

# **UHE SANTO ANTÔNIO**



## **MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO SEDIMENTOLÓGICO DO RIO MADEIRA E DO FUTURO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTONIO**

**RELATÓRIO DE ANDAMENTO – RA 05**

**PJ0696-Z-H41-GR-RL-103-0A**

JUNHO/2009

## UHE SANTO ANTÔNIO

# MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO SEDIMENTOLÓGICO DO RIO MADEIRA E DO FUTURO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTONIO

RELATÓRIO DE ANDAMENTO – RA 05

**PJ0696-Z-H41-GR-RL-103-0A**

**JUNHO/2009**

0	23/06/2009	EMISSÃO INICIAL	MAS/FBM	EFM	JCS
REV.	DATA	DESCRIÇÃO	ELAB.	VISTO	APROV.

## ÍNDICE

<i>Item</i>	<i>Assunto</i>	<i>Página</i>
1.	<b>INTRODUÇÃO</b>	02
2.	<b>ANDAMENTO DOS SERVIÇOS</b>	05
2.1.	<b>MODELO UNIDIMENSIONAL NO TRECHO DO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO</b>	06
2.2.	<b>MODELO UNIDIMENSIONAL NO TRECHO DE JUSANTE</b>	06
2.3.	<b>MODELO BIDIMENSIONAL NO TRECHO JUNTO À BARRAGEM</b>	13

## 1. INTRODUÇÃO

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

Conforme citado no Programa de Levantamentos e Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio, parte integrante do Projeto Básico Ambiental, a ampliação da base de dados hidrossedimentológicos obtida com a continuidade das campanhas hidrométricas realizadas após o EVTE e o EIA, determina uma revisão ampla dos Estudos Hidrossedimentológicos então realizados. Esta revisão se aplica fundamentalmente sobre a determinação e estabelecimento da curva de descarga líquida e curva de descarga sólida, além da distribuição granulométrica dos sedimentos nas principais estações fluviométricas do trecho em estudo.

Dessa forma, a nova análise deverá conter, entre outros:

- Modelagem matemática uni-dimensional do transporte de sedimentos do rio Madeira em condições atuais e com reservatório através da aplicação do modelo HEC-6, incluindo o trecho a jusante do aproveitamento, avaliando a evolução temporal das condições de assoreamento do reservatório e de erosão a jusante;
- Modelagem matemática bi-dimensional do transporte de sedimento do rio Madeira que deverá se restringir às regiões próximas ao barramento da UHE Santo Antônio (5 km a montante e 9 km a jusante), onde as maiores profundidades e o alargamento proporcionado pela barragem, a montante, e os efeitos das estruturas de descargas, a jusante, têm influências significativas sobre o comportamento sedimentológico.

Esses estudos, propostos no relatório Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico do Rio Madeira e dos Futuros Reservatórios, de janeiro de 2008, têm por objetivos:

- Aprofundar o conhecimento sobre o comportamento sedimentológico do rio Madeira nas condições atuais, anteriores à construção do aproveitamento de Santo Antônio, considerando todas as informações disponíveis até o presente;
- Prognosticar a evolução do comportamento do rio Madeira ao longo de todo o estirão afetado pela implantação do reservatório, ampliando a base de dados disponível e empregando as melhores técnicas de modelagem existentes e compatíveis com essa base;
- Detalhar o prognóstico do comportamento hidrossedimentológico das porções do reservatório próximas à barragem da UHE Santo Antônio, com auxílio de modelos bidimensionais;
- Deixar implantada ferramenta de análise sedimentológica (modelo unidimensional) que permita o acompanhamento dos processos prognosticados, após a entrada em operação do aproveitamento.

Em julho de 2008, foi emitido o Relatório de Andamento – RA 1 - PJ0696-B-R00-ZZ-RL-001-0, com a descrição dos serviços de modelagem matemática do comportamento sedimentológico do rio Madeira e do futuro reservatório da UHE Santo Antônio realizados até então. Considerando que o Contrato de Prestação de Serviços para a realização desses trabalhos foi celebrado entre Santo Antônio Energia S.A. – SAESA e PCE – Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda, em 15 de janeiro de 2009 e teve o início

***Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio***

---

efetivo dos trabalhos em 15 de fevereiro, o relatório RA 02, de março de 2009, apresentou o andamento dos serviços realizados no período de julho de 2008 a 15 de março de 2009, o relatório RA 03, de abril de 2009, os serviços realizados no período de 16 de março a 15 de abril de 2009 e o RA 04, de 16 de abril a 15 de maio de 2009.

Este relatório apresenta os serviços realizados no período de 16 de maio a 15 de junho de 2009.

## **2. ANDAMENTO DOS SERVIÇOS**

## **2.1 MODELO UNIDIMENSIONAL NO TRECHO DO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO**

A implantação final do modelo de montante está em andamento em duas frentes, uma para o trecho do reservatório e uma para o trecho a montante da barragem da UHE Jirau, além de uma terceira frente, relativa ao trecho a jusante da barragem de Santo Antônio, objeto do item 2.2.

### **Modelo de Montante da barragem da UHE Jirau**

A implementação definitiva do modelo para o trecho a montante de Jirau foi concluída com a implantação das seções topobatimétricas disponíveis entre a Ilha do Padre e a Cachoeira de Jirau, cobrindo assim o novo trecho que surgiu com o deslocamento da barragem de Jirau. Foi concluída também uma calibração preliminar do modelo hidráulico desse trecho, mas os parâmetros de rugosidade ficaram diferentes dos valores esperados em função da granulometria do material de fundo. Antes de passar à implantação do modelo de transporte de sedimento, está sendo feita uma revisão das seções topobatimétricas disponíveis e dos perfis simulados, visando melhor definir os controles localizados e, assim, obter coeficientes de rugosidade mais realistas.

### **Modelo do Reservatório de Santo Antonio**

A modelagem definitiva desse trecho ainda depende do levantamento de diversas seções topobatimétricas, atividade que se encontra ainda em andamento. O modelo disponível da fase anterior dos estudos apresentava algumas deficiências em reproduzir os níveis d'água nas imediações da foz do Jaci Paraná e em algumas passagens de corredeiras. As novas seções que estão sendo levantadas proporcionarão condições para que o modelo reproduza essas passagens de forma mais convincente.

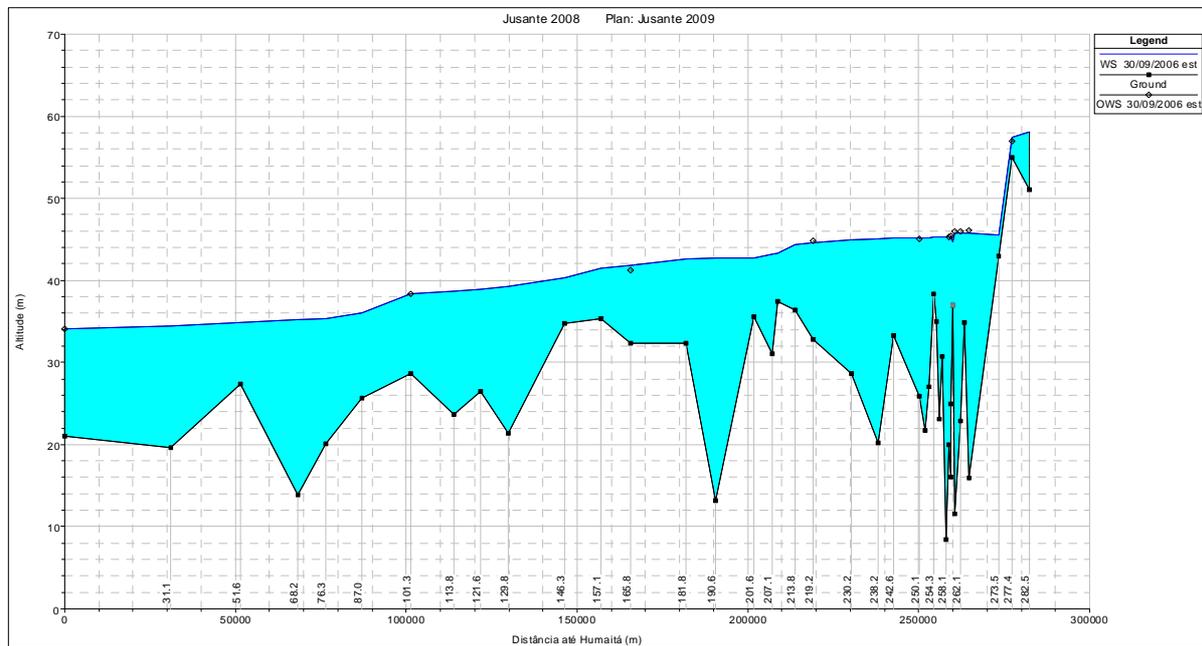
## **2.2. MODELO UNIDIMENSIONAL NO TRECHO DE JUSANTE**

Modelo Hidráulico de Jusante – Com a conclusão do levantamento topobatimétrico de duas seções situadas nas proximidades de Humaitá (seções 31.1 e 51.6) e das seções do trecho entre a barragem e Porto Velho (seções 242.6, 251.9, 253.0, 255.1, 256.0 e 257.0), foi possível concluir a calibração do modelo hidráulico de jusante. Os resultados obtidos foram muito satisfatórios, com o modelo, implantado entre Humaitá e montante Salto Teotônio tendo fornecido níveis d'água simulados muito próximos aos observados, para uma vasta gama de vazões.

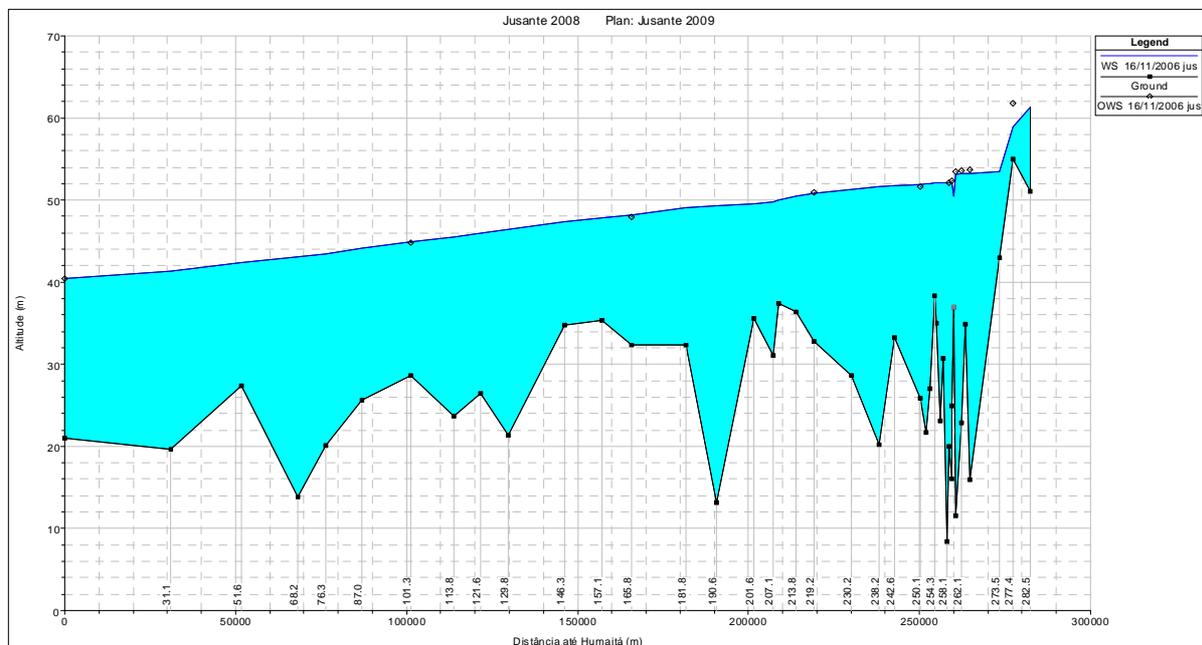
As Figuras apresentadas a seguir ilustram a qualidade da calibração do modelo hidráulico nesse trecho, considerando quatro situações hidrológicas.

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

**Figura 2.1.  
Perfil de Estiagem (30-09-2006) – Q = 3.454 m³/s**



**Figura 2.2.  
Perfil de Enchente (16-11-2006) – Q = 15.557 m³/s**



Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio

Figura 2.3.  
Perfil de Cheia (28-03-2005) – Q = 29.008 m³/s

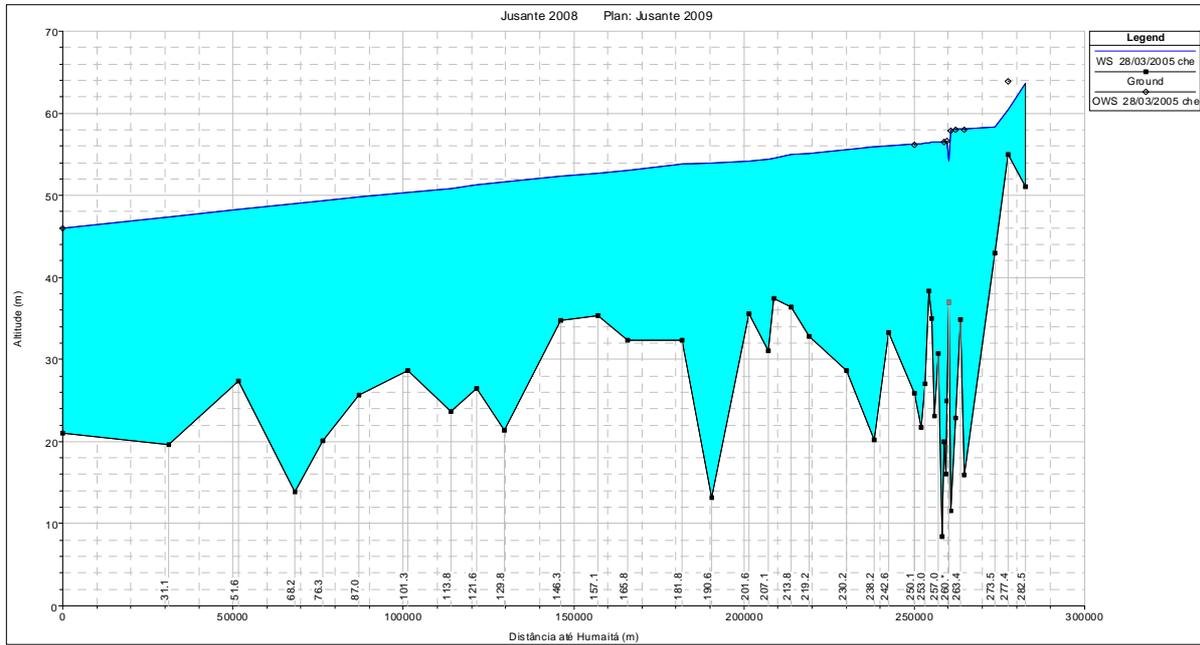
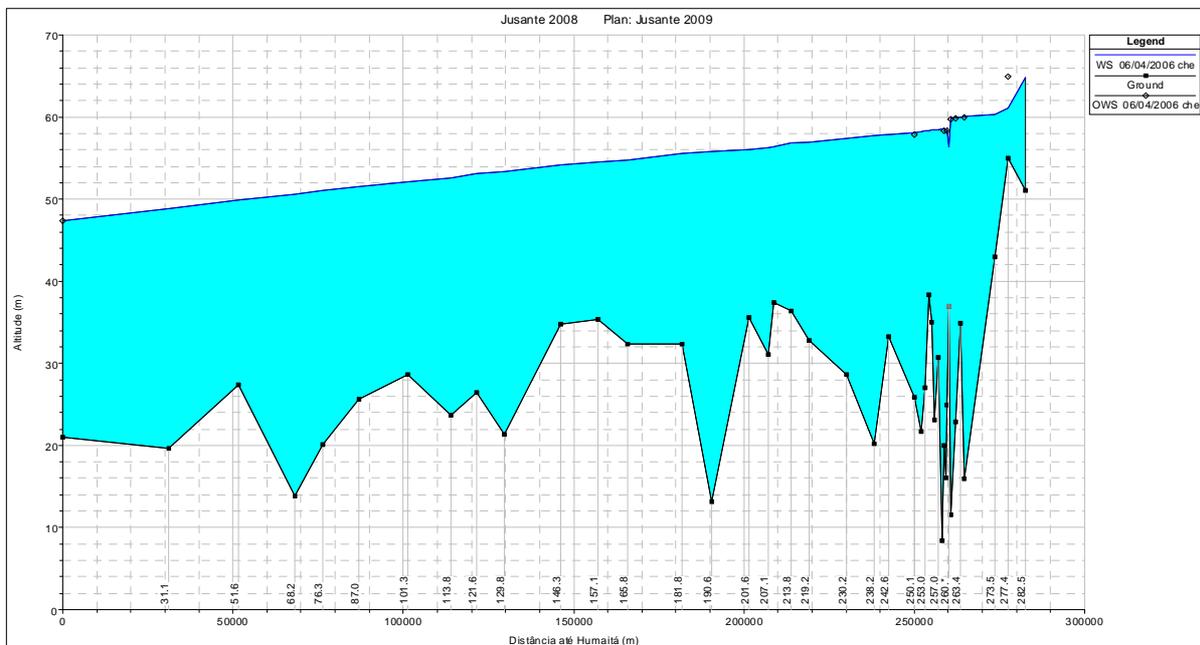


Figura 2.4.  
Perfil de Cheia (6-04-2006) – Q = 36.838 m³/s



**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

Observa-se que o ponto observado a montante não foi bem ajustado. Este ponto localiza-se a montante do Salto Teotônio, num trecho onde não estão disponíveis todas as seções topobatimétricas, já que os serviços de campo ainda estão em andamento. A calibração desse trecho, na verdade já dentro do futuro reservatório, será retomada durante o estudo do modelo do trecho intermediário.

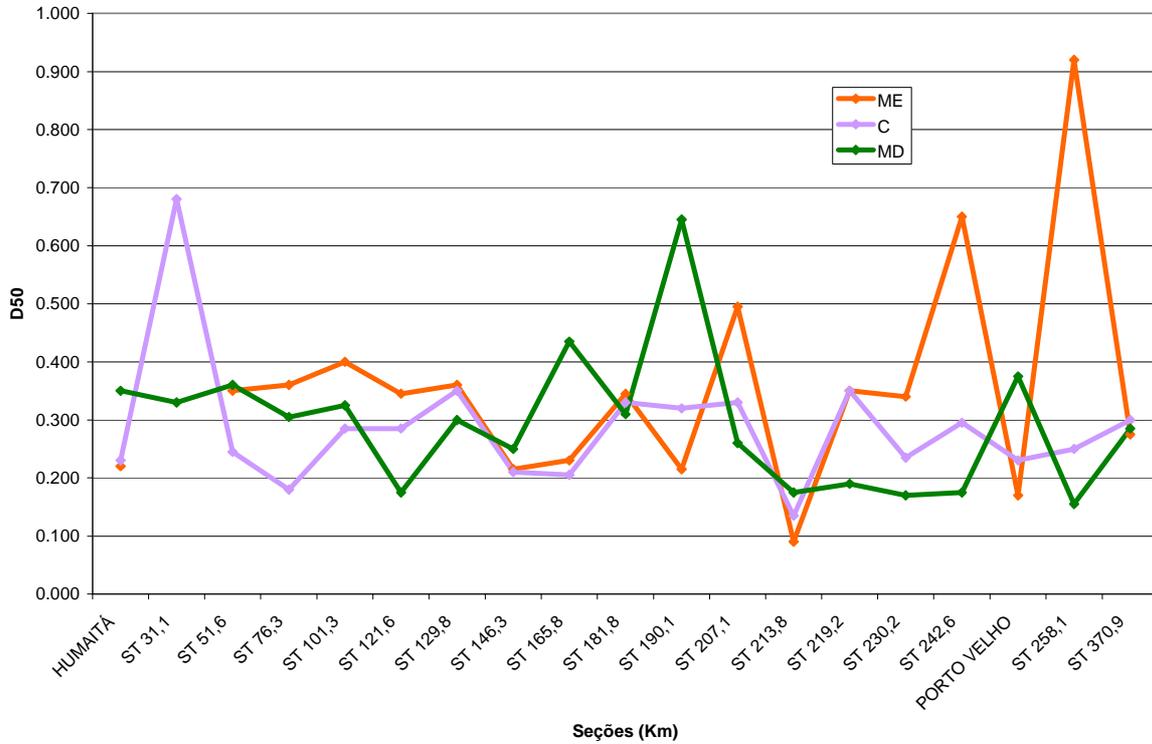
O trabalho foi desenvolvido no modelo HEC-RAS – versão 4.0, que permite a simulação da evolução do leito do rio devido ao processo sedimentológico. Após a conclusão da calibração do modelo hidráulico, o modelo de transporte de sedimento foi implementado para todo o estirão de jusante, tendo sido feitas as primeiras rodadas para avaliação de resultados.

Pretende-se ainda utilizar na modelagem unidimensional os dados da batimetria de apoio ao modelo bidimensional realizada a jusante da cachoeira de Santo Antonio. Estes dados, já levantados, estão em processamento final e deles podem ser obtidas novas seções a serem empregadas, caso necessário, no aprimoramento do modelo no trecho mais próximo à obra.

Modelo Sedimentológico de Jusante – Concluída a calibração do modelo hidráulico de jusante, foi iniciada a implantação do modelo sedimentológico correspondente, continuando o trabalho com o modelo HEC-RAS, versão 4.0. As primeiras providências foram analisar os dados sedimentológicos disponíveis para definir parâmetros de entrada para o modelo, tais como granulometria de material de fundo (variável ao longo do trecho e também em função da vazão em trânsito) curvas-chave de sedimento (para diferentes cenários hidrológicos), etc.

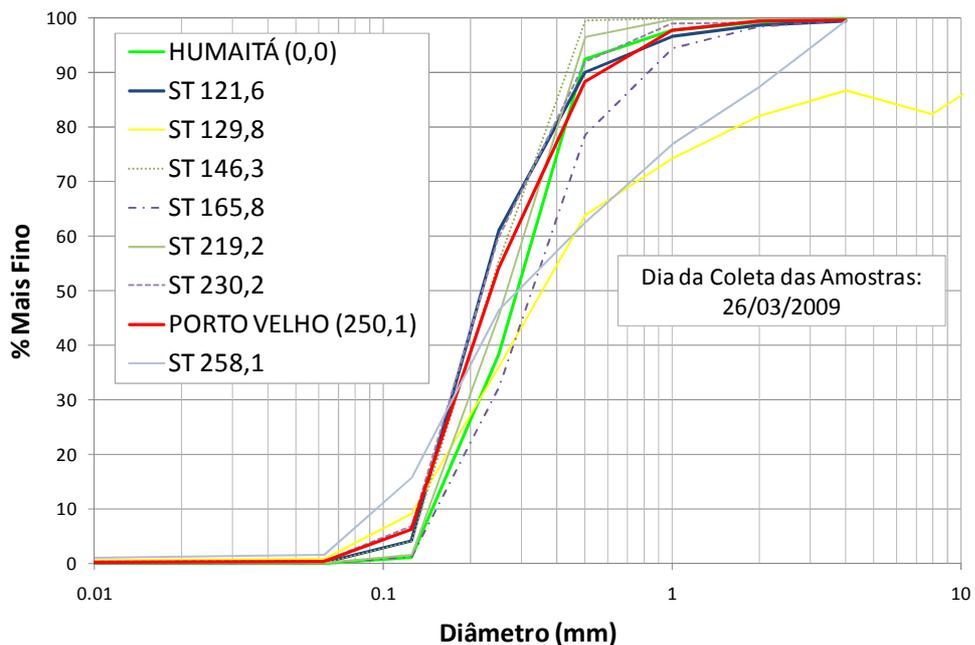
A Figura 2.5. mostra uma análise inicial da evolução da granulometria do material de fundo do rio Madeira desde o Salto Teotônio até Humaitá. Em cada seção, a coleta de material se deu em três verticais, localizadas, sempre que possível, a distâncias da margem correspondentes a 25%, 50% e 75% da largura. Esta mesma análise está sendo feita para outras frações granulométricas, buscando identificar algum padrão que possa ser adotado na modelagem.

**Figura 2.5.**  
**Evolução do Diâmetro D50% nas Amostras de Fundo do rio Madeira de Teotônio até Humaitá**



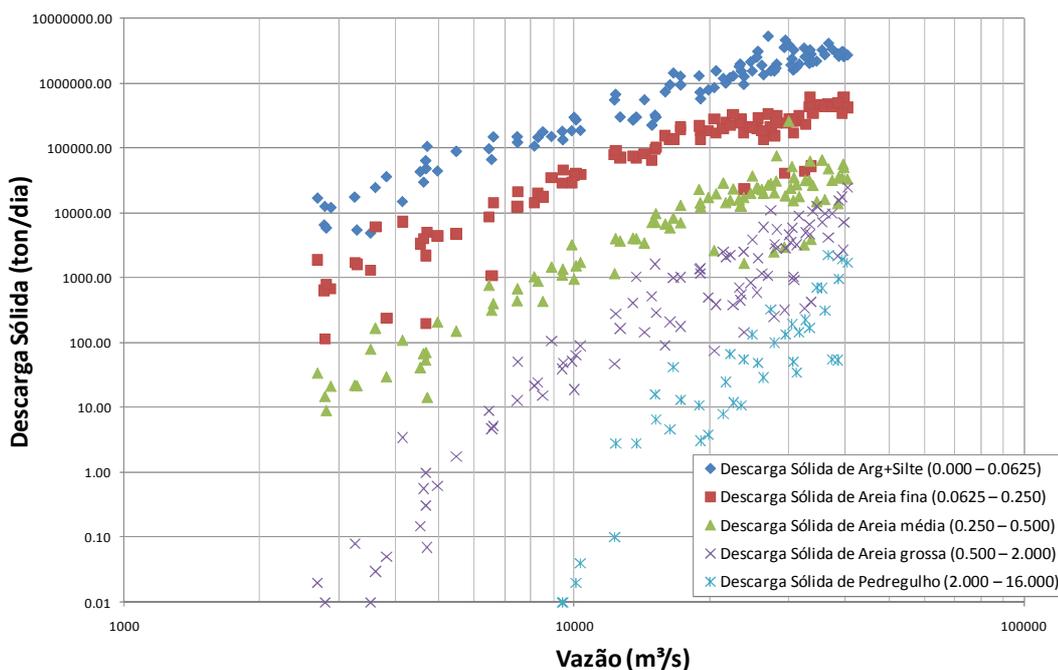
As curvas granulométricas médias de algumas seções nesse estirão são ilustradas na Figura a seguir.

**Figura 2.6.**  
**Curvas Granulométrica para Diversas Seções no Trecho entre Salto Teotônio e Humaitá**



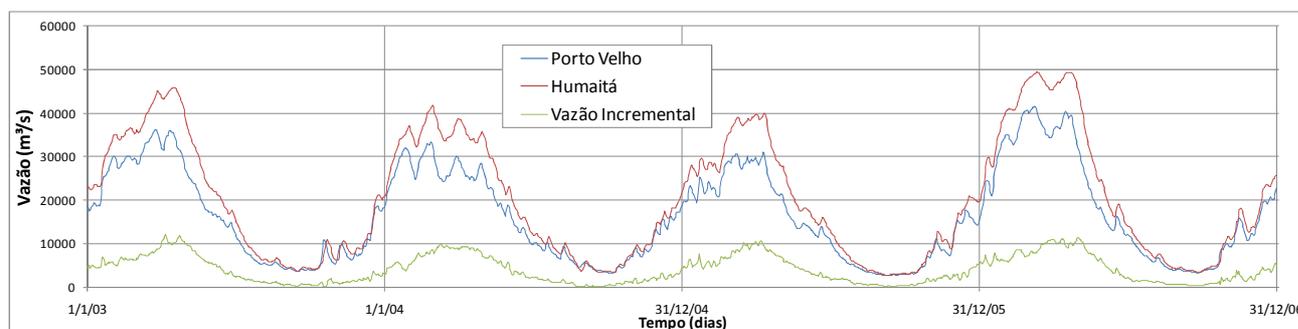
Tomando por base as medições de descarga sólida em Porto Velho, foi realizada uma análise buscando classificar a descarga por faixa granulométrica e por faixa de vazão média. A Figura 2.7. mostra a base empregada para essa análise. O objetivo é a definição de condições de contorno para o modelo unidimensional.

**Figura 2.7.**  
**Análise Granulométrica do Histórico das Medições de Descarga Sólida**  
**Período de Novembro/2003 a Janeiro/2007**

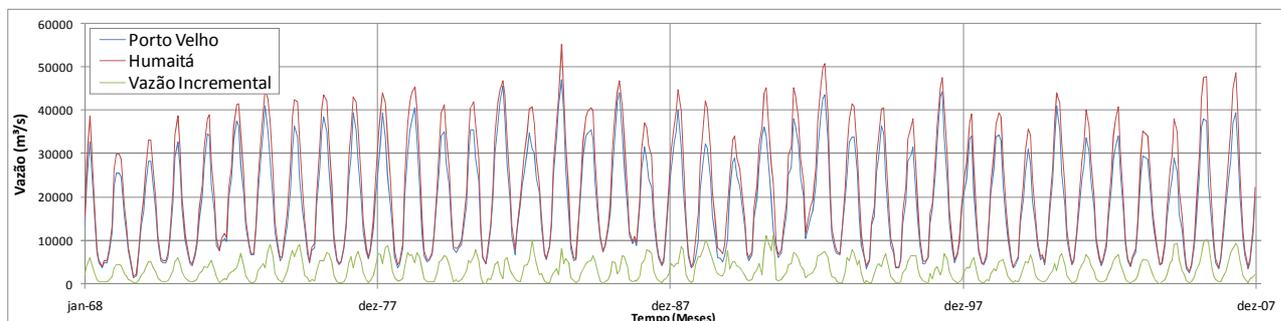


O modelo foi implantado a jusante de Teotônio e permitiu a realização de diversas análises iniciais. Foram feitas simulações da evolução do transporte de sedimento no trecho de jusante considerando vazões diárias (de 2004 a 2006) e vazões mensais (desde 1967). As duas figuras a seguir ilustram as séries de vazões empregadas nessa primeira modelagem.

**Figura 2.8.**  
**Série de Vazões Diárias para o Período de Calibração/Verificação do Modelo**  
**(01/01/2003 a 31/12/2006)**



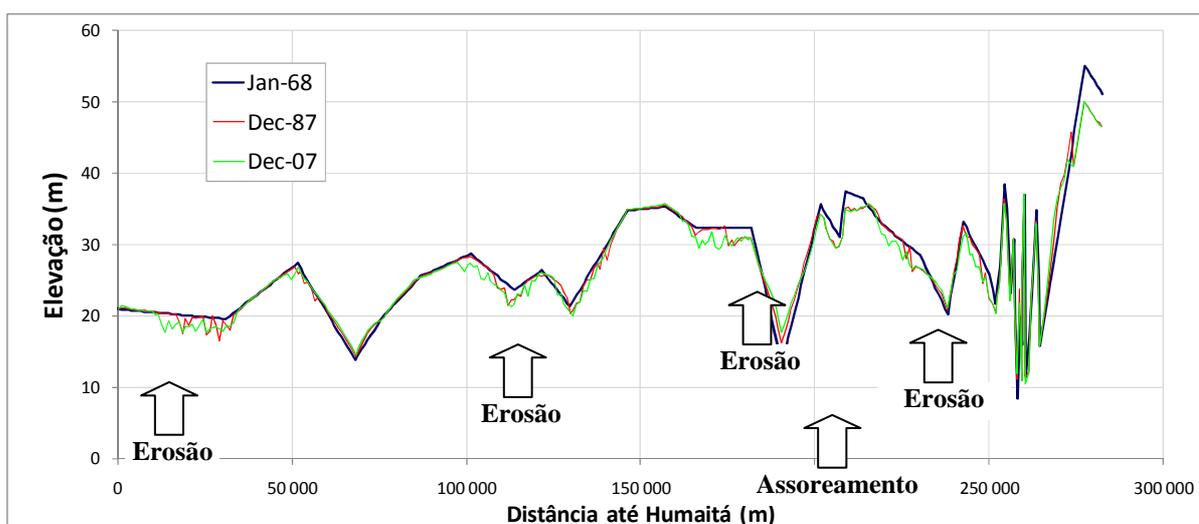
**Figura 2.9.**  
**Vazões Médias Mensais Consideradas Para o Período de Simulação do Modelo  
(entre Jan/1968 a Dez/2007)**



Os primeiros resultados obtidos da modelagem sedimentológica de jusante devem ser considerados preliminares porque algumas condições de contorno ainda não estão completamente definidas. Para essa fase, foram feitas hipóteses de trabalho que deverão ser confirmadas (ou não) pela análise dos dados de campo.

Na figura abaixo, são apresentados os perfis do fundo para todo o estirão modelado, definidos para três datas distintas: perfil inicial (considerado no início da simulação), perfil após 20 anos e após 40 anos do início da simulação com vazões médias mensais. Nota-se que, mesmo em condições naturais, ainda sem considerar a implementação dos aproveitamentos de montante, o modelo está indicando uma leve tendência de erosão em diversos pontos no trecho modelado. Este resultado, naturalmente, deverá ser confirmado, sendo parte do processo de calibração do modelo.

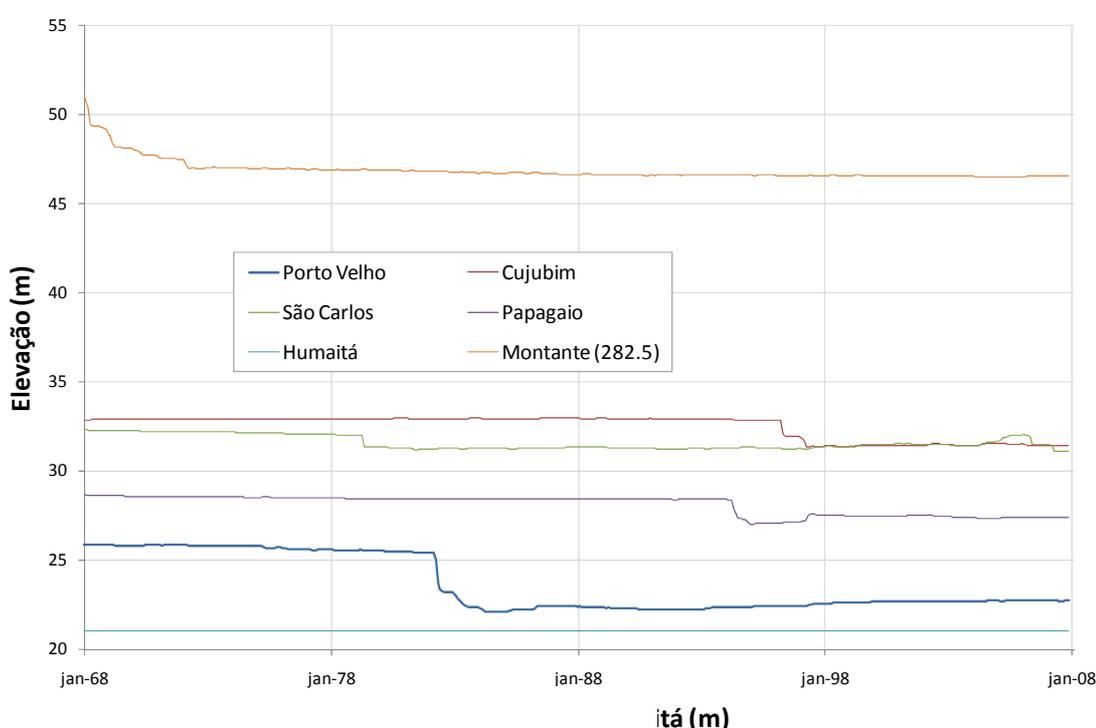
**Figura 2.10.**  
**Resultados da Simulação do Transporte de Sedimento (Variação do Leito) para o  
Trecho de Montante Comparação entre o Perfil Inicial e Outros Dois Momentos  
(após 20 e 40 anos)**



A simulação com vazões diárias é ilustrada na próxima figura, onde são mostradas as variações do fundo de 6 seções de interesse. Não ocorreu nenhuma variação na seção de Humaitá, que foi considerada de fundo fixo para esta simulação.

Nota-se que, as seções de Montante e junto a estação de Porto Velho foram as que apresentaram as maiores taxas de erosão (cerca de 3 metros), o que ainda assim é relativamente pouco comparado com a imprecisão intrínseca ao processo de modelagem e com as dimensões físicas da própria seção.

**Figura 2.11.  
Variação Cronológica da Cota de Fundo de Determinadas Seções Transversais  
de Interesse no Trecho Simulado Para todo o Período Simulado  
(Jan/67 a Dez/07)**



Os assuntos que deverão ser aprofundados na seqüência dos trabalhos são:

- Transferir os dados do modelo HEC-RAS para outros modelos unidimensionais, como, por exemplo, o modelo HEC-6T, para o mesmo trecho e comparar os resultados de diferentes modelos.
- Extrapolar a curva de descarga sólida de sedimento considerada como condição de contorno de montante (aporte de sedimento a montante).
- Continuar a investigação e análise de sensibilidade referente aos métodos (equações) de cálculo de transporte de sedimento.
- Investigar a sensibilidade do modelo no que se refere à granulometria definida para o material do leito.
- Investigar a sensibilidade do modelo no que se refere às vazões modeladas (mensais x diárias) para simulações de longo-termo.

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

- Identificar outros fatores e parâmetros possíveis de serem considerados na calibração do modelo de leito móvel.
- Propor nova configuração de escoamento, melhorando a representatividade, tanto no que se refere à descarga líquida como sólida, do rio Jiparaná (Machado), visto que este representa cerca de 60% da área incremental entre Humaitá e Porto Velho.

Espera-se também obter melhores resultados quando for possível representar em um modelo único o estirão completo do rio Madeira desde Jirau (em um primeiro momento) até Humaitá. Futuramente o estirão deverá ser Montante Vila Abunã → Humaitá.

### **2.3. MODELO BIDIMENSIONAL NO TRECHO JUNTO À BARRAGEM**

#### Seleção e Aquisição dos Modelos

Esta atividade encontra-se concluída. O resultado da análise dos modelos é sintetizado a seguir.

A Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico do Rio Madeira e dos Futuros Reservatórios tem os seguintes objetivos gerais:

- Aprofundar o conhecimento sobre o comportamento sedimentológico do rio Madeira nas condições atuais, anteriores à construção dos aproveitamentos de Santo Antônio e Jirau, considerando todas as informações disponíveis até o presente;
- Prognosticar a evolução do comportamento do rio Madeira ao longo de todo o estirão afetado pela implantação dos reservatórios mencionados, ampliando a base de dados disponível e empregando as melhores técnicas de modelagem existentes e compatíveis com essa base;
- Detalhar o prognóstico do comportamento hidrossedimentológico das porções do reservatório próximas à barragem da AHE Santo Antônio, com auxílio de modelos bidimensionais;
- Deixar implantada ferramentas de análise sedimentológica (modelos unidimensional e bidimensional) que permitam o acompanhamento dos processos prognosticados, após a entrada em operação dos aproveitamentos.

Nesse contexto, a modelagem sedimentológica bi-dimensional tem como objetivo, no presente momento dos estudos, complementar as avaliações de impactos decorrentes da implantação dos reservatórios das usinas de Santo Antonio e Jirau sobre o regime sedimentológico do rio Madeira, baseadas, até o presente, em modelagem unidimensional apenas.

A modelagem unidimensional permite avaliar a evolução cronológica do montante de sedimento acumulado nos reservatórios e sua distribuição aproximada ao longo do leito natural. Permite também avaliar a evolução cronológica do perfil do leito do rio, a

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

montante e a jusante das barragens, fornecendo indicações de trechos potencialmente sujeitos a processos de assoreamento ou de erosão.

Parece consensual que a modelagem unidimensional proporciona uma avaliação adequada da evolução a longo prazo do processo de assoreamento nos reservatórios e conseqüente erosão a jusante das barragens.

A abordagem unidimensional é aplicável aos reservatórios do rio Madeira devido à sua geometria alongada, onde os processos longitudinais predominam amplamente sobre os processos transversais (horizontais ou verticais). Entretanto, nas regiões próximas aos barramentos, alguns processos transversais ao curso d'água principal não podem ser negligenciados, seja pelo aumento da largura e da profundidade do escoamento, seja pela concentração de escoamento pelas estruturas de descarga (geração ou vertimentos), situações que não são adequadamente representadas em um modelo unidimensional de escoamento ou de transporte de sedimento.

A simples identificação de zonas de concentração de velocidades e de zonas mortas, associadas a uma maior ou menor capacidade de transporte de sedimento, pode auxiliar a melhor compreensão dos possíveis impactos da implantação dos reservatórios sobre a morfologia atual do rio Madeira na proximidade das barragens, mesmo que não seja possível realizar uma quantificação adequada dos volumes de sedimentos transportados. Assim, um bom modelo de escoamento bidimensional já pode acrescentar informações importantes ao quadro fornecido pela modelagem unidimensional.

Durante o licenciamento ambiental das usinas de Santo Antonio e Jirau foram levantadas algumas questões relacionadas ao comportamento sedimentológico do rio Madeira após a implantação dos reservatórios que não poderiam ser solucionadas através da modelagem unidimensional adotada até então. Os pontos mais importantes levantados foram:

- 1 – Qual é a distribuição de sedimentos esperadas nas proximidades da barragem, levando em consideração a forma de operar a usina, com vazões turbinadas durante dois terços do tempo e com vertimentos apenas nos meses de cheia, em média da mesma ordem das vazões turbinadas?
- 2 – Do sedimento que alcança a barragem, qual é a fração que pode ser transportada para jusante através das turbinas e através do vertedouro?
- 3 – É possível promover ações operativas (purga) que aumentem a quantidade de sedimento restituída pelas turbinas ou pelo vertedouro jusante, visando minimizar possíveis impactos a jusante?
- 4 – O aumento da concentração de sedimento nas vazões resultantes dessas operações de “purga” poderia trazer impactos adicionais a jusante?
- 5 – Considerando a retenção de sedimentos no reservatório e a restituição de vazões através de fluxos concentrados e assimétricos nas casas de força e nos vertedouros, quais seriam os padrões de erosão imediatamente a jusante da barragem de Santo Antonio, até Porto Velho?

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

O emprego de modelos bidimensionais foi a solução encontrada para a análise das questões acima, mesmo sabendo que algumas delas (como 2, 3 e 4) somente poderiam ser tratadas através de modelos 3-D. Nesse caso, espera-se que o modelo hidráulico reduzido seja capaz de fornecer algumas respostas ou orientações.

Diante do quadro descrito acima, foram iniciadas análises visando definir o modelo (ou modelos) mais adequado para solucionar as questões levantadas no licenciamento ambiental. Uma primeira lista de modelos candidatos inclui os seguintes:

- SSIIM - Sediment Simulation In Intakes with Multiblock Option, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Faculdade de Engenharia, Ciência e Tecnologia da NTNU - Norwegian University of Science and Technology. Este modelo resolve as equações de Navier-Stokes empregando o método dos volumes de controle com o algoritmo SIMPLE e o modelo de turbulência k-epsilon. Soluciona também a equação de difusão-convecção para transporte de sedimento, utilizando a fórmula de Van Rijn para o contorno do leito. O modelo inclui ainda um módulo de qualidade da água.
- GEMSS - Generalized Environmental Modeling System for Surface Waters, desenvolvido a partir das pesquisas que deram origem ao conhecido modelo bidimensional de qualidade da água CE-QUAL-W2 e baseado no algoritmo tridimensional do modelo GLLVHT, atualmente mantido e distribuído pela ERM, empresa multinacional de consultoria em meio ambiente. O modelo possui módulos para simulação de qualidade da água e de transporte de sedimento.
- MIKE 21C - River Hydraulics and Morphology, modelo bidimensional de hidráulica e morfologia fluvial desenvolvido e distribuído pelo DHI-Software, que permite simular alterações na forma do leito do rio e das margens, ocasionadas por mudanças de regime fluvial ou pela introdução de estruturas ao longo do curso d'água. O modelo simula o transporte de sedimentos para qualquer fração granulométrica, desde materiais finos e coesivos até cascalho, empregando diversas fórmulas de transporte.
- SMS - Surface Water Modeling System, modelo matemático bidimensional, integrado na vertical, desenvolvido pelo Brigham Young University - Environmental Modeling Research Laboratory. Esta interface inclui o modelo hidrodinâmico RMA-2 e o modelo de transporte de sedimentos SED2D, além dos programas de pré e pós-processamento. Permite simular alterações na forma do leito do rio e das margens, ocasionadas por mudanças de regime fluvial ou pela introdução de estruturas ao longo do curso d'água. O modelo simula o transporte de sedimentos para qualquer fração granulométrica, desde materiais finos até cascalho, empregando diversas fórmulas de transporte. A interfase do SMS também inclui o modelo FESWMS/FST2DH, que aplica o método dos elementos finitos para resolver as equações bidimensionais de escoamento e transporte de sedimentos não coesivos por águas superficiais. Apresenta como vantagem em relação ao modelo anterior o fato de tratar água e sedimento de uma forma acoplada.
- CCHE2D - Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model For Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed, desenvolvido pelo Center for Computational Hydroscience of Engineering, The University of Mississippi. Este modelo é similar aos dois modelos descritos anteriormente, mas permite uma

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

simulação do efeito secundário do escoamento sobre o transporte de fundo em trechos curvos, com base em abordagem analítica, o que pode proporcionar algum avanço nas análises. O modelo é de distribuição gratuita.

- RIVER2D – Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat, desenvolvido pela Universidade de Alberta, Canadá para solução das equações de escoamento superficial em duas dimensões através do método dos elementos finitos. Trata-se de um modelo de escoamento apenas, mas é de uso bastante simples e de distribuição gratuita.
- MOHID – Three Dimensional Water Modeling System, desenvolvido pelo Marine and Environmental Technology Research Center – MARETEC, do Instituto Superior Técnico de Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa, /e um modelo hidráulico a três dimensões que possui um módulo de transporte de sedimentos em suspensão que permite um balanço erosão/assoreamento baseado em mecanismos de re-suspensão. Não considera o transporte de fundo, mas permite quantificar a produção de sedimentos no entorno do corpo hídrico simulado. É um modelo de distribuição gratuita.

Foi feita uma avaliação da potencialidade dos modelos listados com relação aos objetivos do trabalho, ou seja, com relação à sua capacidade de responder ao conjunto de perguntas apresentado anteriormente. Dessa análise foram excluídos os modelos GEMSS (atualmente de uso restrito a uma empresa de consultoria) e MIKE 21-C (custos elevados e aquisição de consultoria associada).

O Quadro apresentado a seguir resume as conclusões da análise dos modelos restantes.

	SSIIM	SMS SED2D	SMS FST2DH	CCHE2D	RIVER2D	MOHID
1 – Distribuição de sedimentos junto à barragem	sim	sim	sim	sim	*	**
2 – Caracterização do sedimento restituído a jusante	sim	sim	sim	sim	*	**
3 – Remoção de sedimentos junto à barragem (purga)						sim
4 – Distribuição de sedimentos a jusante, depois da purga	sim	sim	sim	sim	*	
5 – Análise da erosão a jusante, até Porto Velho	sim	sim	sim	sim	*	

De uma forma geral, os modelos analisados permitem a análise de quatro das cinco questões levantadas. Os dois modelos que acompanham o pacote SMS são mais interessantes porque abordam a questão do transporte de sedimentos de uma forma semelhante à dos modelos unidimensionais já aplicados ao rio Madeira. A única questão em relação ao emprego do SMS é que o pacote, e, sua versão atual (10.0) já não oferece o modelo SED2D e nem dá mais suporte ao mesmo nas versões anteriores. Entretanto, o modelo FST2DH pode realizar as mesmas análises, com as vantagens seguintes:

- É suportado na versão atual do SMS.
- Admite escoamento supercrítico e simula a transição supercrítico-subcrítico.

**Modelagem Matemática do Comportamento Sedimentológico  
do Rio Madeira e do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio**

---

- Trata o escoamento e o transporte de sedimentos de forma acoplada, o que não ocorre com o SED2D.
- Possui diversas fórmulas para cálculo do transporte de sedimentos (Ackers-White, Engelund-Hansen, Ackers-White-Day, Laursen, Yang Sand and Gravel, Meyer-Peter e Muller, Garbrecht).
- Simula algumas estruturas hidráulicas (descarga de fundo, vertedouro, derivação lateral) que podem ser úteis na representação das condições de contorno do problema real.
- Utiliza um grande conjunto de elementos finitos curvos que podem ser combinados de forma a melhor representar os contornos do problema.

Como conclusão, o pacote SMS é a melhor opção para a modelagem bidimensional do rio Madeira nas proximidades da barragem da UHE Santo Antonio, tendo em vista a resposta às perguntas 1,2, 4 e 5 acima.

Os modelos SSIIM e CCHE2D podem funcionar de forma auxiliar, permitindo conferir resultados obtidos com emprego do SMS e também fornecer resultados paralelos para análise.

A maior dificuldade consiste na análise da remoção de sedimentos depositados junto à barragem, devido à operação da usina, que é necessária para responder à terceira questão formulada.

A abordagem bidimensional integrada na vertical não é a mais adequada para a análise da purga de sedimento junto à barragem, porque a mesma é promovida pela re-suspensão de partículas depositadas no fundo, fenômeno que demanda uma abordagem tri-dimensional ou, eventualmente bi-dimensional integrada na largura (2DV). Nesse último caso, o modelo MOHID poderia ser útil, por permitir a modelagem 2DV. O modelo CE-QUAL-W2, que é o fundamento do GEMSS, também possui essa capacidade, podendo ser empregado com facilidade (é um modelo de distribuição gratuita e de uso bem difundido).

Outra possibilidade é simular apenas os campos de velocidade na região do barramento (com qualquer um dos modelos listados) e desenvolver uma metodologia de cálculo baseada nas tensões de cisalhamento para estimar o transporte de sedimento associado a esse campo.

Além dos modelos abordados acima foi sugerido pelo consultor da NHC, Jose Vasquez, o emprego do modelo River2D-Morphology, desenvolvido pelo próprio, com base no modelo River2D. Esperamos mais detalhes desse modelo quando de sua visita em julho. Por enquanto, localizamos uma referência adicional para o River2D-MOR: River, Coastal and Estuarine Morphodynamics – Gary Parker e Marcelo García.

Outro modelo mencionado por Vasquez foi o SRH-2D, projetado para simular escoamento (versão 2), transporte de sedimentos com fundo móvel (versão 3) e temperatura e vegetação (versão 4). Foi liberada em novembro de 2008 uma última revisão da versão 2, mas a versão 3, que nos interessa, ainda não está disponível. Assim, trata-se de um

modelo similar ao River2D, podendo ser empregado como auxiliar na modelagem, mas sem aplicação específica, no momento.

Ainda foi pesquisado o modelo GSTARS 3 (Yang and Simoes, 2002), desenvolvido para similar o transporte de sedimentos coesivos e não coesivos em rios e reservatórios através do método "Generalized Stream Tube", proposto pelo prof. C. H. Yang. Este modelo foi desenvolvido originalmente no US Bureau of Reclamation, sendo hoje distribuído pela Colorado State University, sem suporte.

#### Geração Inicial da Malha do Modelo de Jusante

Foi iniciada a definição preliminar do domínio e a geração da malha de elementos finitos a ser empregada na modelagem, mas ainda sem uma definição da geometria do domínio (topobatimetria).

Os levantamentos batimétricos do trecho a jusante da barragem foram recebidos, ainda em versão preliminar, através de uma tabela de pontos cotados, materializáveis através de coordenadas. Este material permite o início da implantação da geometria do domínio a modelar, atividade que se encontra ainda em fase incipiente.

A próxima atividade a ser iniciada é a definição dos cenários a modelar.