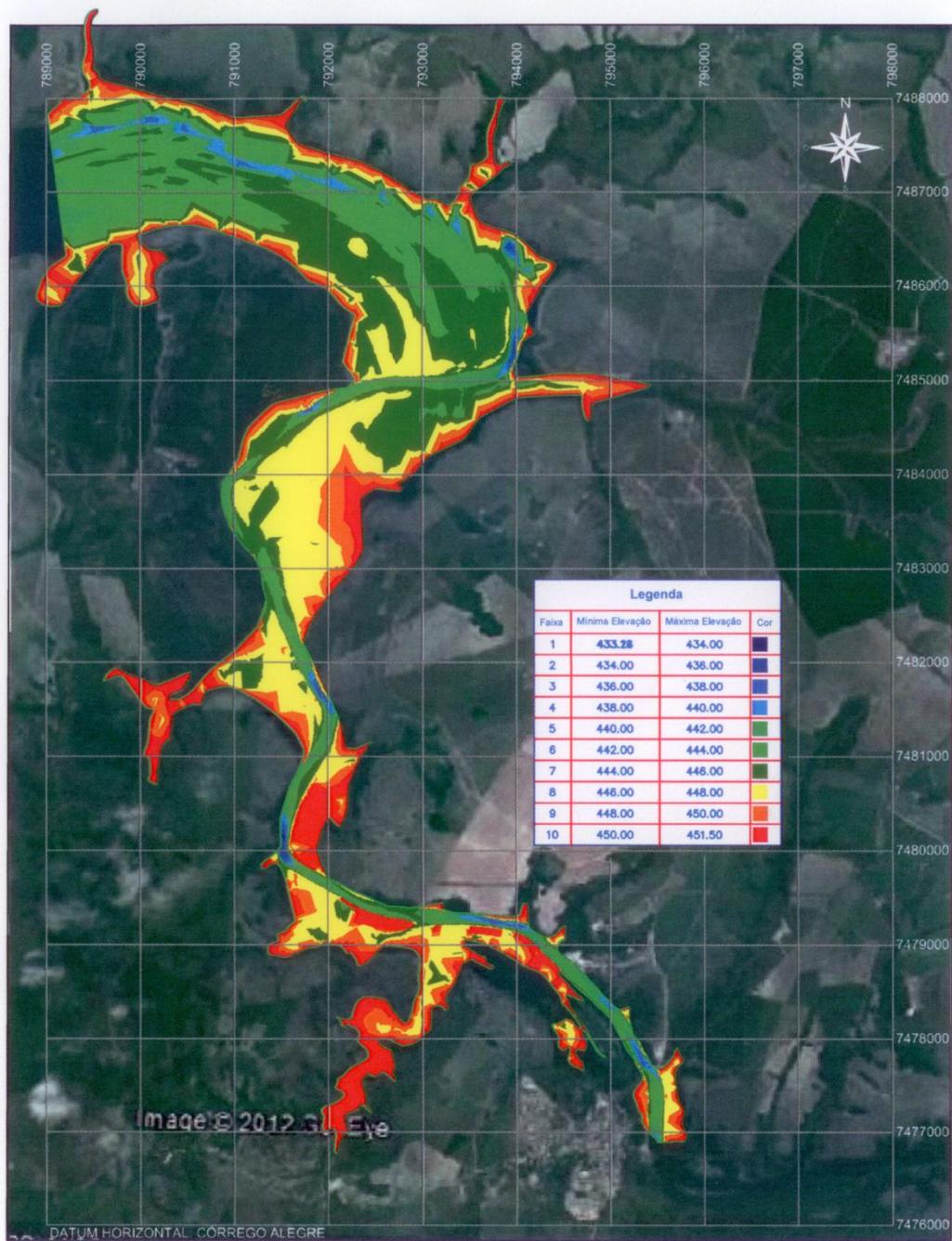


Figura 23: Modelo digital de elevação referente ao ano de 2007

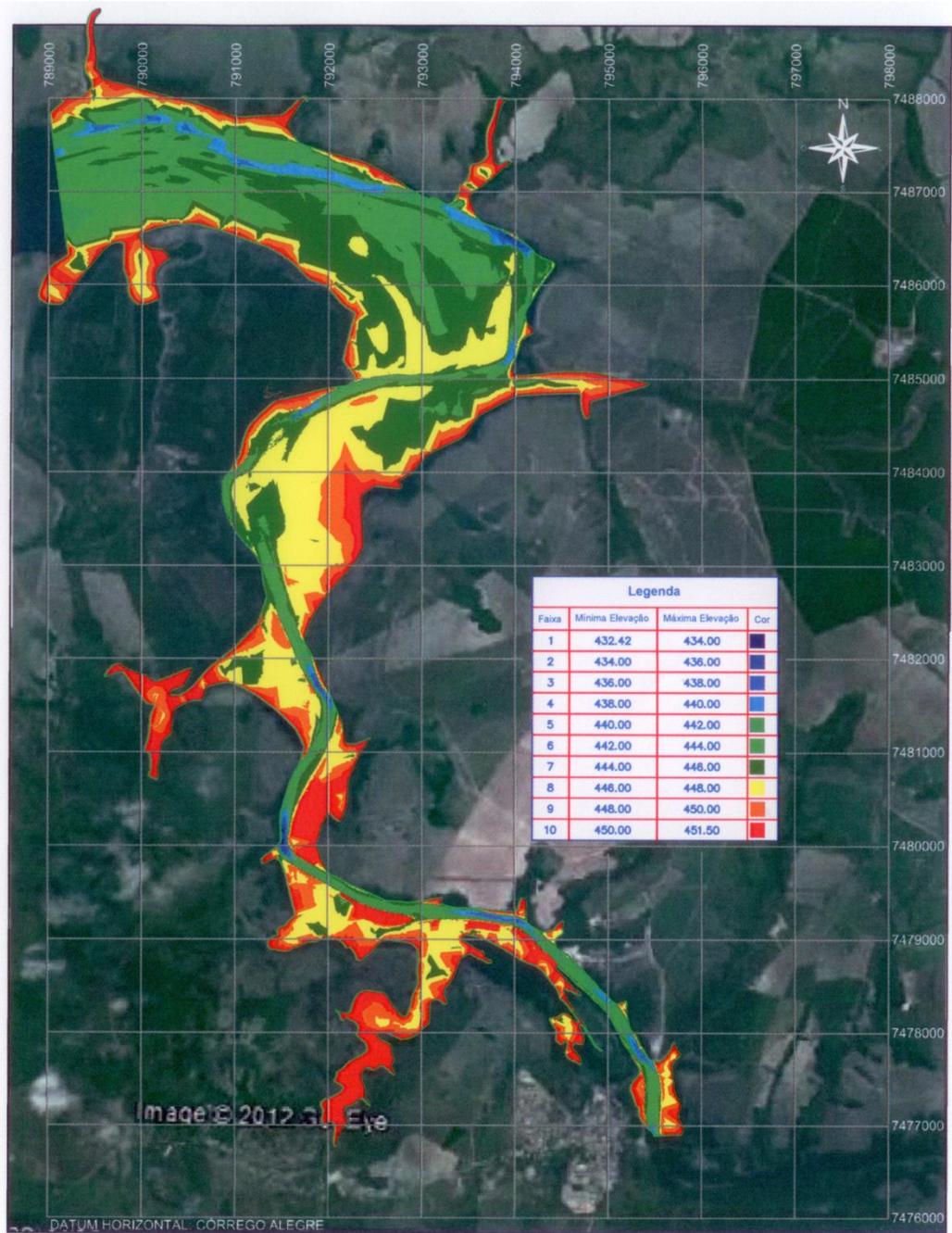


Figura 24: Modelo digital de elevação referente ao ano de 2010

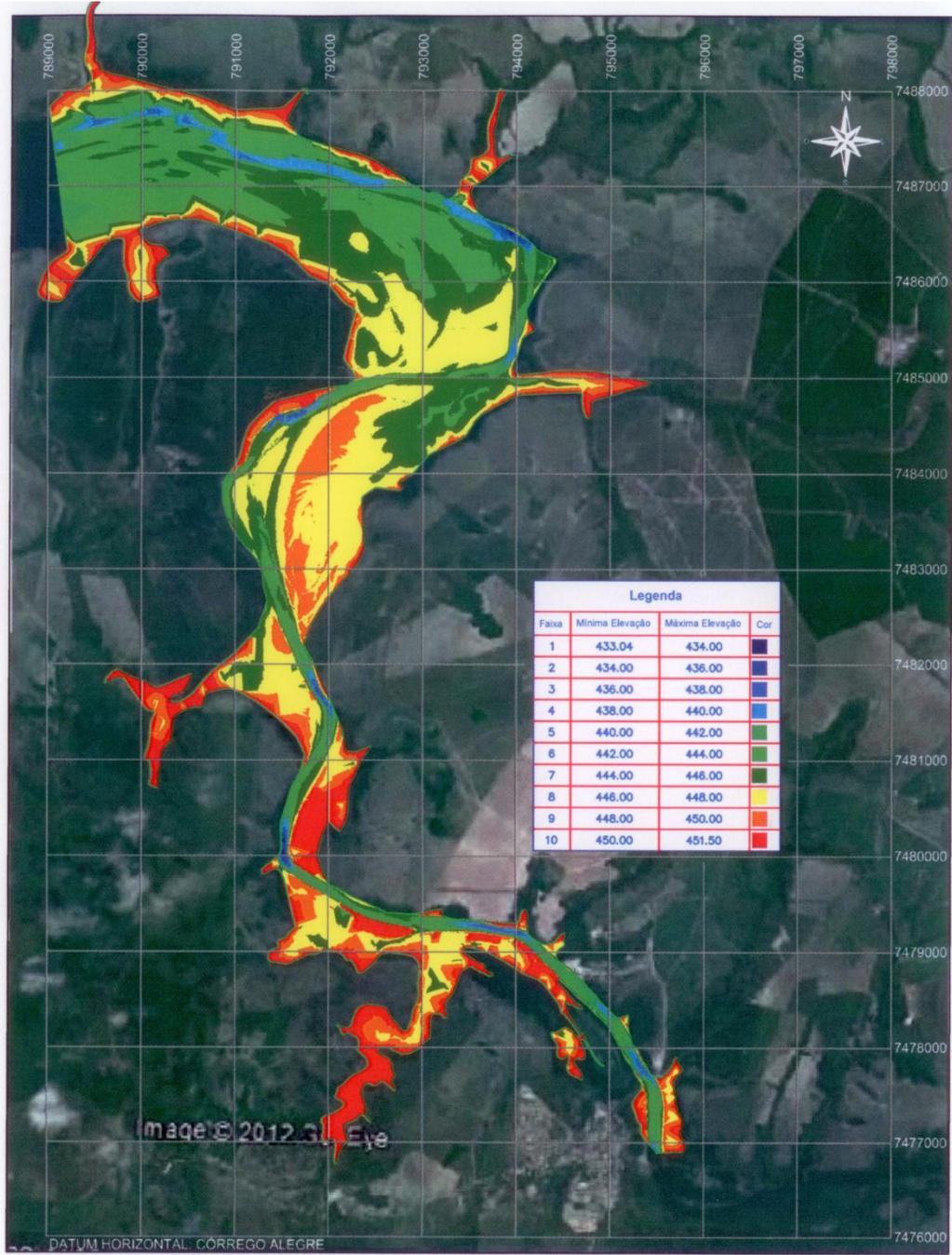


Figura 25: Modelo digital de elevação referente ao ano de 2010

## 8.2. Coeficiente “n” de Manning

As leituras de cota do reservatório que melhor se ajustaram às leituras de níveis nas duas réguas instaladas no reservatório foram agrupados em tabela. Para melhor visualização dos resultados, os valores relativos às vazões foram aqui suprimidos. Os valores de  $\Delta h$  apresentados na Tabela 3 são a diferença entre a leitura de elevação de linha d'água na seção do alinhamento da barragem e da seção 77 do trecho de montante do rio Tietê.

Tabela 3: Declividade da linha de energia para diferentes valores de coeficiente de Manning

COTA (m)	$\Delta h$ PARA DIFERENTES COEF. DE MANNING					$\Delta h$ médio
	n=0.035	n=0.05	n=0.065	n=0.075	n=0.085	
447.76	0.03	0.09	0.145	0.18	0.24	0.39
447.82	0.03	0.1	0.17	0.2	0.27	0.33
448.06	0.04	0.12	0.2	0.25	0.32	0.14
448.21	0.02	0.07	0.11	0.14	0.18	0.14
448.27	0.02	0.06	0.1	0.13	0.17	0.15
448.35	0.03	0.086	0.13	0.16	0.21	0.15

## 8.3. Resultado dos Volumes de Referência

Os volumes de referência foram obtidos após os cortes entre cada uma das seções contidas nos trechos entre as seções 49 e 87 do modelo, conforme já mencionado no item da metodologia. Os volumes obtidos entre cada uma das seções de controle do modelo estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Volumes de referência obtidos a partir dos MDE's

Seção Transversal	Distância	Deposição (ton)	Erosão(ton)	Resultante (ton)
87	90.764	6.04E+03	9.87E+03	-1.01E+04
86	131.555	6.01E+03	9.72E+03	-9.83E+03
85	125.605	7.47E+02	9.23E+02	-4.66E+02
84	336.477	8.28E+02	8.27E+02	2.12E+00
83	500.506	5.15E+03	1.07E+03	1.08E+04
82	210.660	1.57E+03	2.29E+03	-1.89E+03
81	348.680	1.81E+04	8.31E+03	2.60E+04
80	270.744	7.02E+03	2.47E+03	1.21E+04
79	372.903	6.46E+03	1.33E+04	-1.80E+04
78	307.791	4.64E+03	4.96E+03	-8.58E+02
77	277.587	1.07E+04	2.75E+03	2.10E+04
75	559.448	2.03E+03	4.87E+02	4.08E+03
74	325.832	1.79E+03	9.26E+02	2.30E+03
73	510.093	6.33E+03	2.06E+03	1.13E+04
72	298.911	1.54E+03	2.35E+03	-2.16E+03
71	452.946	5.92E+03	4.10E+03	4.82E+03
70	381.114	6.94E+03	4.91E+03	5.40E+03
69	263.405	2.74E+03	2.76E+03	-6.16E+01
68	447.173	1.88E+03	2.16E+03	-7.45E+02
67	412.241	3.51E+03	1.68E+03	4.86E+03
66	351.411	6.87E+03	2.18E+03	1.25E+04
64	418.555	9.10E+03	3.14E+03	1.58E+04
63	407.199	1.59E+04	4.65E+03	3.02E+04
62	483.043	8.04E+03	6.46E+03	4.20E+03
61	1139.071	9.81E+03	3.67E+03	1.63E+04
60	639.140	5.41E+04	4.25E+03	1.32E+05
59	304.67	8.24E+06	1.09E+07	-7.13E+06
58	347.20	6.91E+06	1.25E+07	-1.49E+07
57	35.13	3.57E+06	7.59E+06	-1.06E+07
56	26.00	2.52E+06	3.97E+06	-3.83E+06
55	37.32	6.28E+06	7.84E+06	-4.14E+06
54	71.77	9.55E+06	8.72E+06	2.20E+06
53	503.05	3.90E+07	3.20E+06	9.50E+07
52	180.24	5.55E+07	1.78E+06	1.42E+08
51	533.97	4.46E+07	9.65E+05	1.16E+08
50.5	263.65	2.63E+07	3.32E+06	6.09E+07
50	191.38	1.27E+08	1.13E+07	3.05E+08
49	72.11	1.57E+07	7.13E+06	2.27E+07

A Figura 26 e Figura 27 mostram o resultado da subtração das superfícies volumétricas.

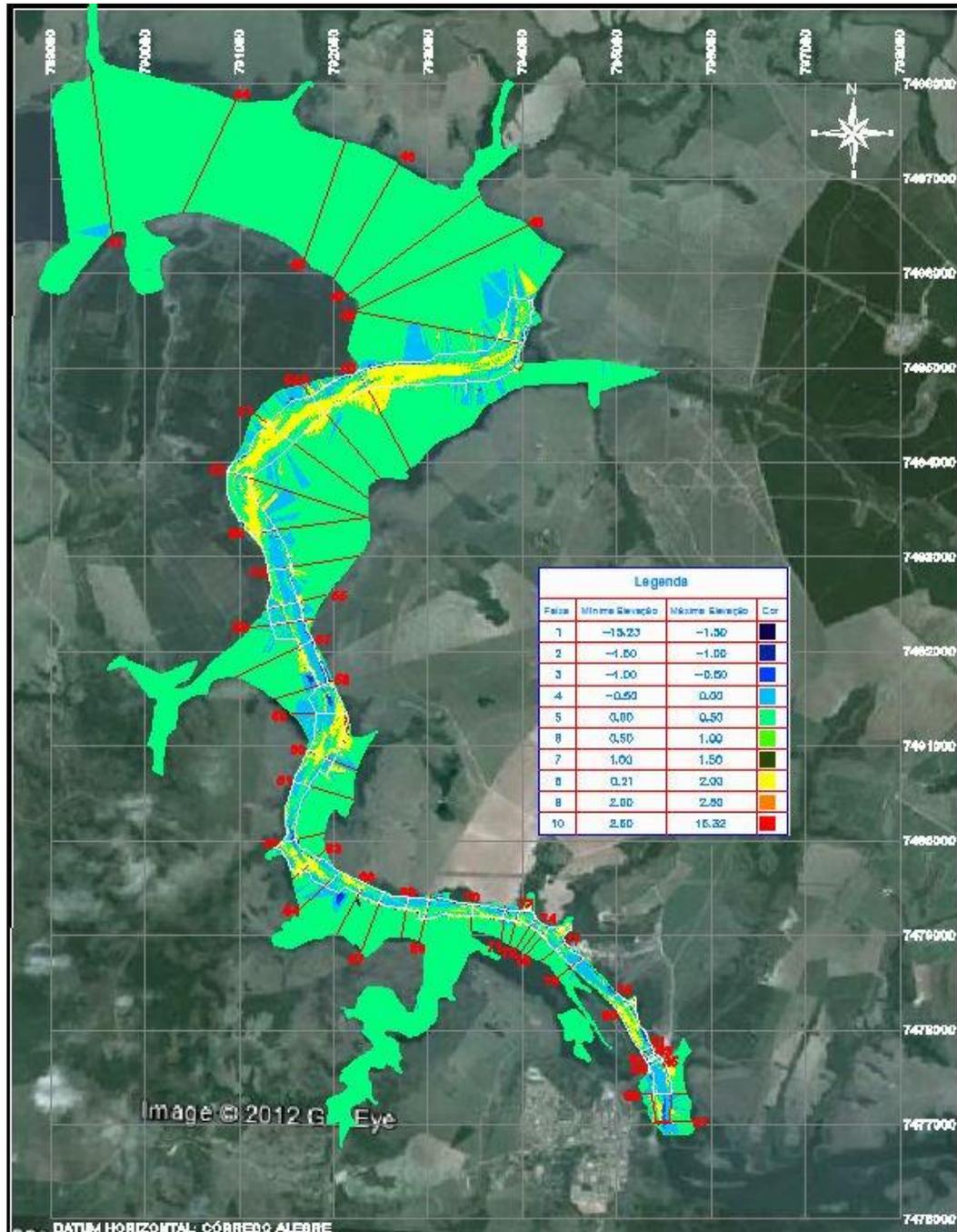


Figura 26: Subtração de superfícies 2007-2006

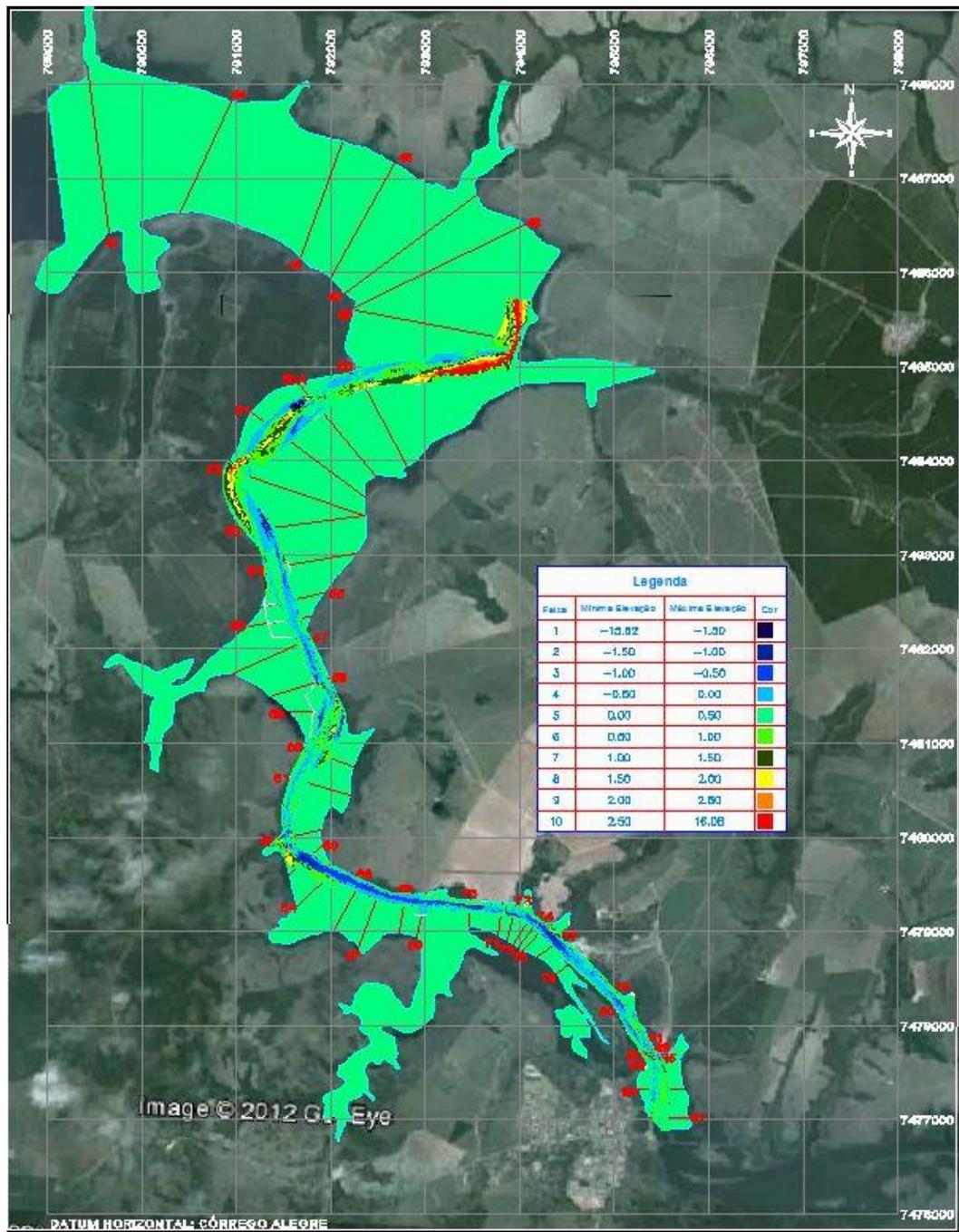


Figura 27: Subtração de superfícies 2010-2007

#### **8.4. Resultados da Calibração do Modelo Sedimentológico**

A calibração do modelo sedimentológico foi feita com base nos dados reais extraídos do protótipo, entre os anos de 2006 e 2007, a partir da subtração volumétrica das superfícies dos modelos digitais de elevação produzidos para esta pesquisa. A Figura 28 apresenta o histórico de resultados extraídos das simulações com diferentes vazões sólidas e distribuições granulométricas. Foram feitas 13 simulações no total, e a Figura 29 mostra o histórico da calibração, enquanto a Figura 29 o resultado final da calibração.

A validação do modelo sedimentológico foi feita a partir da modelagem aplicada no período de 2007 a 2010, que teve como dados de entrada a curva chave ( $Q \times Q_s$ ) ajustada para o período calibratório. A Figura 30 apresenta o resultado da validação do modelo.

Figura 28: Histórico da calibração do modelo sedimentológico

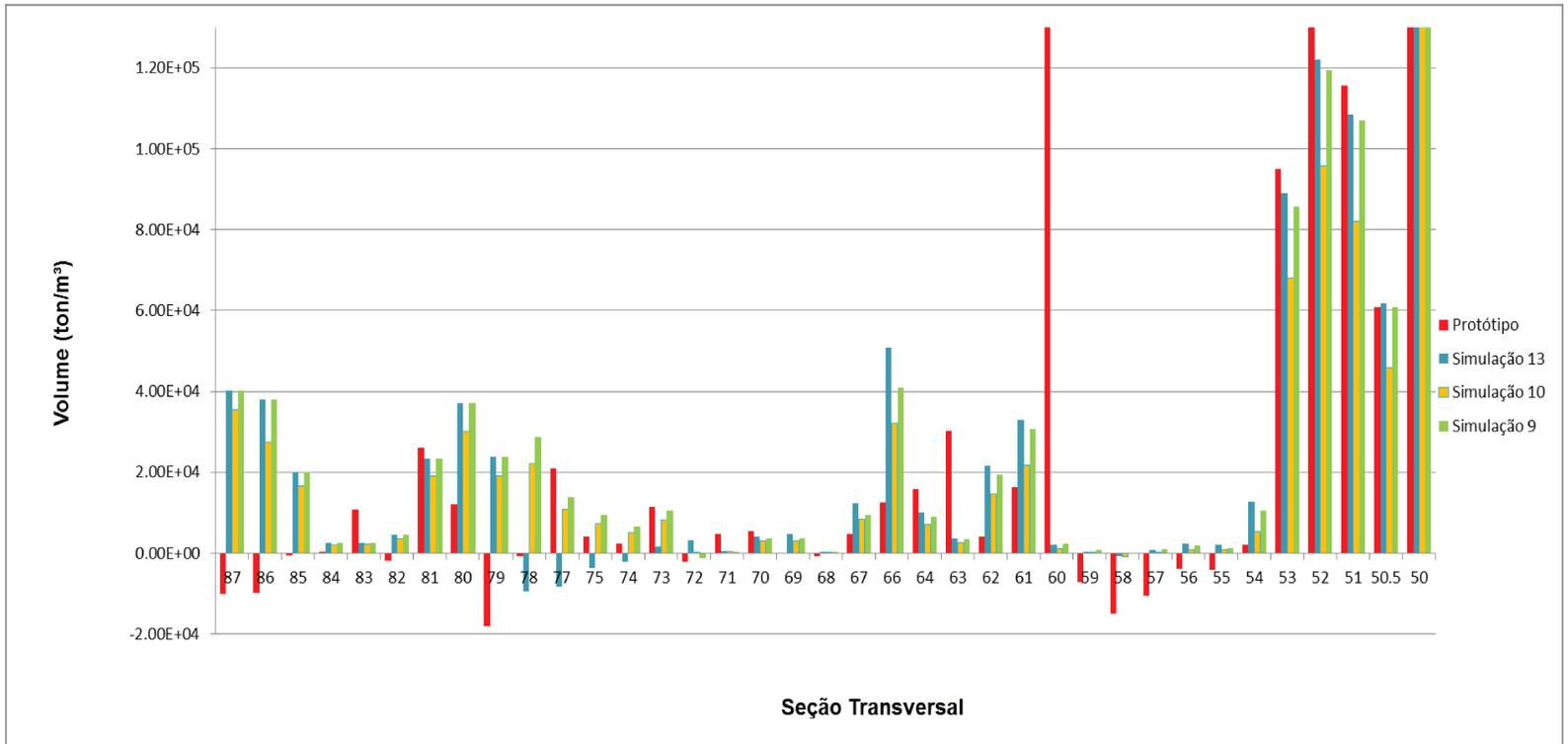


Figura 29: Resultado da Calibração do modelo sedimentológico

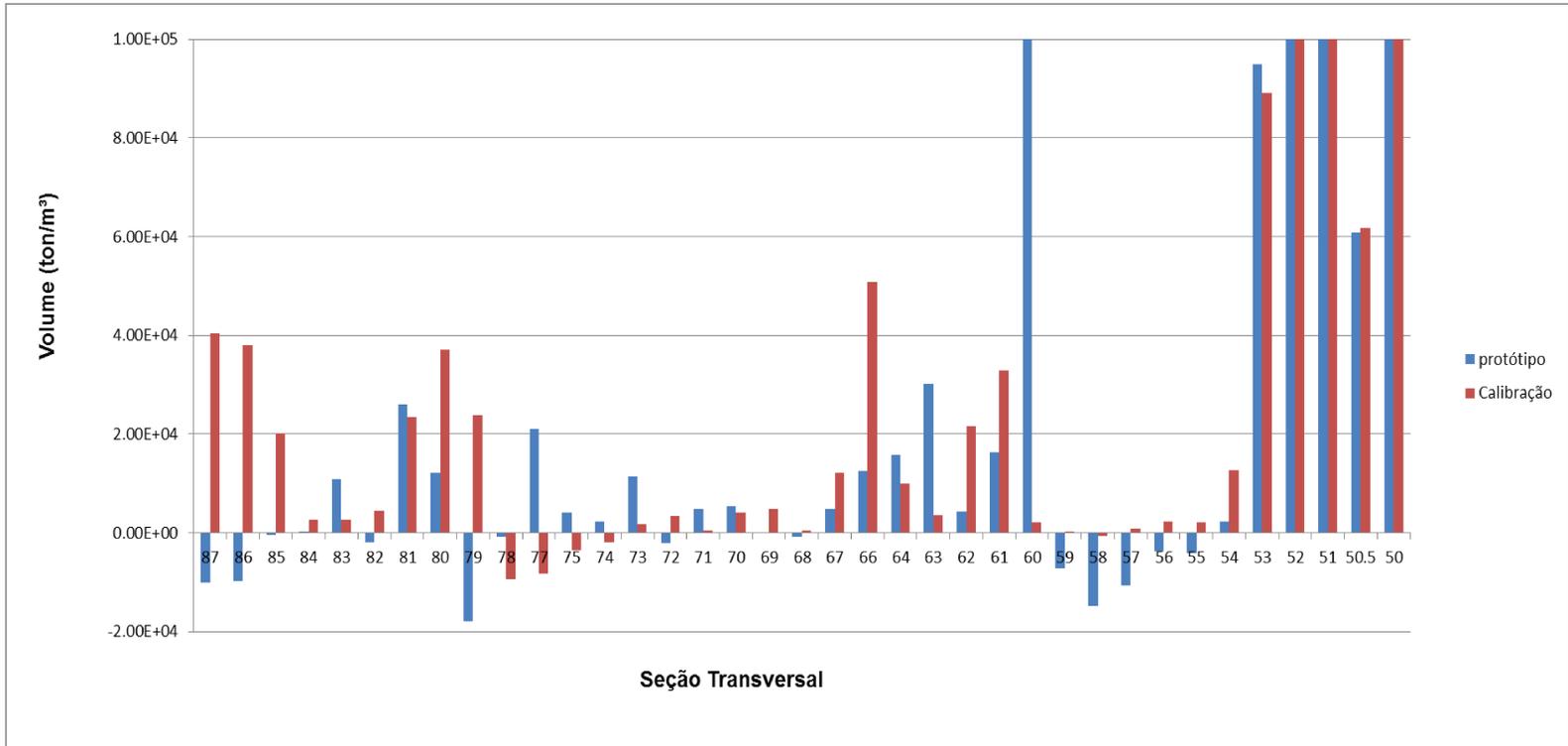
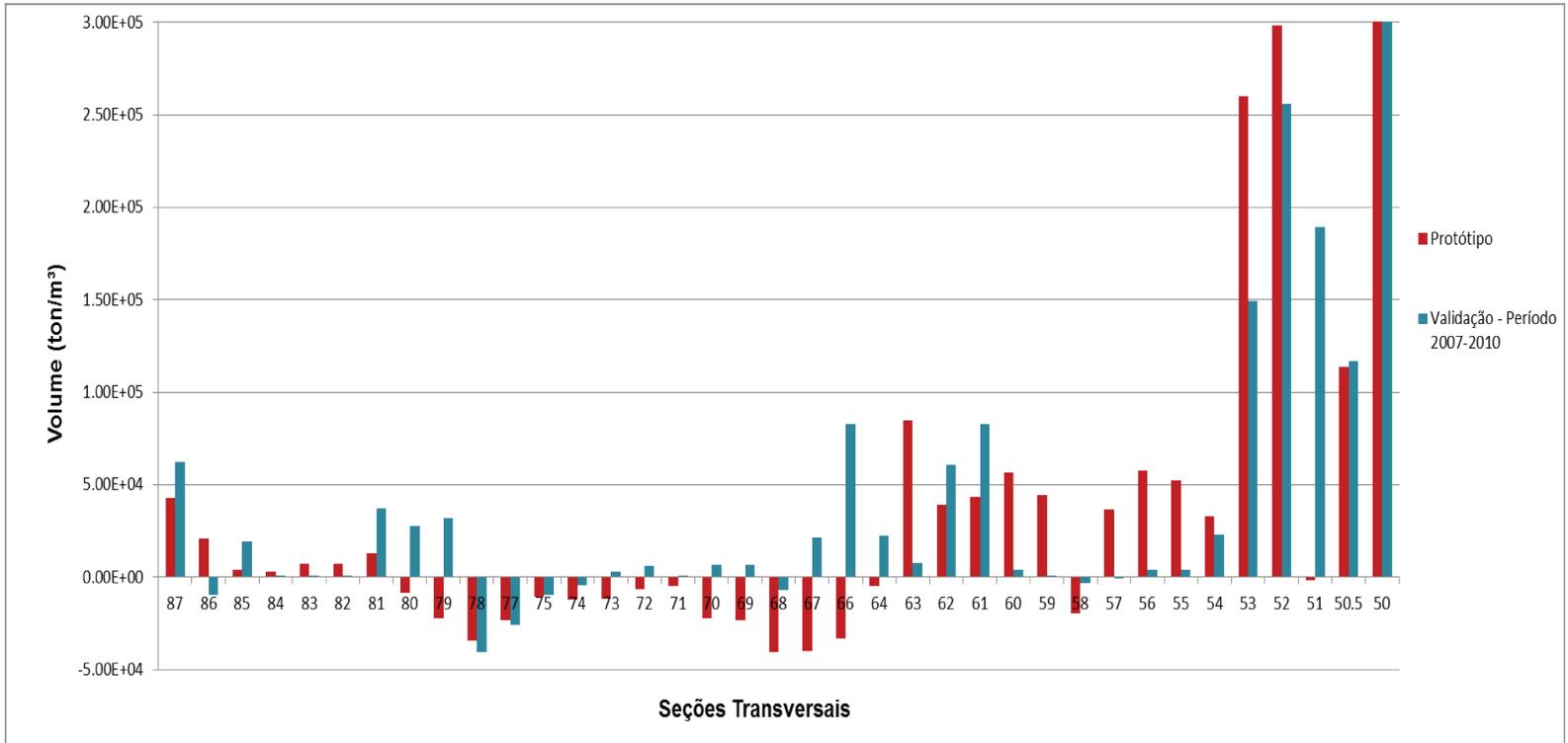


Figura 30: Resultado da Validação do modelo





## 9. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O processamento dos dados e informações levantados para a realização deste trabalho, juntamente com o resultado obtido através das simulações hidrodinâmicas e sedimentológicas, permitiram a criação de um modelo numérico consistente para o reservatório em estudo.

Na área de interesse, isto é, entre os quilômetros 72 e 89 da Hidrovia Tietê-Paraná, os levantamentos do Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo, possibilitaram a estimativa dos volumes assoreados sobre o canal de navegação, os quais indicam elevação dos fundos bastante elevada e já se apresenta como impeditivo à operação da hidrovia.

Já os dados de linha d'água, apesar de serem posteriores ao período simulado, permitiram que o modelo hidrodinâmico do fosse calibrado, a partir da hipótese de valor de coeficiente  $n$  de *Manning* constante, resultando em um coeficiente para a região em estudo de  $n = 0,075$ , índice compatível com aqueles citados na literatura para trechos fluviais onde há a formação de dunas.

Quanto à calibração do modelo de transporte de sedimentos, após 13 simulações foi possível obter, se não uma perfeita correlação entre os volumes depositados entre cada seção, uma tendência de comportamento bem definida entre protótipo e modelo.

A principal exceção se refere ao trecho entre a seção 69 e a 63, onde se verificou que o modelo e o protótipo apresentaram tendências opostas na fase de calibração e validação. Isto é explicado de duas maneiras. primeiramente, durante a etapa de calibração, o modelo e protótipo apresentam tendência deposicional, em função da não existência da ilha fluvial que se observa em crescimento neste trecho. No período usado na etapa de validação, a ilha fluvial já estava consolidada, conforme se observa na figura Figura 31, o que provocou confinamento de seção transversal e conseqüente aumento de velocidade e potencial erosivo. Somado a este efeito, tem-se que os dados batimétricos para este período se limitaram ao canal de navegação, confinado agora entre a ilha e a margem direita da hidrovia. A combinação

destes dois fatores explica as tendências opostas no protótipo na calibração e validação. A Figura 31 é uma sobreposição de imagem de satélite com a localização das seções transversais.

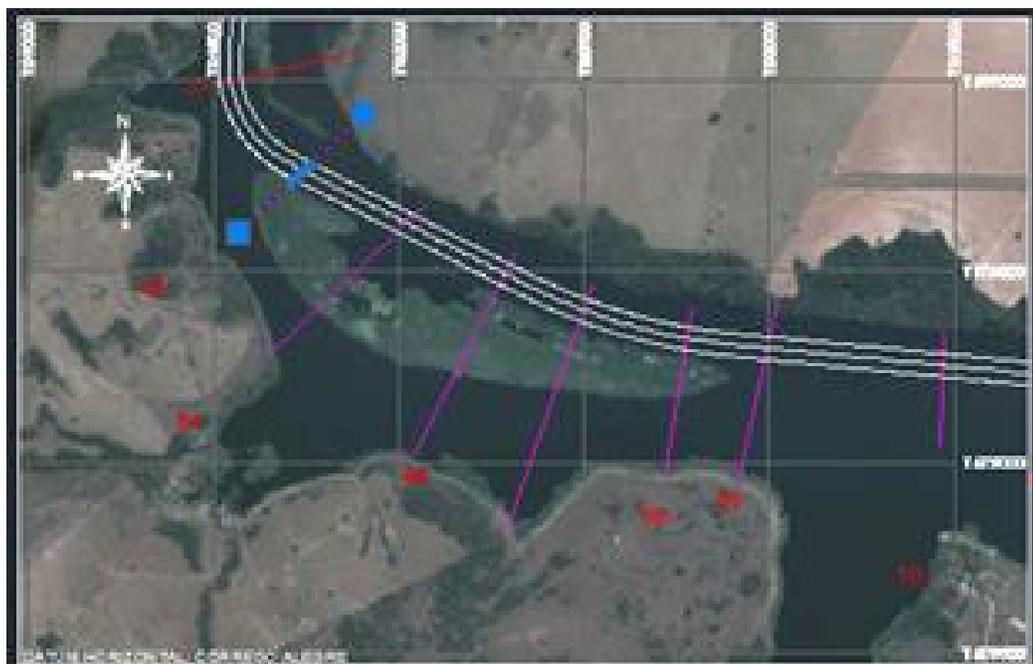


Figura 31: Ilha consolidada no ano de 2010

Cabe ressaltar, que por se tratar de um modelo unidimensional, o mesmo não é capaz de gerar este tipo de feição, motivo pelo qual a simulação não segue a tendência do protótipo neste local. Este fato fica ainda mais evidente na simulação de validação, onde a ilha já se apresenta mais estável no protótipo e a simulação passa a fornecer valores bem próximos de sedimentação no trecho.

Nos demais trechos onde existem diferenças, percebe-se que, se os volumes depositados nas seções forem analisados em conjunto, ao invés de seção por seção, o resultado alcançado pelo modelo foi bastante satisfatório. Estas imprecisões já eram esperadas por se tratar de um modelo unidimensional.

Ainda sim, pode se dizer que a calibração foi realizada com sucesso.

Na etapa de validação, as tendências apresentadas no protótipo continuaram sendo acompanhadas satisfatoriamente pelo modelo, e pode-se dizer que as exceções estão em função do levantamento batimétrico realizado pelo DH/SP nos anos 2006 a 2010 se restringirem ao canal de navegação, enquanto a entrada de dados no modelo foi de seções transversais de margem a margem.

É possível dizer, fazendo-se uma análise combinada entre resultados do modelo e imagens de satélite correspondentes aos anos de estudo, que as tendências mostradas pelo modelo são verídicas e se observa na natureza, mesmo com diferenças entre validação e calibração.

O modelo que foi aqui calibrado e validado se configura como uma importante ferramenta de suporte a tomada de decisão dos gestores de reservatórios, principalmente reservatórios que, como este, pertencem a um complexo de usinas hidrelétricas subseqüentes, e estão inseridos em um contexto de grandes hidrovias.



## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahrama, Codomar, Dnit, **A Hidrovia Do Rio Paraná – Dados E Informações**. São Paulo: Ahrama, 2009. 55p.

Alfredini, P. **Obras E Gestão De Portos E Costas**, Ed. Edgard Blücher, 2005.

Bastos, A. C. **Análise Morfodinâmica E Caracterização Dos Processos Erosivos Ao Longo Do Litoral Norte-Fluminense, Entre Cabiúnas E Atafona**. Dissertação De Mestrado Em Geologia E Geofísica Marinha, Uff, 1997.

Brandt, S.A., 2000. **Prediction Of Downstream Geomorphological Changes After Dam Construction: A Stream Power Approach**. Int. J. Water Resour. Dev. 16 (3), 343–367.

Carling, P.A., 1988. **Channel Change And Sediment Transport In Regulated Uk Rivers. Regulated Rivers**. Res. Manage. 2, 369–387.

Gleick, P.H. Ed., 1993. **Water In Crisis: A Guide To The World's Fresh Water Resources**. Oxford Univ. Press, Oxford, Xxivq 473 Pp.

Gregory, K.J., 1987. **Environmental Effects Of River Channel Changes. Regulated Rivers**. 1, 358–363.

Harvey, A.M., 1969. **Channel Capacity And The Adjustment Of Streams To Hydrologic Regime**. J. Hydrol. 8, 82–98.

Icold, 1988. World Register Of Dams, Update. International Commission On Large Dams, Paris.

Iqbal, K. S., Hasegawa, K., (2001). **Inland Transportation System Planning By Life-Cycle Impact Assessment: A Case Study**. 2nd Report: Single Comparison Index. Journal Of Marine Science And Technology. Volume 6, Number 2.

Lopes, W.P. (2010). **Impactos na Produção de Energia nas Usinas Hidroelétricas do Rio Tietê em Decorrência do Transporte Hidroviário**. Dissertação de Mestrado. FEC/Unicamp.

Medeiros, P. R. P. (2003) **Aporte Fluvial, Transformação E Dispersão Da Matéria Em Suspensão E Nutrientes No Estuário Do Rio São Francisco, Após A Construção Da Usina Hidroelétrica Do Xingó (Al/Se)**. Tese De Doutorado. Departamento De Geoquímica, Universidade Federal Fluminense.

Ministério Da Defesa, Ministério Dos Transportes, **Plano Nacional De Logística E Transporte** – Pnlt, Relatório Executivo”, Rev 00. Brasília: Centran, 2007, 497p.

Petts, G.E., 1979. **Complex Response Of River Channel Morphology Subsequent To Reservoir Construction**. Prog. Phys. Geogr. 3, 329–362.

Petts, G.E., 1984. **Sedimentation Within A Regulated River**. Earth Surf. Processes Landforms 9, 125–134.

Ramos, C. L. (1984) **Mecânica Do Transporte De Sedimentos E Do Escoamento Em Leito Movel**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.

Volker, A., Henry, J.C. (Eds), 1988. **Side Effects Of Water Resources Management**. Iahs Publ. Vol. 172, Vi + 269 Pp.

Williams, G.P., Wolman, M.G., 1984. **Downstream Effects Of Dams On Alluvial Rivers**. In: Geological Survey

Xu, J., 1990a. **An Experimental Study Of Complex Response In River Channel Adjustment Downstream From A Reservoir**. Earth Surf. Processes Landforms 15, 43–53.

## **ANEXO I – Resultados de Análises físico-químicas e Distribuição granulométrica dos sedimentos**



PARÂMETROS		PS 01 - S	PS 01 - F	PS 02 - S	PS 03 - S
Profundidade (m)		3,0	3,0	3,0	2,9
Data Coleta		26/10/2010	26/10/2010	26/10/2010	26/10/2010
Hora Coleta		15:12	15:40	14:47	14:02
<b>GRANULOMETRIA %</b>		<b>mm</b>			
Fração de Argila	0,00394 - 0,0002	24,30	25,40	17,60	20,80
Fração de Silte	0,062 - 0,00394	58,90	60,40	54,00	58,80
Fração de Areia Muito Fina	0,125 - 0,062	4,65	3,67	14,40	7,97
Fração de Areia Fina	0,25 - 0,125	1,58	0,78	1,22	0,71
Fração de Areia Média	0,5 - 0,25	1,50	1,05	1,13	0,87
Fração de Areia Grossa	1,0 - 0,5	2,70	2,42	3,25	3,89
Fração de Areia Muito Grossa	2,0 - 1,0	6,18	5,81	8,27	6,88
Fração de Areia Total	2,00 - 0,062	16,60	13,70	28,30	20,30
PARÂMETROS		PS 03 - F	PS 04 - S	PS 04 - F	PS 05 - S
Profundidade (m)		2,9	3,2	3,2	1,6
Data Coleta		26/10/2010	26/10/2010	26/10/2010	26/10/2010
Hora Coleta		14:19	13:20	13:35	11:23
<b>GRANULOMETRIA %</b>		<b>mm</b>			
Fração de Argila	0,00394 - 0,0002	17,50	21,4	17,7	6,3
Fração de Silte	0,062 - 0,00394	56,50	58,2	47,7	22,4
Fração de Areia Muito Fina	0,125 - 0,062	15,20	3,81	13,4	47,7
Fração de Areia Fina	0,25 - 0,125	1,31	1,04	2,16	12
Fração de Areia Média	0,5 - 0,25	1,07	1,57	3,26	2,73
Fração de Areia Grossa	1,0 - 0,5	2,56	4,45	6,3	3,86
Fração de Areia Muito Grossa	2,0 - 1,0	5,81	9,05	9,38	5
Fração de Areia Total	2,00 - 0,062	26,00	19,9	34,7	71,3
PARÂMETROS		PS 05 - F	PS 06 - S	PS 06 - F	PS 07 - S
Profundidade (m)		1,6	2,9	2,9	3,4
Data Coleta		26/10/2010	26/10/2010	26/10/2010	26/10/2010
Hora Coleta		11:46	10:34	10:54	09:58
<b>GRANULOMETRIA %</b>		<b>mm</b>			
Fração de Argila	0,00394 - 0,0002	15,7	16,2	8,7	16,8
Fração de Silte	0,062 - 0,00394	42,9	41,7	55,1	53,8
Fração de Areia Muito Fina	0,125 - 0,062	11,3	20,5	26,1	14,6
Fração de Areia Fina	0,25 - 0,125	4,7	10,5	6,66	1,96
Fração de Areia Média	0,5 - 0,25	3,69	1,48	1,67	1,24
Fração de Areia Grossa	1,0 - 0,5	6,52	2,66	1,15	3,36
Fração de Areia Muito Grossa	2,0 - 1,0	14,9	6,95	0,524	8,1
Fração de Areia Total	2,00 - 0,062	41,2	42,1	36,1	29,3

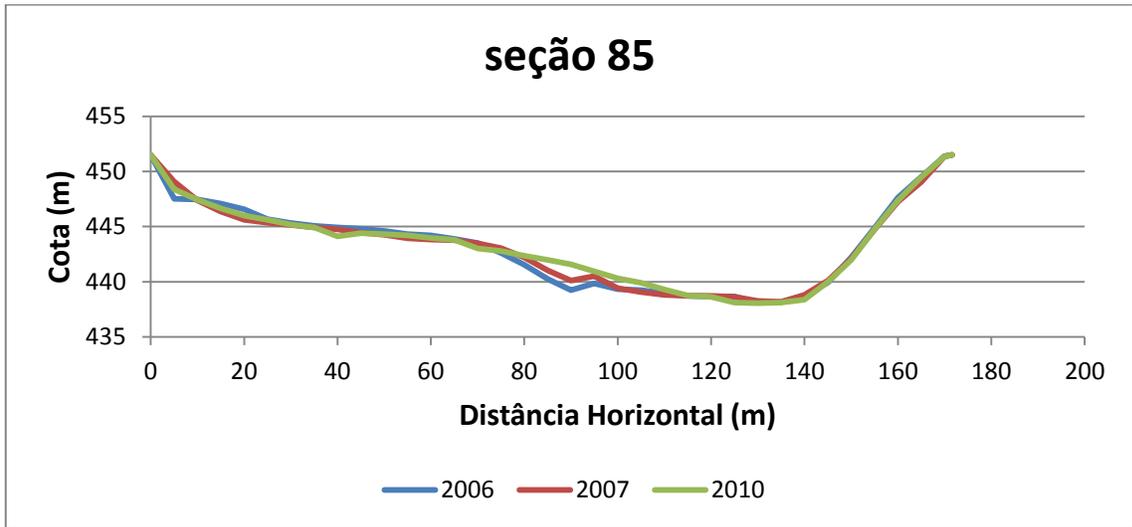
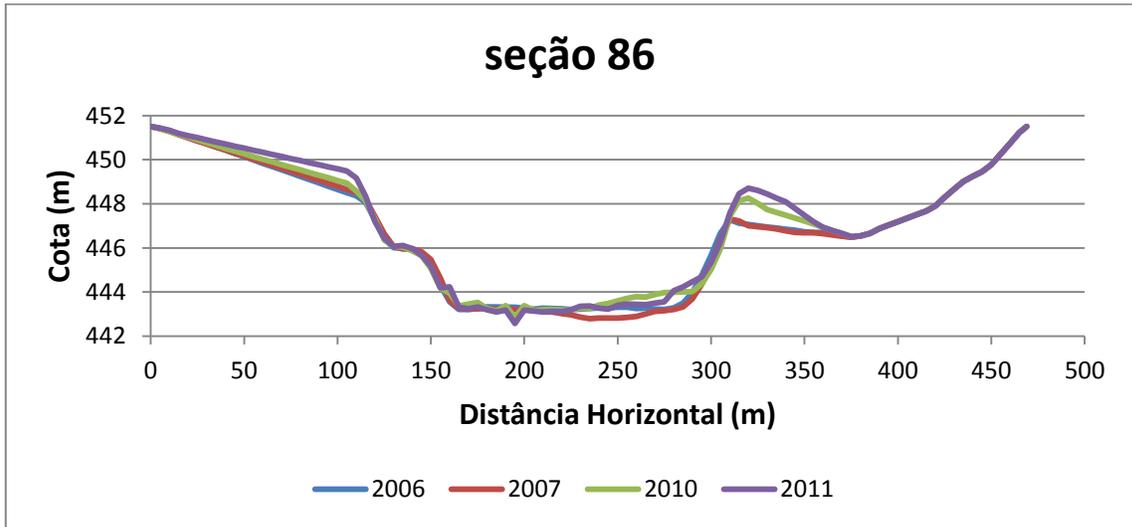
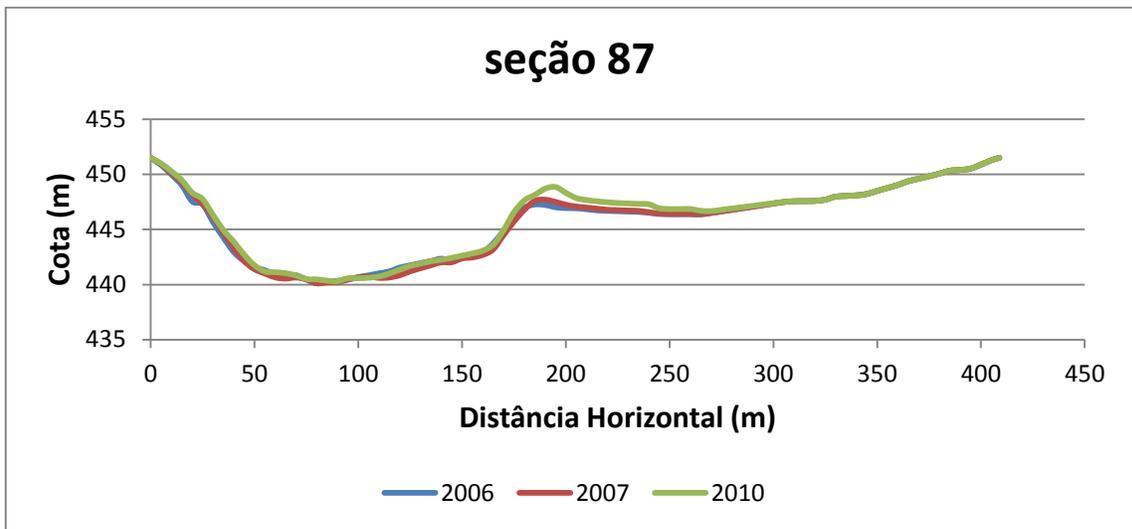
PARÂMETROS		PS 07 - F	PS 08 - S	PS 08 - F	PS 09 - S
Profundidade (m)		3,4	3,1	3,1	2,0
Data Coleta		26/10/2010	26/10/2010	26/10/2010	25/10/2010
Hora Coleta		10:14	09:15	09:30	17:49
<b>GRANULOMETRIA %</b>	<b>mm</b>				
Fração de Argila	0,00394 - 0,0002	27,5	22,5	19,4	21,8
Fração de Silte	0,062 - 0,00394	11,7	46	54,4	59,4
Fração de Areia Muito Fina	0,125 - 0,062	3,68	2,2	10,6	7,04
Fração de Areia Fina	0,25 - 0,125	3,56	1,56	0,8	0,786
Fração de Areia Média	0,5 - 0,25	6,36	2,48	1,07	0,864
Fração de Areia Grossa	1,0 - 0,5	14	7,35	4,51	2,67
Fração de Areia Muito Grossa	2,0 - 1,0	32,8	17,4	9,07	7,36
Fração de Areia Total	2,00 - 0,062	60,4	31	26	18,7
PARÂMETROS		PS 09 - F	PS 10 - S	PS 11 - S	PS 11 - F
Profundidade (m)		2,0	3,4	2,0	2,0
Data Coleta		25/10/2010	25/10/2010	25/10/2010	25/10/2010
Hora Coleta		18:05	17:10	16:05	16:31
<b>GRANULOMETRIA %</b>	<b>mm</b>				
Fração de Argila	0,00394 - 0,0002	22	16,9	17,5	26,6
Fração de Silte	0,062 - 0,00394	46,6	38,5	48,8	54,9
Fração de Areia Muito Fina	0,125 - 0,062	6,24	5,41	10,2	10,7
Fração de Areia Fina	0,25 - 0,125	1,3	6,04	3,71	1,5
Fração de Areia Média	0,5 - 0,25	1,32	3,56	2,88	1,42
Fração de Areia Grossa	1,0 - 0,5	3,86	8,2	6,55	2,44
Fração de Areia Muito Grossa	2,0 - 1,0	18,7	20,9	10,1	2,3
Fração de Areia Total	2,00 - 0,062	31,4	44,1	33,4	18,4
PARÂMETROS		PS 12 - S	PS 12 - F	PS 13 - S	PS 13 - F
Profundidade (m)		1,8	1,8	3,0	3,0
Data Coleta		25/10/2010	25/10/2010	25/10/2010	25/10/2010
Hora Coleta		15:00	15:21	14:08	14:30
<b>GRANULOMETRIA %</b>	<b>mm</b>				
Fração de Argila	0,00394 - 0,0002	17,4	25,1	15,2	28,7
Fração de Silte	0,062 - 0,00394	50,3	59,1	63	55
Fração de Areia Muito Fina	0,125 - 0,062	14,7	5,48	4,62	4,9
Fração de Areia Fina	0,25 - 0,125	3,88	4,98	1,74	1,1
Fração de Areia Média	0,5 - 0,25	4,8	2,13	2,67	1,7
Fração de Areia Grossa	1,0 - 0,5	5,66	1,92	5,3	2,9
Fração de Areia Muito Grossa	2,0 - 1,0	3,1	0,983	7,24	3,8
Fração de Areia Total	2,00 - 0,062	32,1	15,5	21,6	16,3

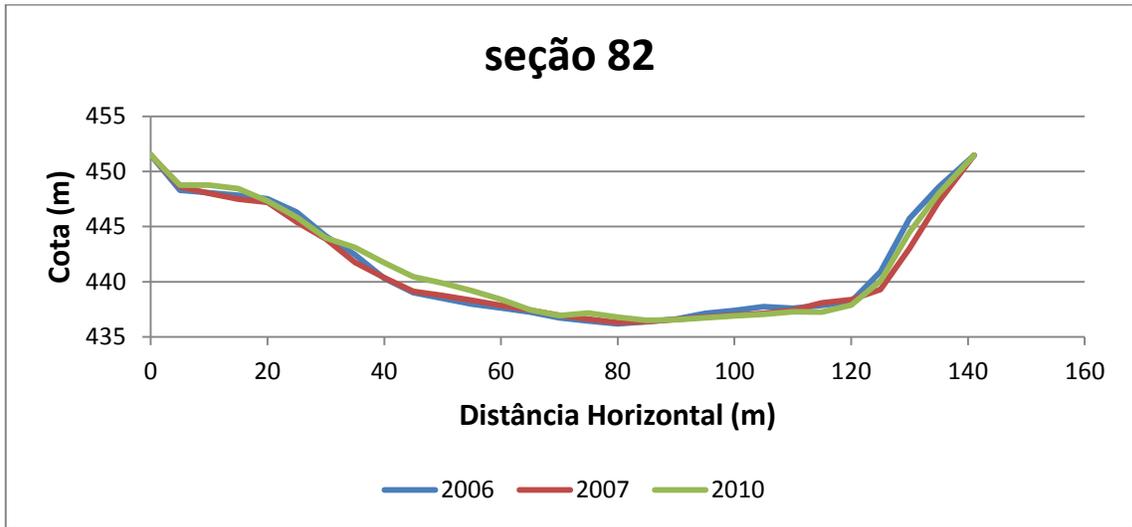
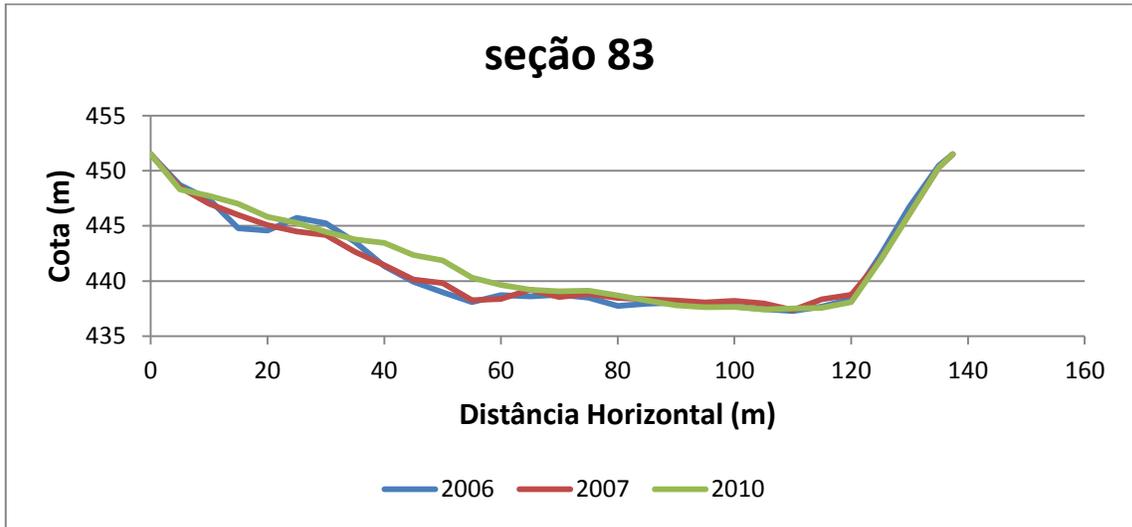
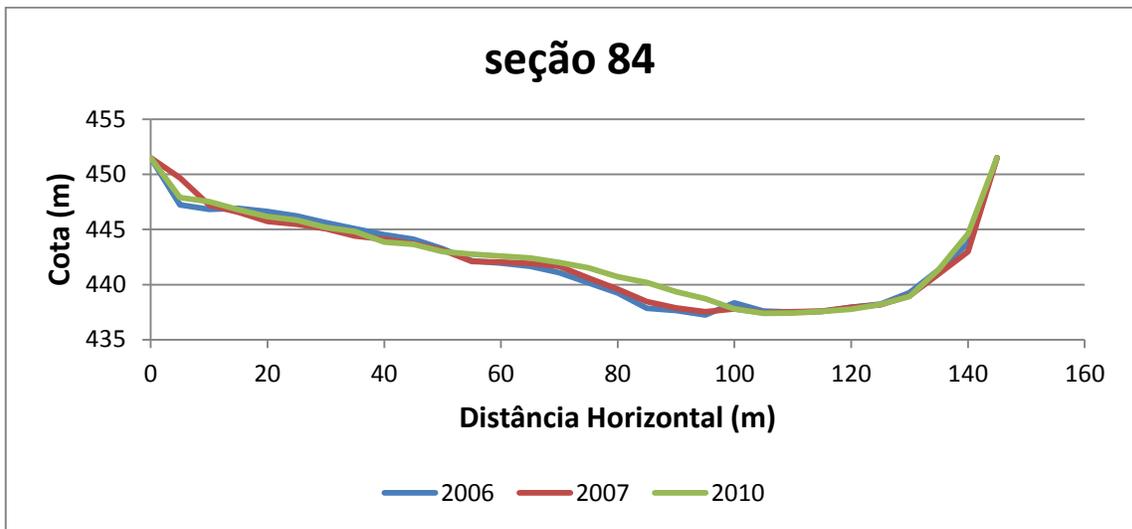
<b>PARÂMETROS</b>		<b>PS 14 - S</b>	<b>PS 14 - M</b>	<b>PS 14 - F</b>	<b>PS 15 - S</b>
Profundidade (m)		2,3	2,3	2,3	2,8
Data Coleta		25/10/2010	25/10/2010	25/10/2010	25/10/2010
Hora Coleta		12:10	13:30	12:45	11:00
<b>GRANULOMETRIA %</b>	<b>mm</b>				
Fração de Argila	0,00394 - 0,0002	29,2	26,4	20,6	24,9
Fração de Silte	0,062 - 0,00394	61,4	55,7	58,5	57,6
Fração de Areia Muito Fina	0,125 - 0,062	5,3	3,38	16,8	6,19
Fração de Areia Fina	0,25 - 0,125	0,9	1,94	1,3	2,78
Fração de Areia Média	0,5 - 0,25	0,5	2,72	0,8	2,43
Fração de Areia Grossa	1,0 - 0,5	0,7	4,16	0,9	2,41
Fração de Areia Muito Grossa	2,0 - 1,0	1,4	5,46	1,0	3,48
Fração de Areia Total	2,00 - 0,062	9,5	17,7	20,9	17,3
<b>PARÂMETROS</b>		<b>PS 15 - F</b>	<b>PS 16 - F</b>		
Profundidade (m)		2,8	3,7		
Data Coleta		25/10/2010	25/10/2010		
Hora Coleta		11:26	10:15		
<b>GRANULOMETRIA %</b>	<b>mm</b>				
Fração de Argila	0,00394 - 0,0002	25,1	2,4		
Fração de Silte	0,062 - 0,00394	49,4	3,2		
Fração de Areia Muito Fina	0,125 - 0,062	15,7	8,86		
Fração de Areia Fina	0,25 - 0,125	2,89	84,5		
Fração de Areia Média	0,5 - 0,25	2,07	0,5		
Fração de Areia Grossa	1,0 - 0,5	2,43	0,2		
Fração de Areia Muito Grossa	2,0 - 1,0	2,2	<0,01		
Fração de Areia Total	2,00 - 0,062	25,3	94,1		

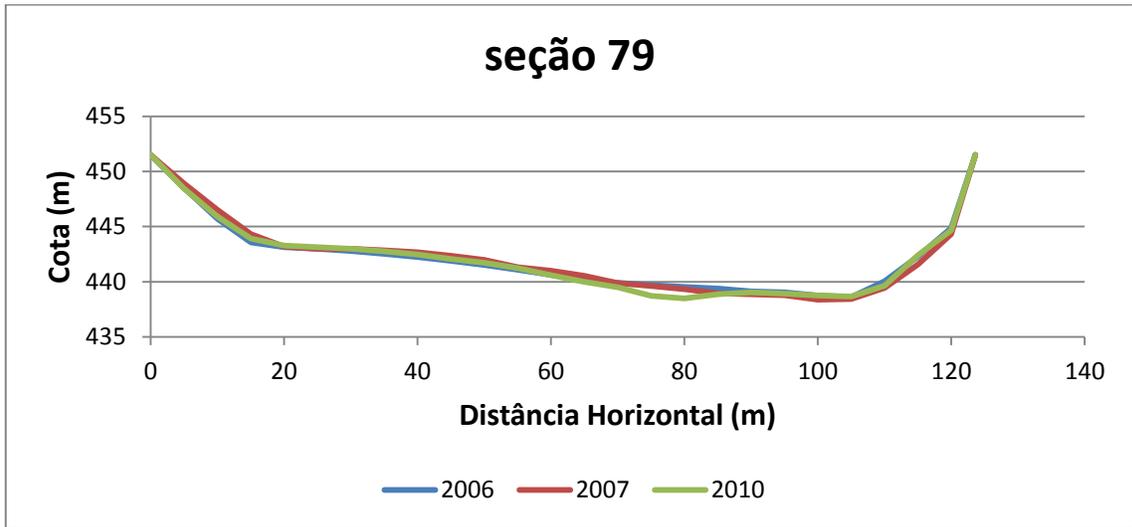
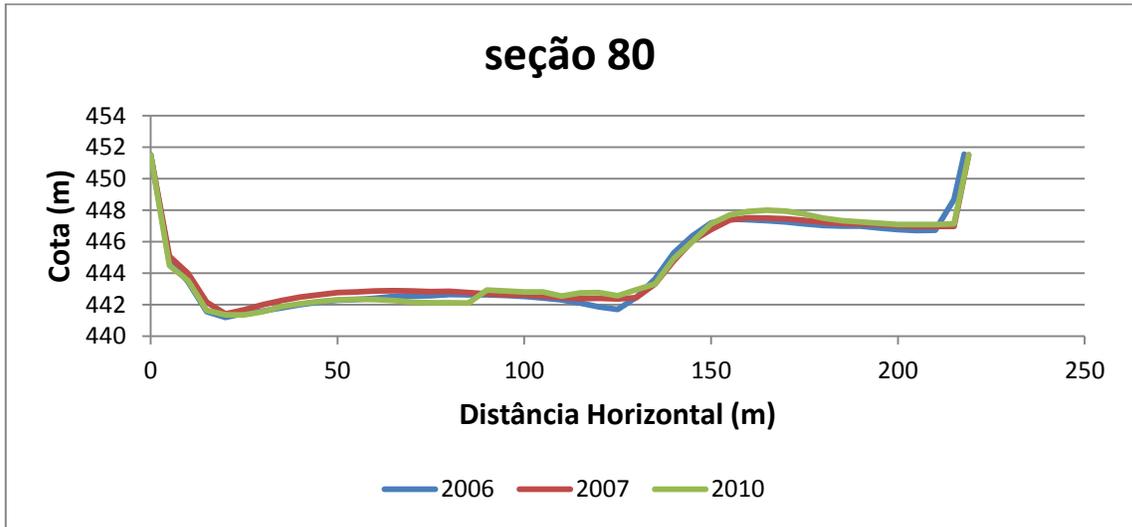
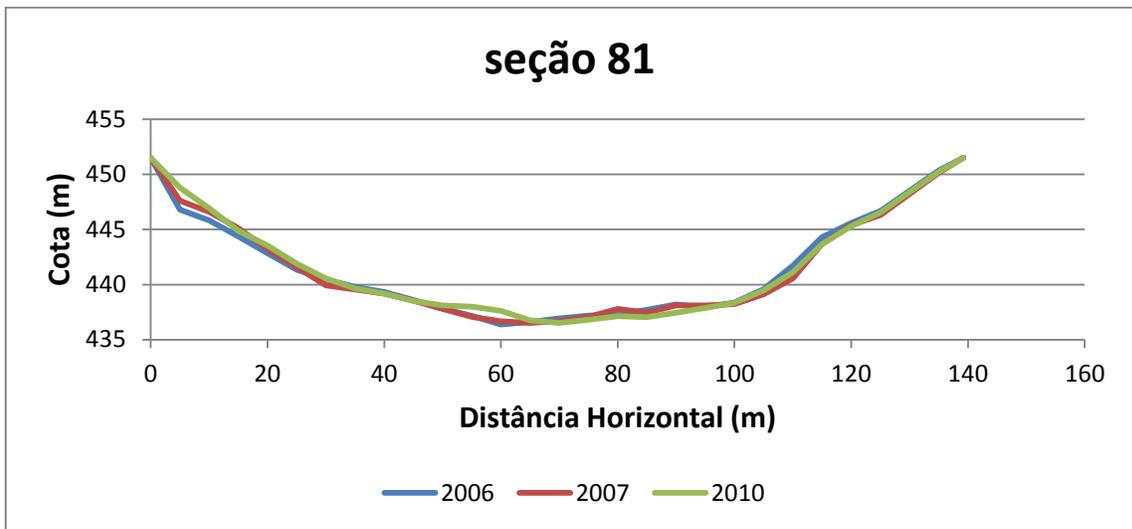


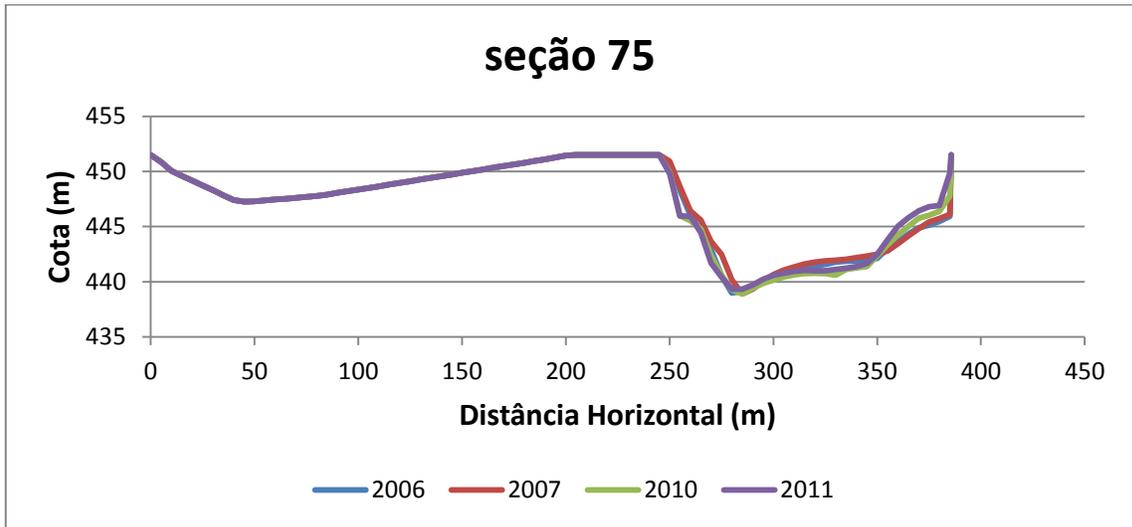
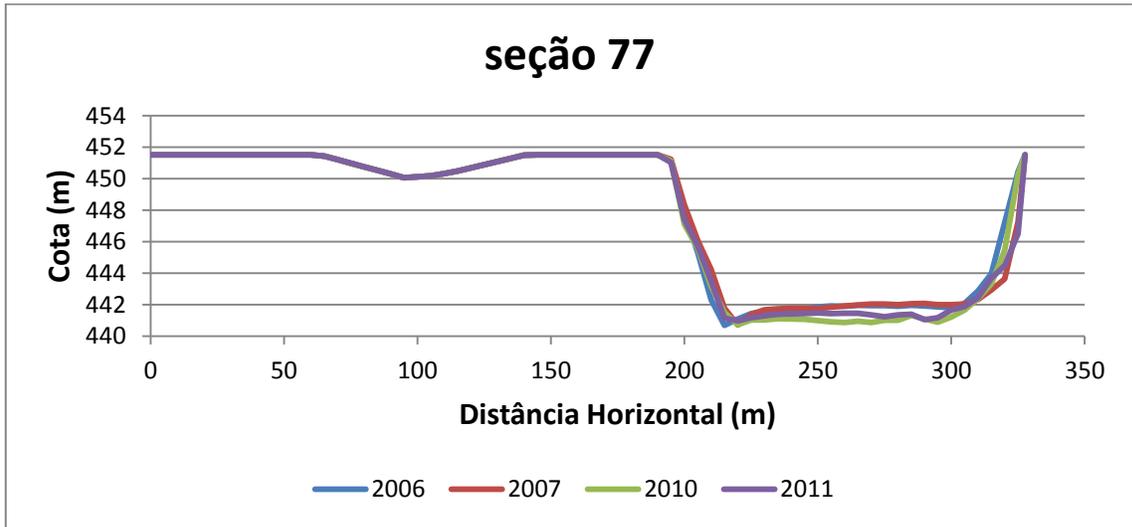
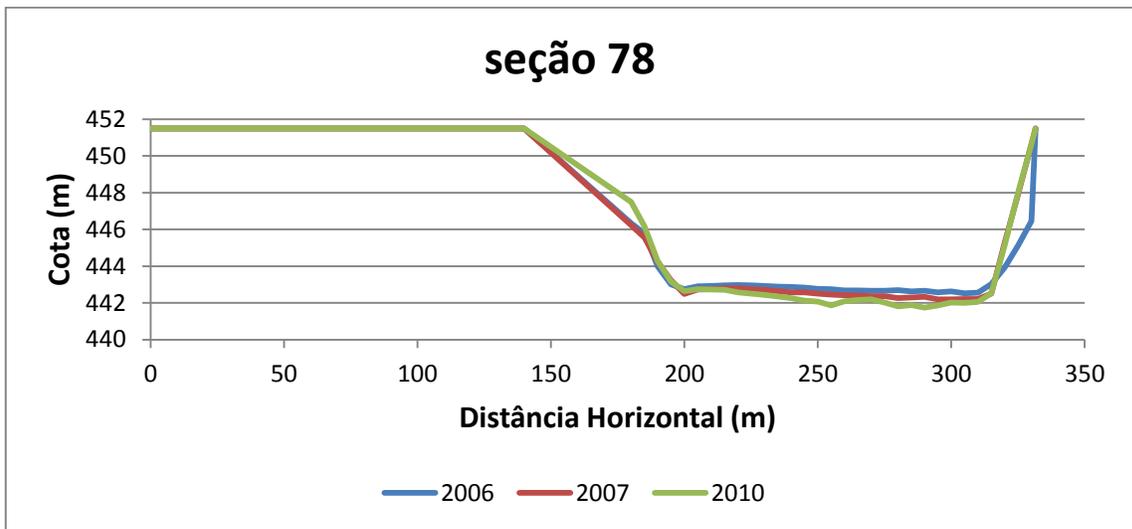
**ANEXO II – Resultados do processamento de seções batimétricas durante os anos de 2006, 2007 e 2010.**

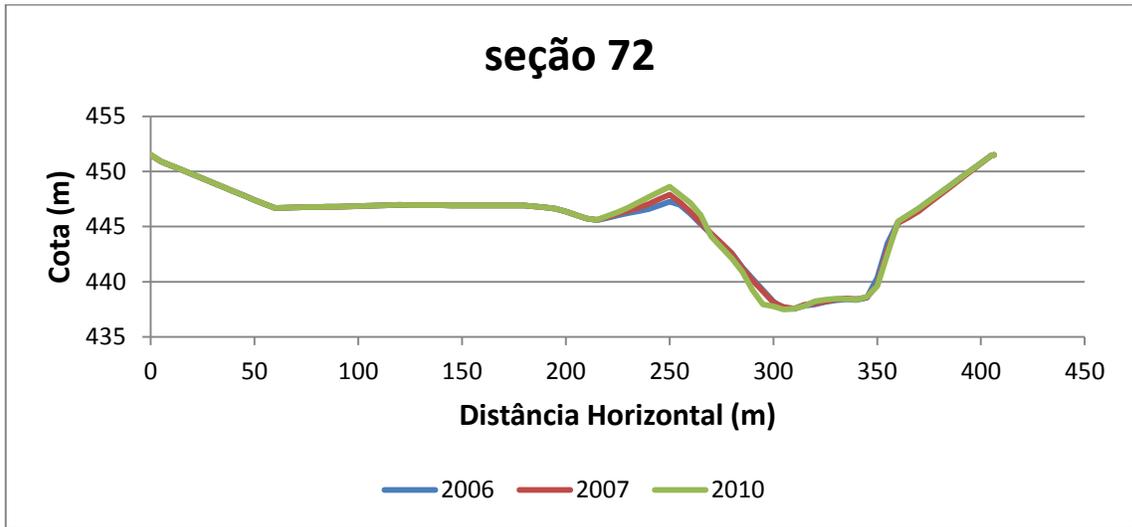
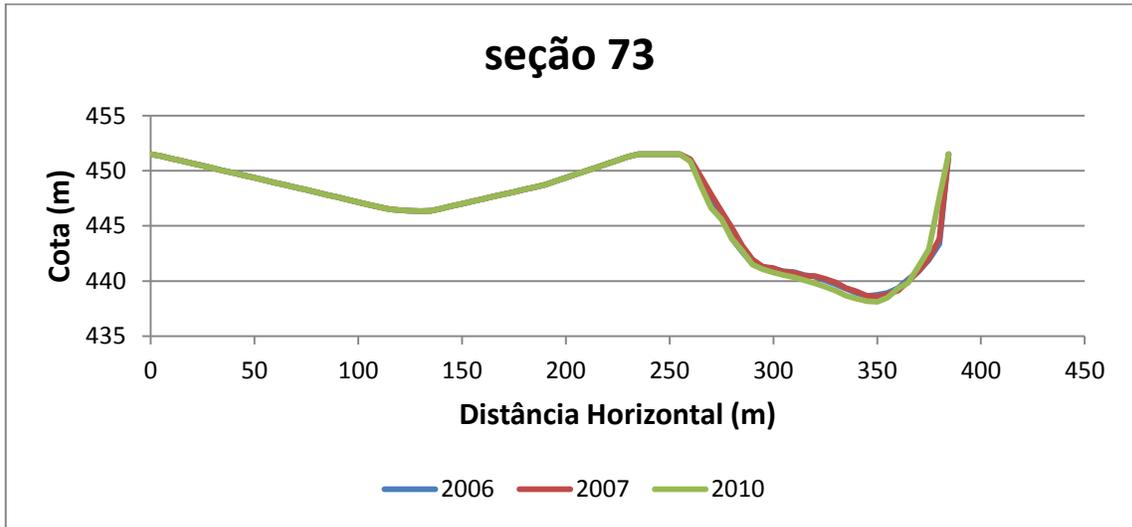
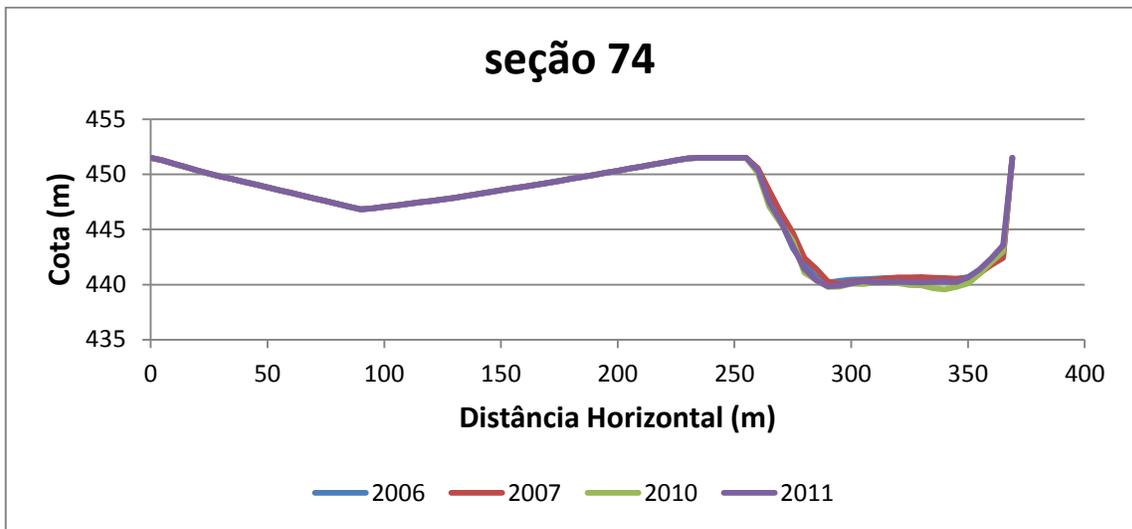


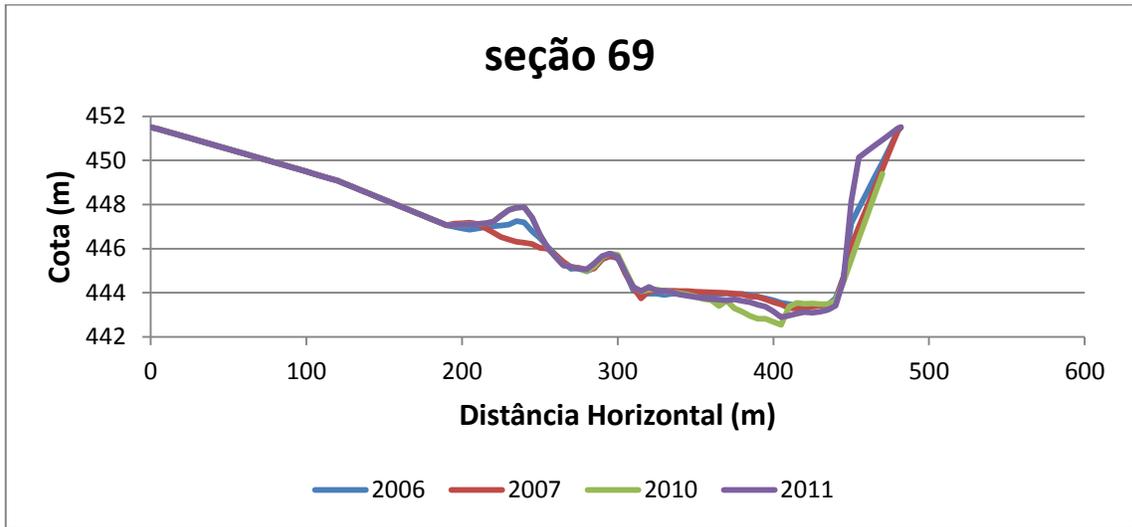
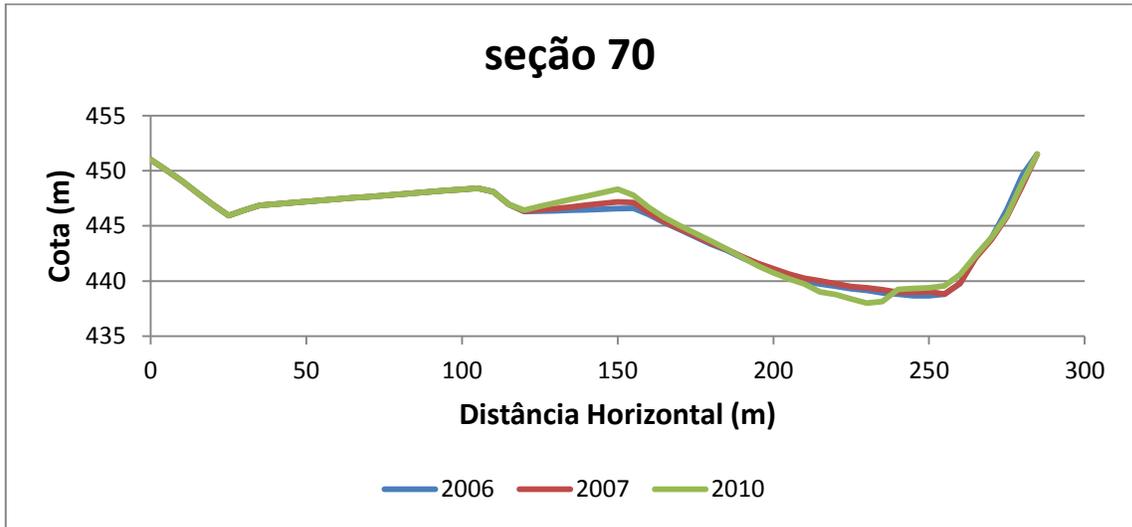
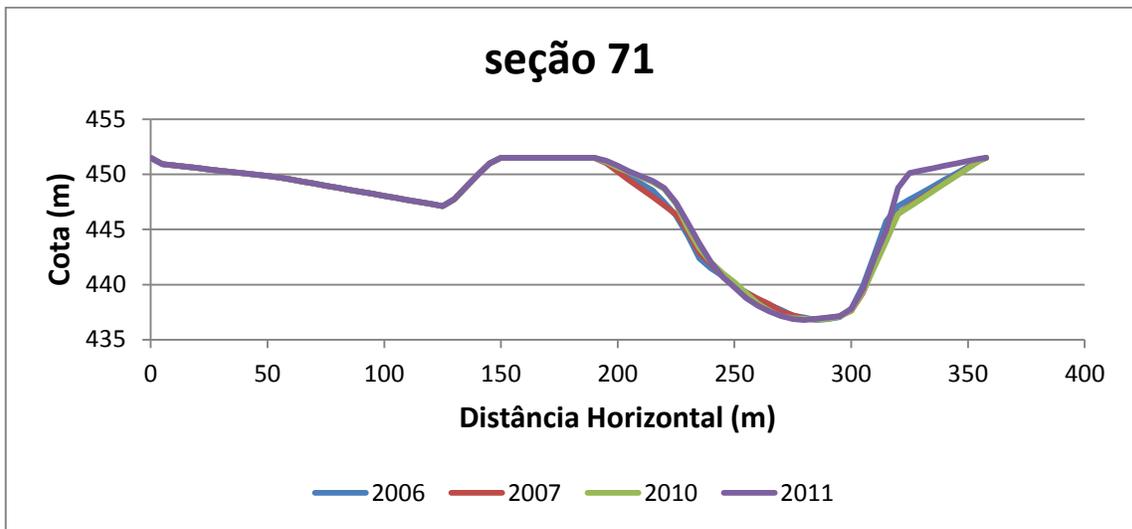


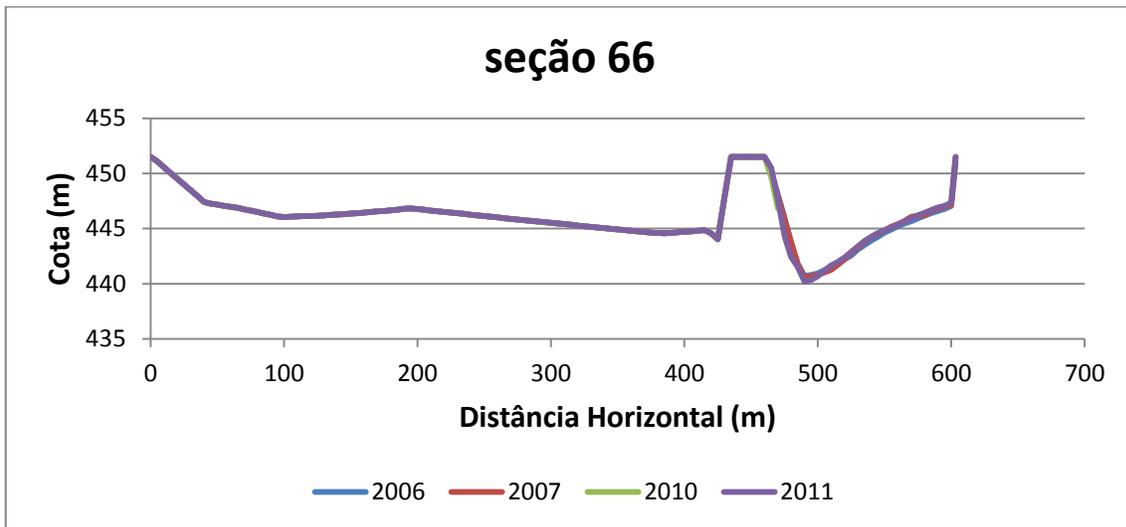
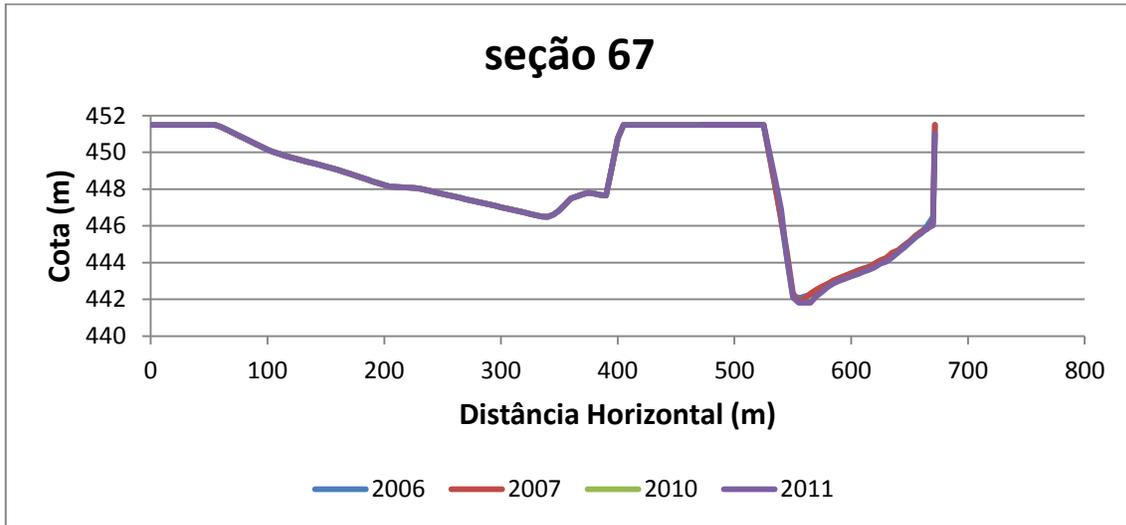
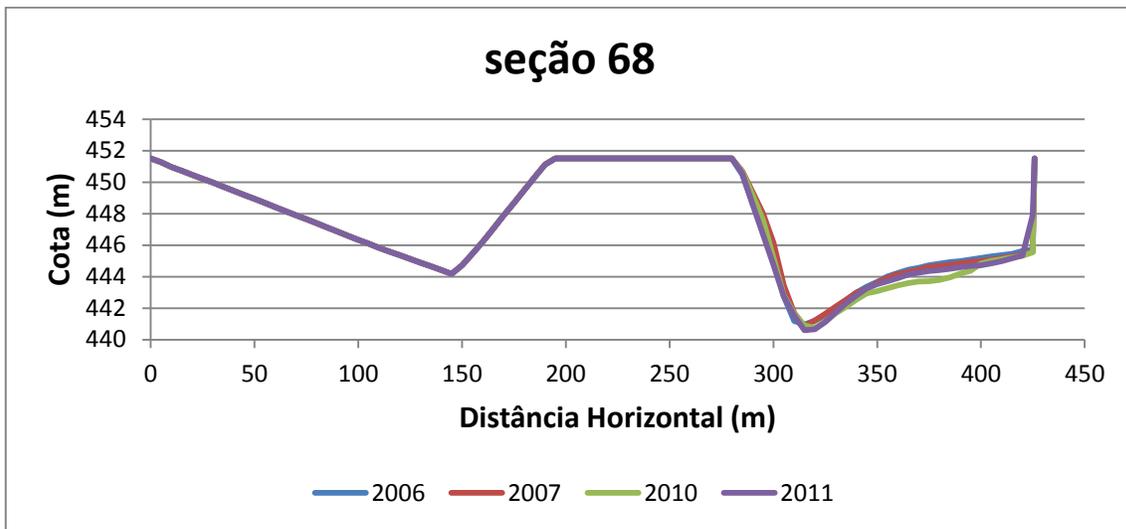


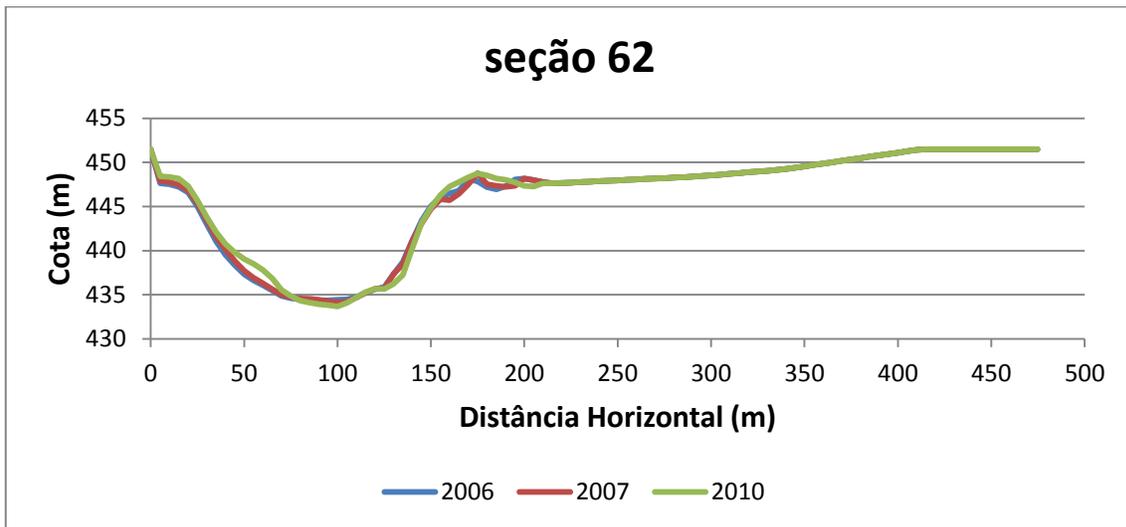
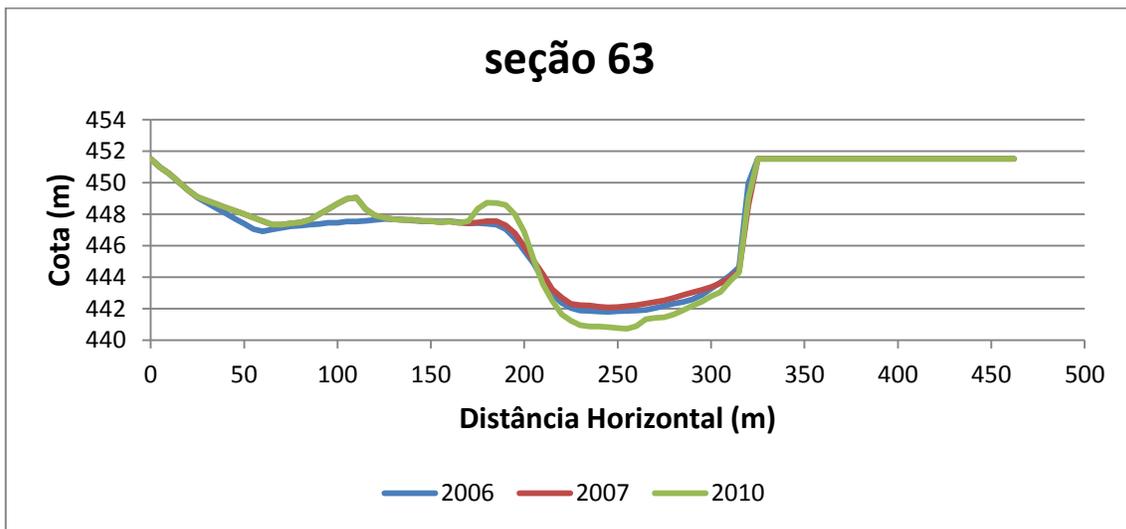
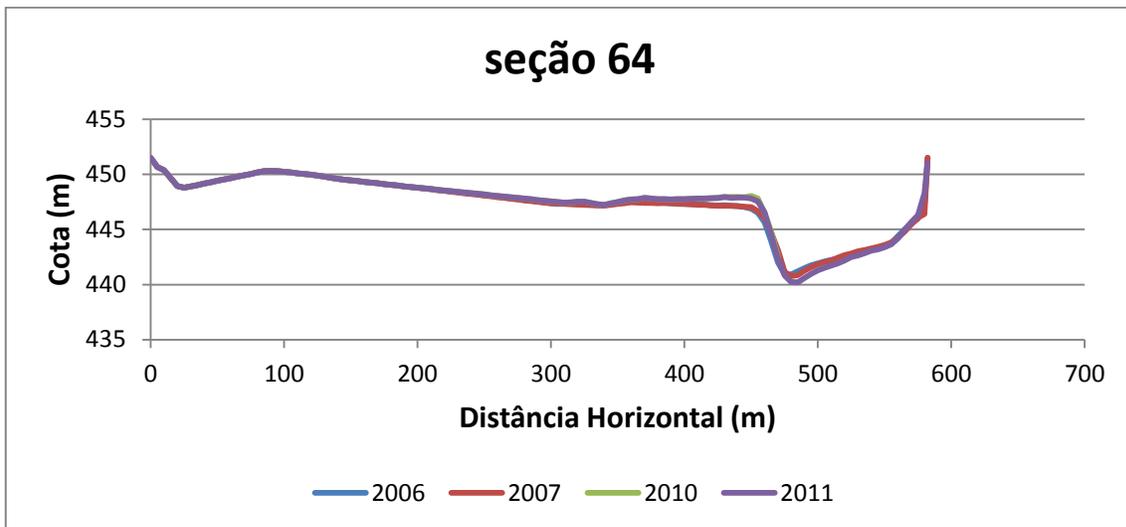


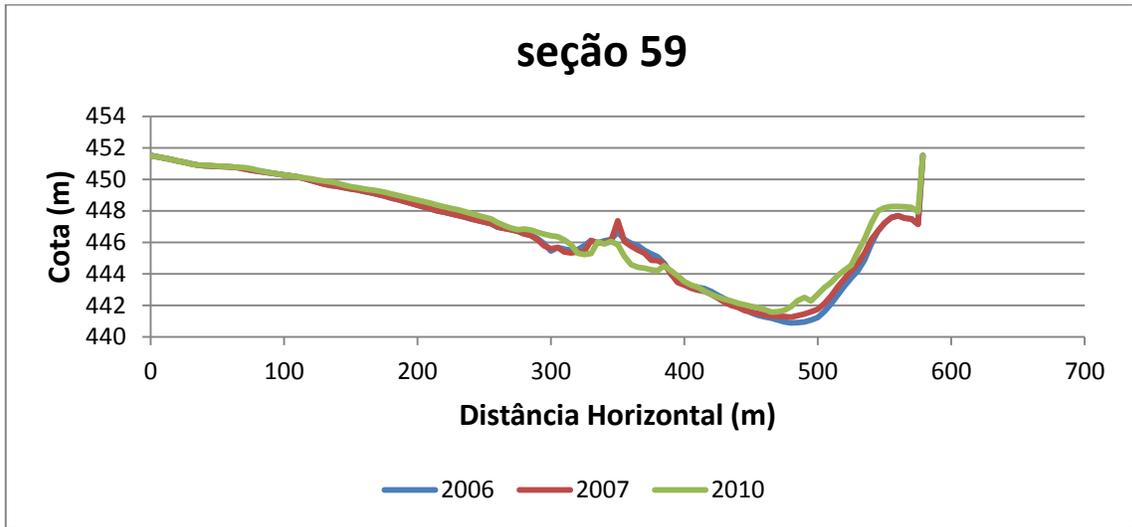
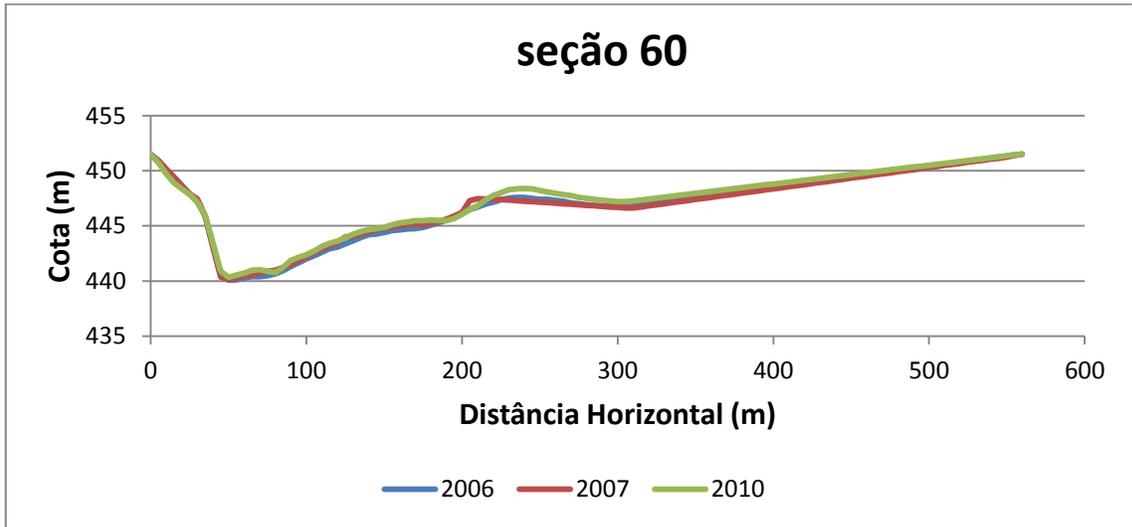
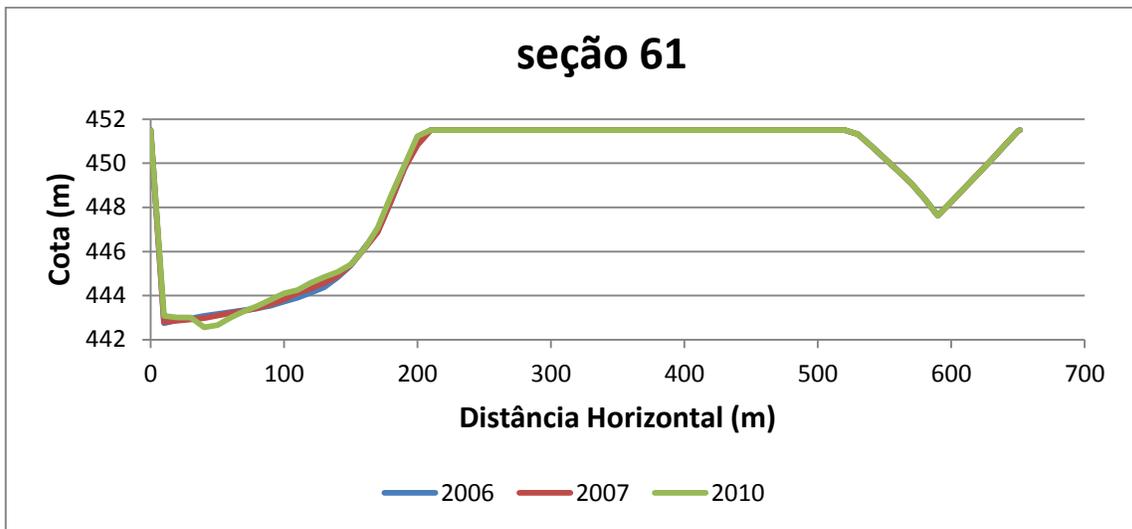


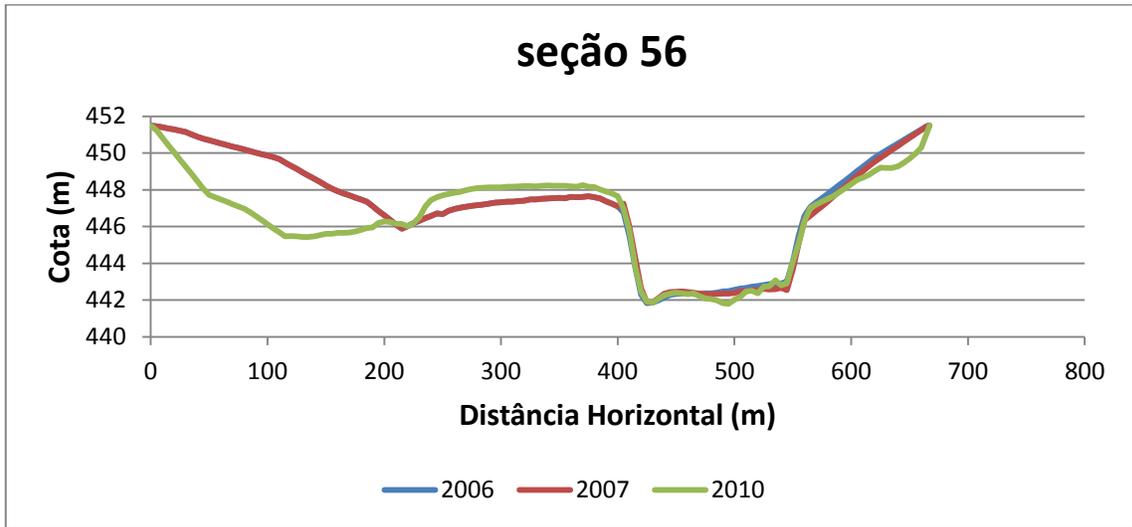
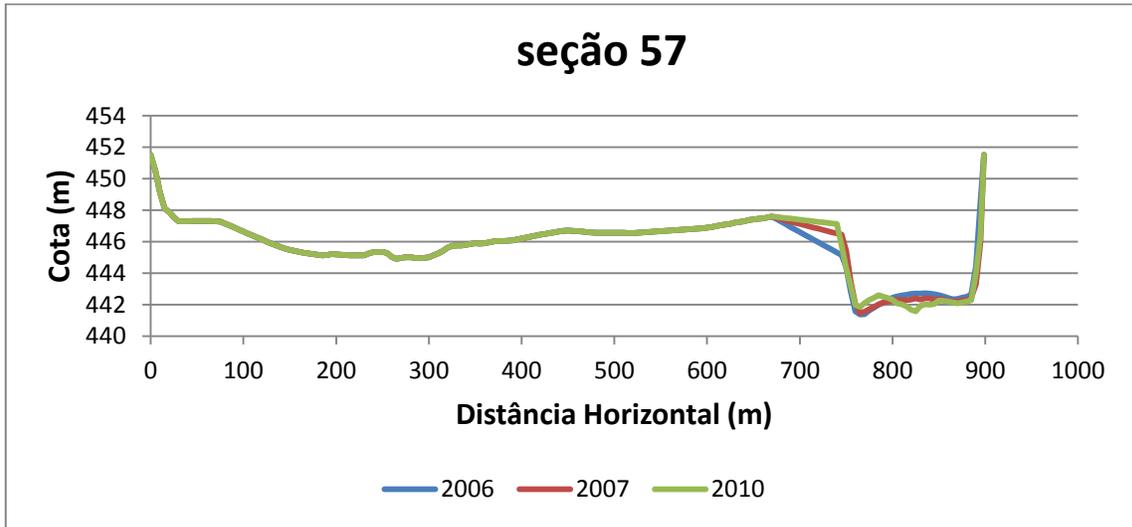
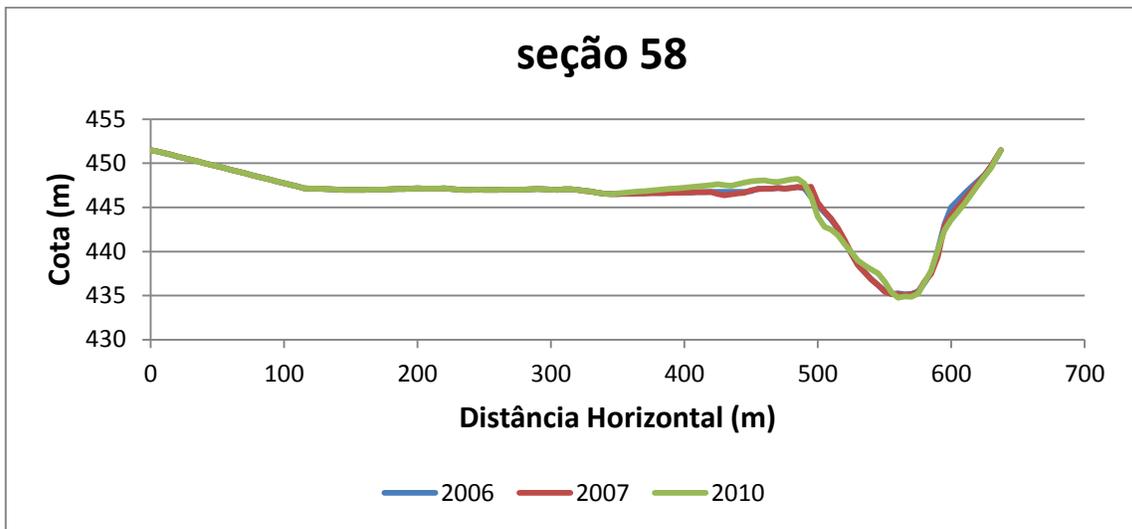


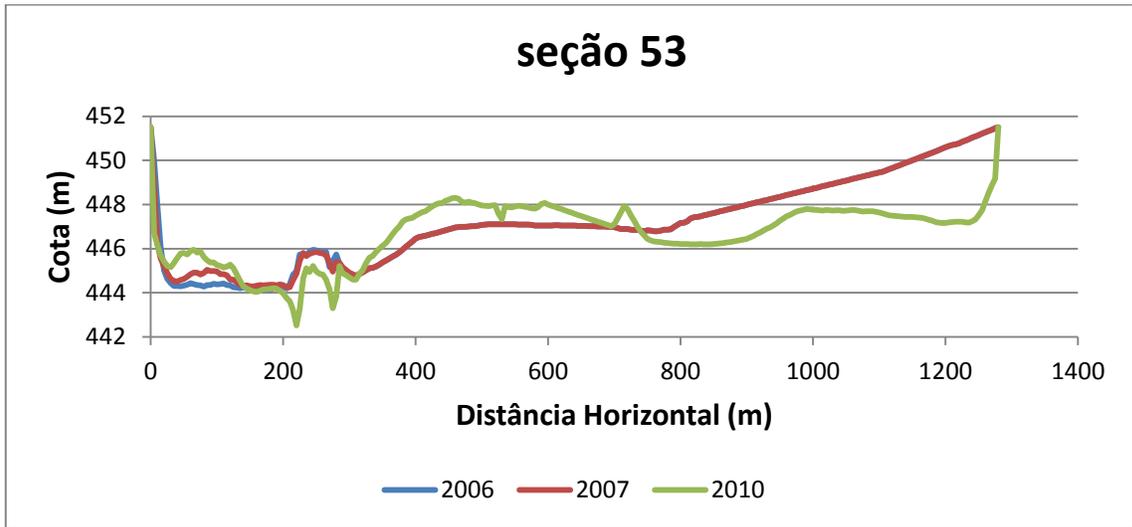
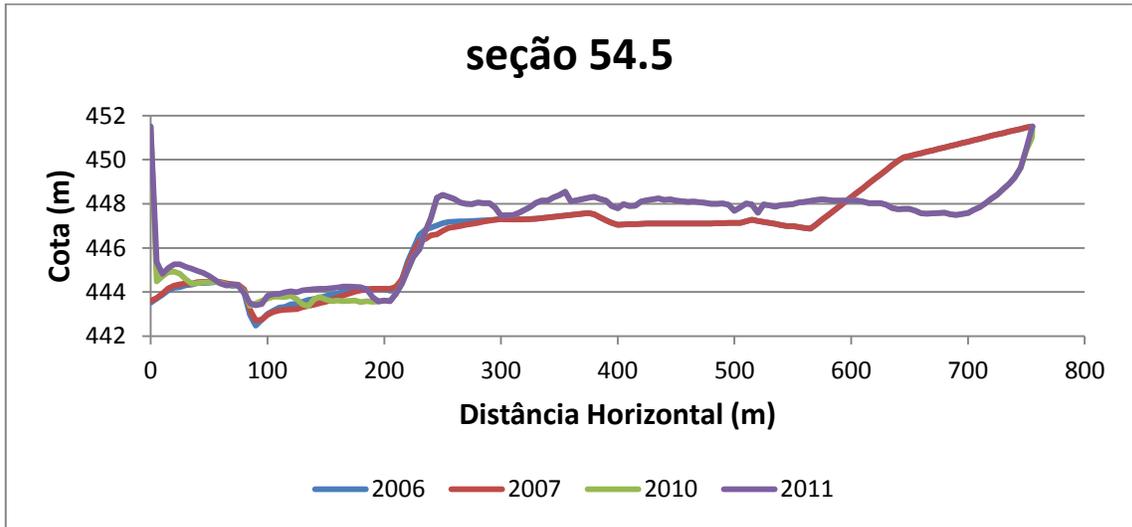
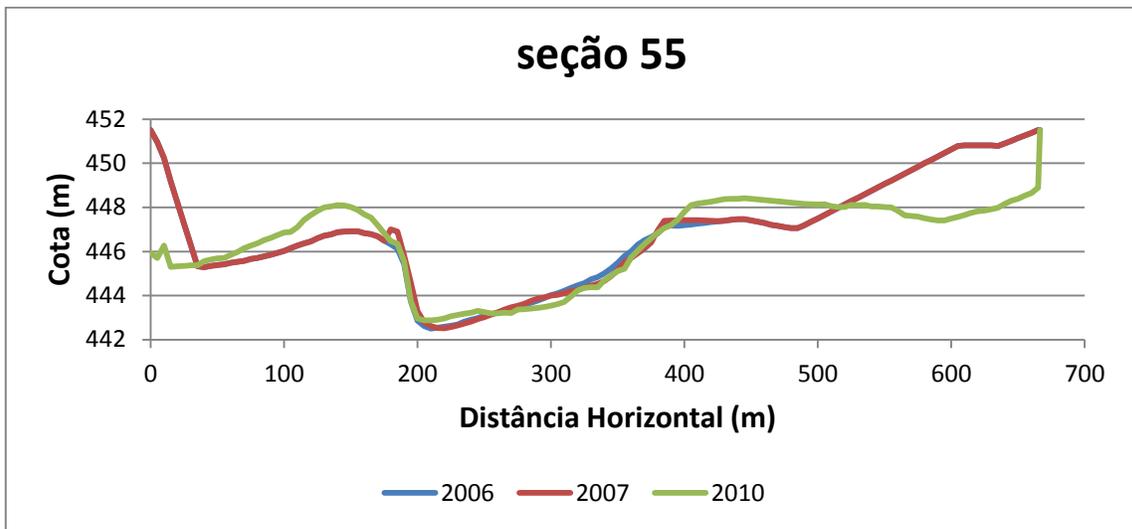


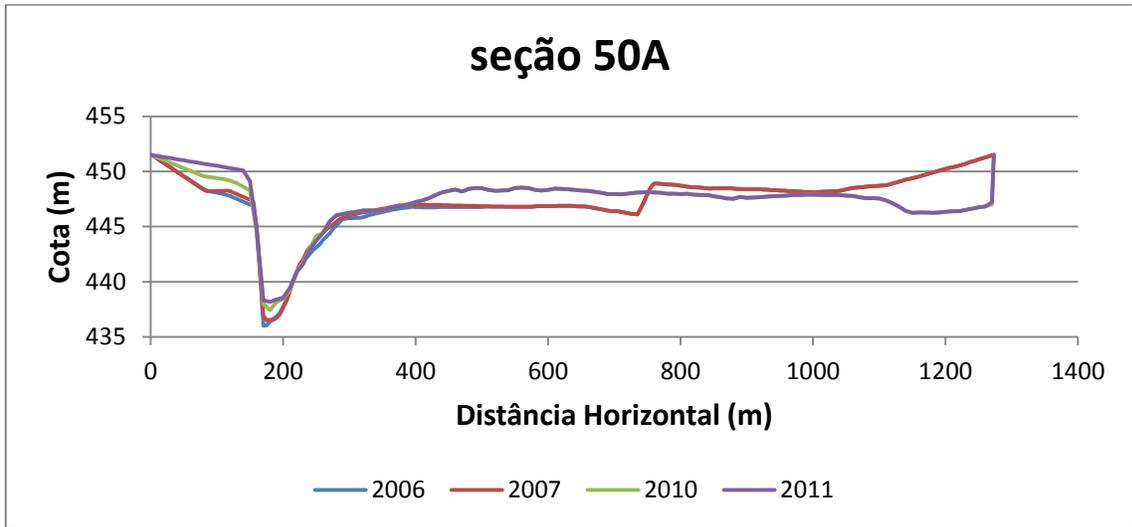
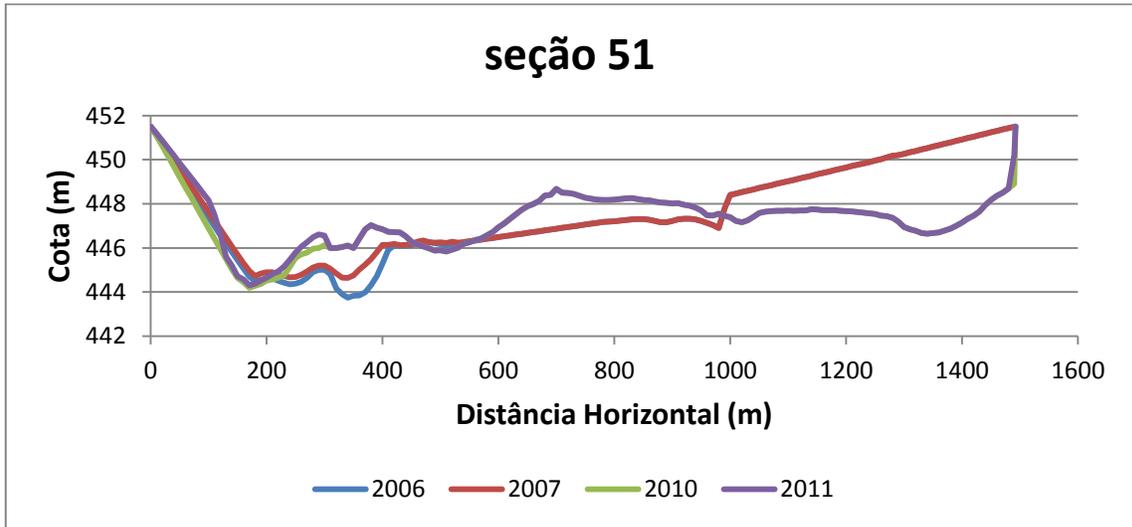
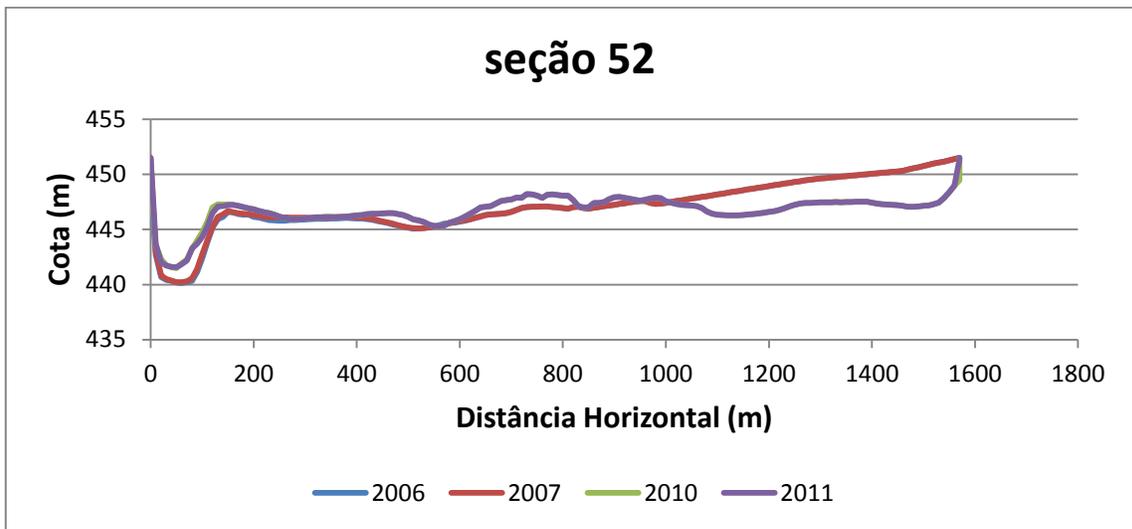


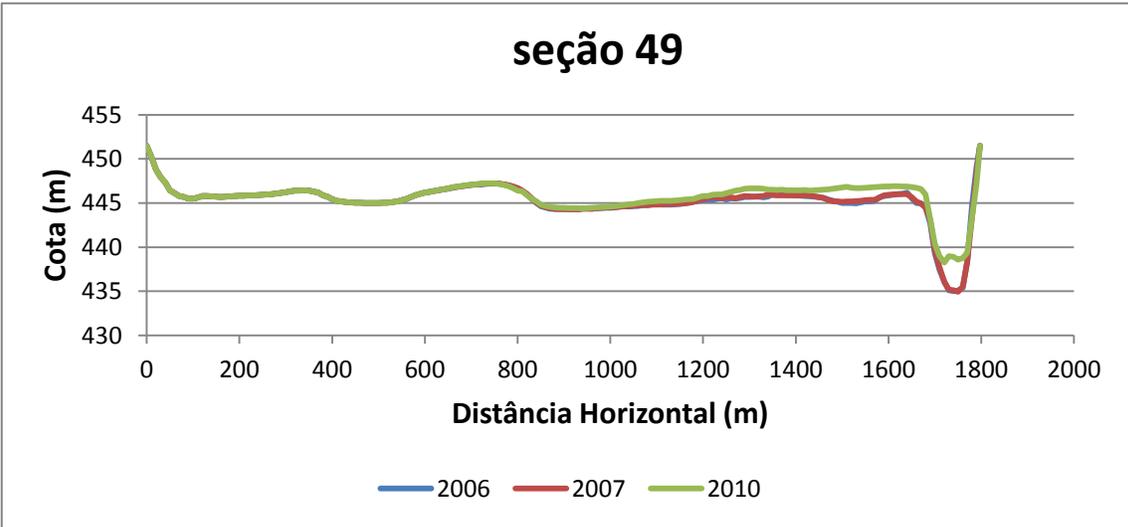
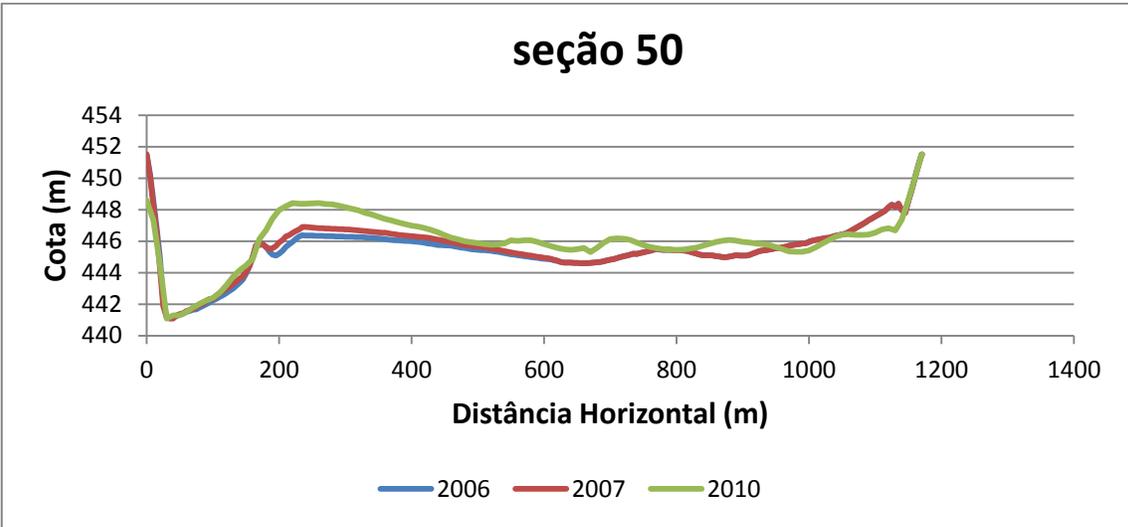












## **ANEXO III – Comunicado “Alteração de Calado” (EPN-TORQUE, 2012)**

**ASSUNTO: ALTERAÇÃO DE CALADO**

SOLICITAMOS INFORMAR VIA AVISO AOS NAVEGANTES, QUE DEVIDO AS CONDIÇÕES HIDROLÓGICAS, O ASSOREAMENTO NO RESERVATÓRIO DE BARRA BOHITA, E INFORMAÇÕES PRESTADAS PELO OPERADOR NACIONAL DE SISTEMA (ONS), OS CALADOS MÁXIMOS PERMITIDOS PARA A NAVEGAÇÃO NA HIDROVIA TIETÊ - PARANÁ, NO TRECHO ADMINISTRADO PELO DEPARTAMENTO HIDROVIÁRIO, A PARTIR DE 00:00 HORA, DO DIA 24/10/2012, SERÃO OS SEGUINTE:

**1 - TRECHO DA FOZ DO RIO SÃO JOSÉ DOS DOURADOS ATÉ PEDERHEIRAS: CALADO DE 2,80 M;**

**2 - TRECHO A PARTIR DE PEDERHEIRAS, NO RIO TIETÊ, ATÉ A FOZ DO RIO PIRACICABA E RIO PIRACICABA: CALADO DE 2,70 M; E**

**3 - TRECHO DA FOZ DO RIO PIRACICABA, AO LONGO DO RIO TIETÊ, ATÉ AIHEMBI-SP:**

**3.1 CALADO DE 0,60 M PARA COMBOIOS DUPLO TIETÊ**

**3.2 A NAVEGAÇÃO NO TRECHO COMPREENDIDO ENTRE OS KM 75 A 81 ESTÁ RESTRITO, CONFORME OS REQUISITOS TÉCNICOS A SEGUIR:**

1. Só poderão navegar nesse trecho embarcações inseridas num retângulo de 79m de comprimento e 11m de boca (comboio com 1 chata e 1 empurrador) ou qualquer embarcação que possa ser inserida no retângulo.

2. O calado praticável no dia, será calculado pela expressão:

$$C = L - 445,60 - 0,30$$

Onde: C - o calado do dia (m)

L - leitura da régua do Terminal da Torque (m)

445,60 - cota do ponto alto no canal emergencial (m)

0,30 - pé de piloto (m).

3. Estão proibidos os cruzamentos entre comboios no trecho.

4. A navegação no trecho está restrita ao período diurno (6:00 h às 18:00 h).

5. O tráfego só será permitido para embarcações dotadas de sistema eletrônico de navegação, exceção feita a embarcações menores, notadamente, as dragas de areia que frequentam o trecho com baixo calado e as embarcações de manutenção do balizamento do Departamento Hidroviário.

6. Como o trecho emergencial não será balizado, o desenho do contorno para introdução na carta eletrônica pode ser obtido no site da Secretaria de Logística e Transporte do Governo do Estado de São Paulo, na página da hidrovia tietê-paraná, no link:

<http://www.transportes.sp.gov.br/programas-projetos/hidrovia-tiete.asp>.

7. A bóia 73-A será retirada, provisoriamente, para facilitar a navegação no canal emergencial.

8. Os desmembramentos, composição e amarrações do comboio, fora do trecho em questão, deverão seguir os procedimentos constantes nas Normas de Tráfego da Hidrovia Tietê-Paraná e seus Canais.