



9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior

Manaus, 6 a 8 de Outubro de 2015

Modelagem hidrodinâmica para a avaliação da navegabilidade em um trecho da Hidrovia do rio Paraguai

Renata Correia
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Tobias Bleninger
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Henrique Guarneri
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Gustavo Pacheco Tomas
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Philippe Ratton
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Eduardo Ratton
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)

Resumo:

A representação e simulação matemática de um sistema fluvial constitui importante ferramenta no estabelecimento de condições adequadas à navegabilidade. A UFPR/ITTI, responsável pelo Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) da Hidrovia do Paraguai busca estudar a viabilidade da hidrovia no trecho brasileiro. Portanto, este trabalho objetiva a criação e aplicação de um modelo hidrodinâmico em grande escala que permita (1) realizar o acoplamento de dados topobatimétricos a um sistema de informação geográfica (SIG), principalmente em locais próximos a passagens críticas de navegabilidade, (2) identificar as variações longitudinais do escoamento, como velocidade e profundidade, (3) e definir cenários de vazões e níveis de água associados aos níveis de redução para obtenção de informações a respeito de potenciais intervenções. Dados topobatimétricos foram coletados em levantamentos de campo. Um modelo digital do terreno foi elaborado com informações de altimetria. A base geométrica do modelo hidrodinâmico foi desenvolvida em ambiente SIG. Simulações hidrodinâmicas foram efetuadas no software HEC-RAS para condições de estiagem. Condições de contorno e pontos de controle a partir de informações coletadas em campo foram utilizados para calibração e verificação. Os resultados preliminares apresentam simulações dos perfis da lâmina d'água para cenários de calibração e verificação.

1 – Introdução

No contexto dos estudos de viabilidade de vias navegáveis, a análise do sistema fluvial como um todo é uma etapa essencial para a obtenção de informações detalhadas sobre o regime de escoamento, uma vez que essas informações certificam as tomadas de decisão referentes ao gerenciamento da via, às intervenções de manutenção e a obras de engenharia que venham a ser necessárias.

A Hidrovia do rio Paraguai é um importante e vasto eixo que integra as esferas social, política e econômica. Trata-se de um modal de escoamento da produção de abrangência

regional, nacional e internacional. Em território brasileiro, percorre aproximadamente 1.272 km, compreendendo os estados do Mato Grosso (MT) e Mato Grosso do Sul (MS). Está dividida em Tramo Norte e Sul, sendo o primeiro localizado entre as cidades de Cáceres (MT) e Corumbá (MS) e o segundo entre Corumbá (MS) até a foz do rio Apa, como mostra a Figura 1.

Ao longo de toda a hidrovia ocorrem restrições à navegação devido a formação de bancos de areia, ocasionando alteração nas velocidades de escoamento, gerando padrões diferenciados de sedimentação ao longo do canal e passagens de baixas profundidades.

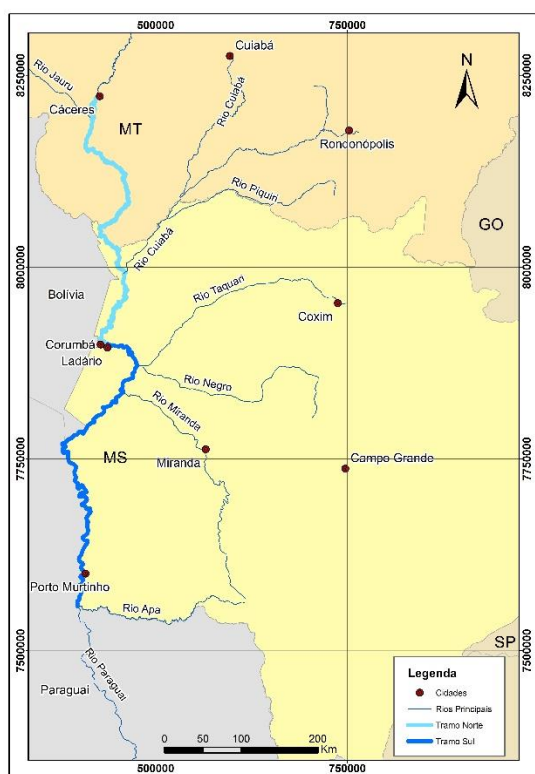


Figura 1 - Mapa de localização da Hidrovia do rio Paraguai.

Fonte: UFPR/ITTI (2015)

Sendo assim, como forma de contribuição aos objetivos da Universidade Federal do Paraná/Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (UFPR/ITTI), responsáveis pelo Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) da Hidrovia do rio Paraguai, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para a aplicação da modelagem hidrodinâmica que permita (1) acoplar dados topo-batimétricos (batimetria do canal e dados topográficos do entorno) a um SIG por todo o trecho brasileiro da hidrovia, principalmente nos locais próximos a passagens críticas de navegabilidade, (2) identificar a variação longitudinal das velocidades do escoamento e profundidade do canal, determinar perfis da lâmina d'água a níveis de estiagem (3) e simular cenários relacionados a vazões e níveis de água associados aos níveis de redução.

2 – Considerações envolvendo a modelagem

A representação e simulação matemática de um sistema fluvial constitui uma importante ferramenta na compreensão do funcionamento do ecossistema e dos processos envolvidos no escoamento, bem como no fornecimento de

subsídios para avaliar as condições de navegabilidade e adequação do canal.

Basicamente, modelos hidrodinâmicos descrevem a reação de um corpo d'água sob determinadas condições de contorno e forças atuantes.

Estudos envolvendo sistemas fluviais de grande escala envolvem uma série de singularidades. A complexidade da geometria do rio, caracterizada por estreitamentos e alargamentos, a presença de ilhas e estruturas como diques e portos, meandros, bancos de areia móveis, contribuições laterais da bacia hidrográfica bem como a escassez de dados topo-batimétricos e a inconsistência de dados fluviométricos tornam o processo de modelagem para estes sistemas um tanto criterioso.

Segundo Paz (2010), diversas abordagens têm sido empregadas no desenvolvimento da modelagem em sistemas fluviais, sendo um dos métodos mais comuns a adoção de modelos de propagação unidimensionais. Sua larga utilização reside no fato de que modelos unidimensionais quando comparados a modelos bi e tridimensionais são mais simples e requerem uma quantidade mínima de dados de entrada e tempo computacional, além de possuírem consolidados os conceitos básicos e algoritmos de programação para seu uso.

Um dos principais dados de entrada na elaboração de modelos hidrodinâmicos é o Modelo Digital do Terreno (MDT). Seu objetivo na modelagem é assegurar resolução e precisão suficientes para captar elementos topográficos da planície que sejam relevantes para o desenvolvimento na escala de interesse, a fim de encaminhar a informação batimétrica detalhando a inclinação longitudinal do sistema fluvial e demais elementos topográficos (Horritt e Bates (2002)).

A abordagem que discute a validação de MDT's em modelos hidrodinâmicos pode ser encontrada em estudos realizados por Verwey (2001), Gillan et al (2005), Merwade et al (2005), Merwade et al (2008) e Aggett e Wilson (2009).

Informações de altimetria, estações fluviométricas e séries históricas, caracterização morfológica e física da região de estudo também constituem uma importante etapa no desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico. Tais itens são utilizados em todos os processos, desde a construção da base geométrica até a validação do modelo.

3 – Área de estudo

A área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Paraguai é de 363.442 km², em território

brasileiro. O trecho apresentado neste trabalho situa-se no intitulado Tramo Sul da Hidrovia do rio Paraguai, localizado geograficamente a noroeste do estado do Mato Grosso do Sul (MS), entre o Porto de Ladário e Porto Esperança.

Em um trajeto de aproximadamente 125,8 km de extensão, o trecho apresentado apresenta 5 (cinco) contribuições laterais significativas no regime de escoamento, sendo eles: rio Paraguai-Mirim, rio Miranda, rio Taquari, rio Negro e rio Periquitos. A Figura 2 ilustra a localização do trecho a ser modelado, bem como suas contribuições laterais.



Figura 2 - Trecho a ser modelado neste trabalho e contribuições laterais da bacia hidrográfica.

Para o Tramo Sul da hidrovia, o canal de navegação é mais amplo - cerca de 1,5 vezes maior que o Tramo Norte - e permite atualmente a passagem comboios com formação 4x4 (compostos por chatas de até 60x12 m, com calado de 2,6 m), capazes de transportar 20.000 a 25.000 toneladas de carga. Adicionalmente ao valor de calado, considera-se o pé de piloto com 0,30 m e um valor de 0,10 m de coeficiente de segurança, têm-se que o valor de segurança da navegabilidade da via para o Tramo Sul está fixado em 3,0 m (Brasil, 2000).

Estudos realizados por Guarneri et al (A) (2015) resultaram na identificação de 39 passagens críticas de navegabilidade ao longo

de toda a hidrovia do Paraguai. No trecho a ser modelado, existem o Passo Caraguatá e o Passo do Jacaré, os quais necessitam de dragagens de manutenção para que se assegure a navegação nestes locais.

4 – Descrição do modelo hidrodinâmico

Durante a construção de modelos hidrodinâmicos, a preparação dos dados e interpretação dos mesmos são tarefas essenciais e onerosas, as quais podem ser simplificadas quanto ao processamento e visualização dos dados forem desenvolvidas em um ambiente de geoprocessamento.

A extensão HEC-GeoRAS, desenvolvida pelo *US Army Corps of Engineers (USACE)* foi a ferramenta geotecnológica utilizada para a elaboração da base geométrica a ser modelada.

Este conjunto de procedimentos, ferramentas e utilitários permite a criação de um banco de dados geoespaciais contendo todas as informações geométricas que podem ser extraídas de um Modelo Digital do Terreno (MDT) por meio de uma interface gráfica, nesse caso o *ArcGIS Desktop (USACE, 2010)*.

Inserem-se todas as informações espaciais necessárias para a execução do modelo, como traçado do canal e conexão com afluentes, divisão do escoamento em ilhas, margens e suas delimitações, identificação de estruturas que afetem o regime de escoamento, entre outros.

Exporta-se essa rede de informações para o modelo hidrodinâmico, responsável pelas simulações dos perfis da lamina d'água e configurado para ocorrer em regime permanente de escoamento

O modelo escolhido para a realização das simulações foi o HEC-RAS. Trata-se de um software de código livre, desenvolvido também pela USACE. A modelagem hidrodinâmica utilizando HEC-RAS envolve a interação de quatro equações principais: equação da continuidade, equação da energia, equação da quantidade de movimento e equação de Manning.

O procedimento básico de computação do programa baseia-se na solução da equação de energia unidimensional (a energia cinética é a mesma para todos os pontos numa seção transversal). São avaliadas as perdas de energia por fricção e variações geométricas das seções transversais (USACE, 2010).

Os níveis de água são obtidos por método iterativo utilizando a equação da energia de Bernoulli, apresentada na Equação 1

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Onde Y_2 e Y_1 são as profundidades da superfície d'água nas seções transversais (m); Z_2 e Z_1 são as elevações do fundo do canal principal (m); α_2 e α_1 são os coeficientes de não uniformidade do perfil da velocidade (adimensional); V_2 e V_1 são as velocidades médias na seção (m/s); g é a aceleração gravitacional (m/s²); h_e é a perda de carga (m).

A perda de carga (h_e) é calculada entre duas seções transversais, é resultante da força de atrito entre o fluido e as paredes do canal e as variações na geometria do canal, sendo definida pela Equação 2:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

Onde L é a distância distribuída entre as seções transversais (m); \bar{S}_f é a perda por atrito entre duas seções transversais (m); C é o coeficiente de expansão ou contração (adimensional).

A vazão é calculada através da equação de Manning (Equação 3):

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3)$$

Onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning para cada divisão da seção transversal (m/m); A é a área do escoamento para cada divisão (m²); R é o raio hidráulico para cada divisão (m).

Demais formulações e cálculos podem ser consultados no Manual Hidráulico do HEC-RAS (USACE, 2010).

5 – Metodologia

O processo de desenvolvimento do modelo hidrodinâmico seguiu algumas diretrizes. Sua delimitação se deu de acordo com a disponibilidade de informações das estações fluviométricas, das altitudes ortométricas das referências de nível (RRNN) implantadas e do nível de redução utilizado pela Marinha do Brasil.

Como mencionado anteriormente, neste trabalho abordaremos o trecho de Porto de Ladário a Porto Esperança. Os demais trechos estão em fase de calibração e simulação.

A Figura 3 apresenta um fluxograma da metodologia aplicada para a elaboração do modelo hidrodinâmico, detalhada a seguir.

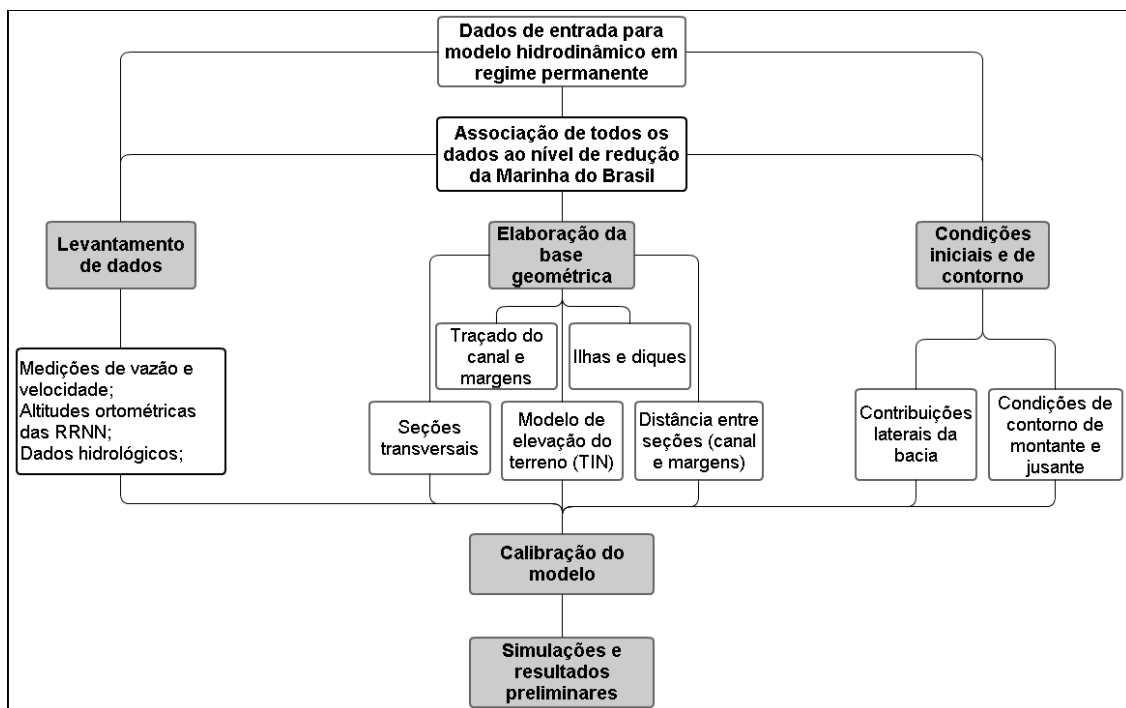


Figura 3 - Metodologia aplicada na construção do modelo hidrodinâmico.

5.1 Levantamento de dados

A primeira etapa compreende ao levantamento de informações topobatimétricas provenientes de três coletas de dados em campo da UFPR/ITTI durante expedições realizadas em junho e novembro de 2014 e fevereiro de 2015, sendo os dois últimos em expedições conjuntas com a Marinha do Brasil. Foi efetuado o levantamento das seguintes informações:

- Dados planialtimétricos das RRNN, cálculos das ondulações geoidais e obtenção de respectivas altitudes ortométricas da lâmina d'água ao longo do rio Paraguai;
- Medições de vazão e correntes, batimetria longitudinal;
- Leituras de réguas linimétricas de estações fluviométricas;

A implantação e nivelamento das RRNN foi baseado em levantamentos por *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Para o trecho modelado, foram implantadas 4 (quatro) RRNN (Tabela 1) sequencialmente ao longo do rio Paraguai.

A metodologia completa sobre as implantação das RRNN no rio Paraguai pode ser consultada em Nadal et al (2015).

Tabela 1 - RRNN implantadas e respectivas altitudes ortométricas da lâmina d'água utilizadas para calibração do modelo hidrodinâmico

ID RRNN	Localização	Altitude Ortométrica da lâmina d'água (m)
RRNN AUX Ladário	Ladário (base naval)	84,91
RRNN 21 A	Ilha Tira Catinga	83,53
RRNN 22 A	Ilha Caragatá	82,4
RRNN 23 A	Porto Esperança	81,58

As leituras das réguas linimétricas das estações fluviométricas de Ladário, Porto da Manga e Porto Esperança foram realizadas simultaneamente a implantação das RRNN e as medições de vazão e corrente, para que assim se obtivesse maior proximidade da situação real do rio no dia.

As informações referentes a vazão, profundidade, perfis transversais e velocidade do escoamento foram obtidas por meio de medições com um perfilador acústico de

correntes por Efeito Doppler (ADCP) da marca Sontek *RiverSurveyor M9*.

O ADCP trata-se basicamente de um sonar, no qual o sinal transmitido atinge partículas em suspensão na coluna de água, ocasionando um retro espalhamento. Com isso, a frequência do sinal original é modificada devido ao efeito Doppler com valor proporcional à componente de velocidade da corrente.

Juntamente a essas componentes obtêm-se a distância percorrida pelo feixe através da emissão das ondas no transdutor, resultando nos valores de profundidade do canal.

A Figura 4 apresenta um exemplo de visualização de um perfil transversal de velocidades na medição a montante da ilha Miguel Henrique, no rio Paraguai.

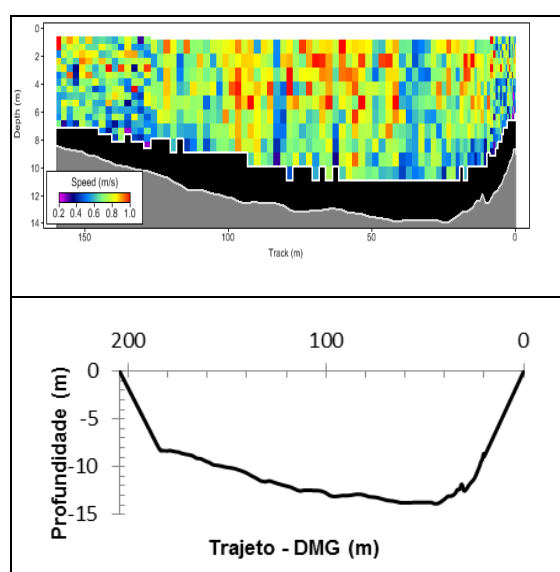


Figura 4 - Exemplo de seção transversal com medição de ADCP com a distribuição de velocidades e perfil do fundo ao longo da seção transversal.

Os perfis das seções transversais e seus valores de velocidade e vazão associados servirão como parâmetros de calibração do modelo hidrodinâmico.

As curvas-chave das respectivas estações fluviométricas foram geradas por meio de séries históricas e são utilizadas como vazões de projeto (tais vazões foram associadas aos níveis de redução da Marinha do Brasil). A Tabela 2 apresenta as vazões medidas durante as expedições de campo e as vazões de projeto associadas a curva-chave.

Tabela 2 - Vazão medida e vazão de projeto das estações fluviométricas do trecho Porto de Ladário a Porto Esperança

Estação Fluviométrica	Q medida (m³/s)	Q de Projeto (m³/s)
Ladário (Base naval)	1.218	1.160
Porto da Manga	1.346	1.360-1.520
Porto Esperança	1.596	1.400-1.600

A Tabela 3 apresenta a identificação das 22 (vinte e duas) medições de ADCP referentes a este trecho com a identificação de cada seção por sua respectiva ID e nomenclatura no programa responsável pelas simulações hidrodinâmicas.

Tabela 3 - Identificação das medições de ADCP realizadas de Porto de Ladário a Porto Esperança

Data da medição	ID seção	ID seção no software	Nome seção
09/01/2015	1	125738.5	Ladário
10/01/2015	2	101239.5	Passo Santana ou Jatobá
10/01/2015	3	90761.1	Jusante Ilha do Formigueiro
10/01/2015	4	86746.4	Montante Miguel Henrique
10/01/2015	5	71935.5	Montante Ilha Tira Catinga
10/01/2015	6	69729.3	Meio Ilha Tira Catinga
10/01/2015	7	61993.5	KM 1.440
10/01/2015	8	56487.5	Porto da Manga (Régua)
10/01/2015	9	53856.8	Braço Esquerdo Ilha da Manga
10/01/2015	10	53747.9	Braço Direito Ilha da Manga
10/01/2015	11	523125.3	Jusante Ilha da Manga
11/01/2015	12	43709.0	Braço Esquerdo Ilha das Laranjeiras
11/01/2015	13	49603.2	Braço Direito Ilha das Laranjeiras
11/01/2015	14	42175.8	Estirão do Cambará Ferrado
11/01/2015	15	39490.9	Braço Esquerdo Ilha Cambará
11/01/2015	16	31558.0	Montante Ilha Caraguatá
11/01/2015	17	25771.7	Braço Esquerdo Ilha Caraguatá
11/01/2015	18	15600.0	Jusante Ponte Rodoviária
11/01/2015	19	6503.4	Ponte Rodoviária Central 2
11/01/2015	20	3088.5	Ponte Rodoviária Central 1
11/01/2015	21	1923.9	Braço Esquerdo Ilha Jacaré
11/01/2015	22	5.0	Porto Gregório Curvo

A Figura 5 ilustra a distribuição de vazões e velocidades médias no canal referentes a essas medições de acordo com os ID's apresentados na Tabela 3.

As vazões inferiores a 1.000 m³/s apresentadas na Figura 5 representam as medições em passagens onde ocorre a bifurcação do escoamento (ilhas).

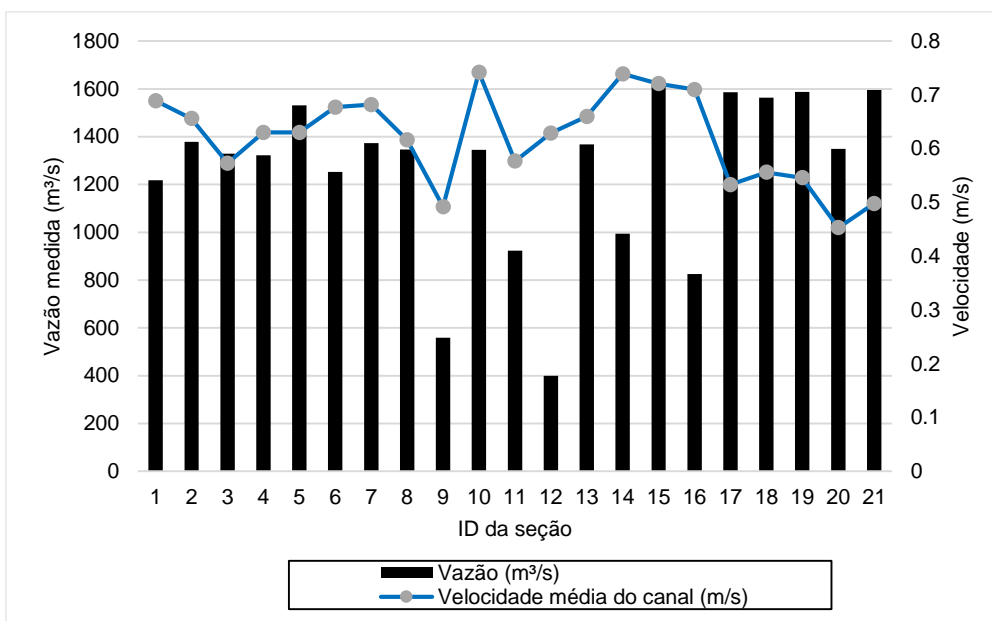


Figura 5 - Medições de vazão e velocidade com ADCP no trecho modelado

5.2 Elaboração da base geométrica

O modelo digital do terreno foi criado a partir da batimetria contida nas cartas náuticas disponibilizadas pela Marinha do Brasil. Estas cartas estão em formato *raster* e foram vetorizadas para receber os valores de altitude. As altitudes foram atribuídas linearmente a partir do traçado do canal de navegação, das altitudes das 77 (setenta e sete) RRNN implantadas e referenciadas ao nível médio dos mares, das tomadas da superfície da água seguido da interpolação entre elas.

Para a atribuição de altitudes ortométricas, foi utilizada a abordagem de linearização dos dados vetorizados, associando assim cada ponto a uma altitude a partir da sua relação linear com a quilometragem, e depois foi efetuada a transformação das profundidades em valores de altimetria. Tais valores estão associados ao nível de redução das réguas linimétricas fornecidos pela Marinha do Brasil por meio do Serviço de Sinalização Náutica do Oeste (SSN-6). A metodologia completa referente a estas atribuições pode ser consultada em Guarneri et al (B) (2015).

Realizou-se então a interpolação espacial entre as altitudes para representação da superfície do terreno. Após diversos testes com interpoladores estatísticos espaciais, fez-se uma combinação entre os interpoladores do tipo *Inverse Distance Weighted* (IDW) e triangulação. A Figura 6 ilustra um trecho da superfície do terreno interpolada.

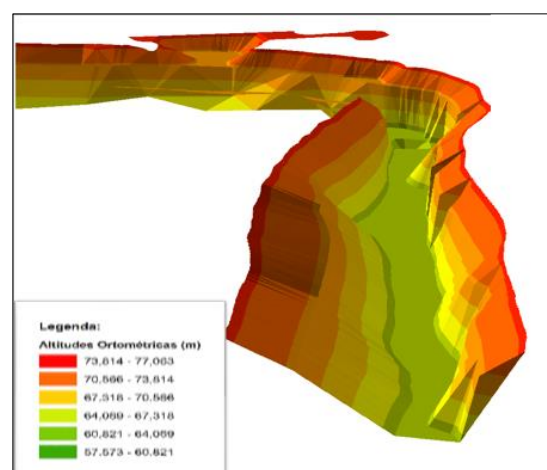


Figura 6 - Representação 3D da superfície do terreno interpolada

O traçado do canal principal tomou como base o trajeto percorrido durante a expedição de campo em junho de 2014, que percorreu o rio Paraguai por todo o trecho brasileiro – Cáceres (MT) até a foz do rio Apa (MS). As margens coincidem com as margens determinadas nas cartas náuticas, o mesmo ocorrendo com as estruturas presentes ao longo do trecho, como ilhas, lagoas e diques.

As seções transversais foram traçadas com 1.400 m de largura (em média) abrangendo as margens do rio Paraguai e espaçamento variando entre 300 e 500 m entre os respectivos perfis. A determinação das seções transversais teve como premissa coincidir com os locais de variação das características do escoamento, como a montante e a jusante de ilhas, em trechos nos quais se identificavam baixas

profundidades (profundidade mínima de 3 m), nos locais de implantação de RRNN, medições de ADCP e leituras das réguas linimétricas, a título de se obterem pontos de controle nas etapas de calibração e de verificação do modelo.

5.3 Condições iniciais e de contorno

As condições de contorno são necessárias para estabelecer o nível da superfície d'água nos extremos da base geométrica do modelo (a montante e a jusante) e são os referenciais da calibração do modelo.

A altitude ortométrica da lâmina d'água de Porto Esperança é a condição de contorno de jusante para a calibração do modelo (ver Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Os demais valores da mesma tabela são utilizados como ponto de controle para a calibração.

A condição inicial fornecerá o valor para que se iniciem os cálculos. O valor proveniente da vazão medida na seção transversal no Porto de Ladário (1.218 m³/s – ver Tabela 3) é a condição inicial para o trecho apresentado neste trabalho.

Os pontos de controle servem de apoio para a verificação da simulação com a realidade. Neste caso, em cada seção transversal onde existe variação de vazão - principalmente na confluência do rio Paraguai com seus afluentes principais - novos valores de vazão são adicionados à modelagem.

A Figura 7 apresenta a distribuição espacial das condições iniciais e de contorno e dos

pontos de controle do modelo hidrodinâmico. Suas identificações correspondem às colunas de ID RRNN e ID Seção, apresentadas anteriormente na Tabela 3 e na Figura 5 da Seção 5.1.

6 – Calibração do modelo hidrodinâmico

O coeficiente de rugosidade de Manning é a peça-chave na calibração sistemática, sendo altamente variável e dependente de diversos fatores, como: aspereza da superfície do leito, presença de vegetação, irregularidades no canal, alinhamento do canal, erosão e deposição de sedimentos, obstruções, tamanho e forma do canal, perfis e vazões, temperatura e material sólido em suspensão (Chow, 1959).

A distribuição dos coeficientes de rugosidade ocorreram longitudinalmente entre margens e canal, sendo que para o canal assumiu-se um valor constante de 0,025 e para as margens valores de $0,025 \leq n \leq 0,033$, como apresenta a Figura 8.

Segundo ITTI (2012), o Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da UFPR realizou análises granulométricas na região da ponte Eurico Gaspar Dutra, em Porto Esperança.

Os resultados das análises possibilitaram o cálculo dos coeficientes de rugosidade de Manning para esta região. A metodologia para esses cálculos está descrita em Tomas (2014), e o valor de rugosidade de Manning médio adotado para o canal nesta localidade ficou entre 0,024 e 0,025.

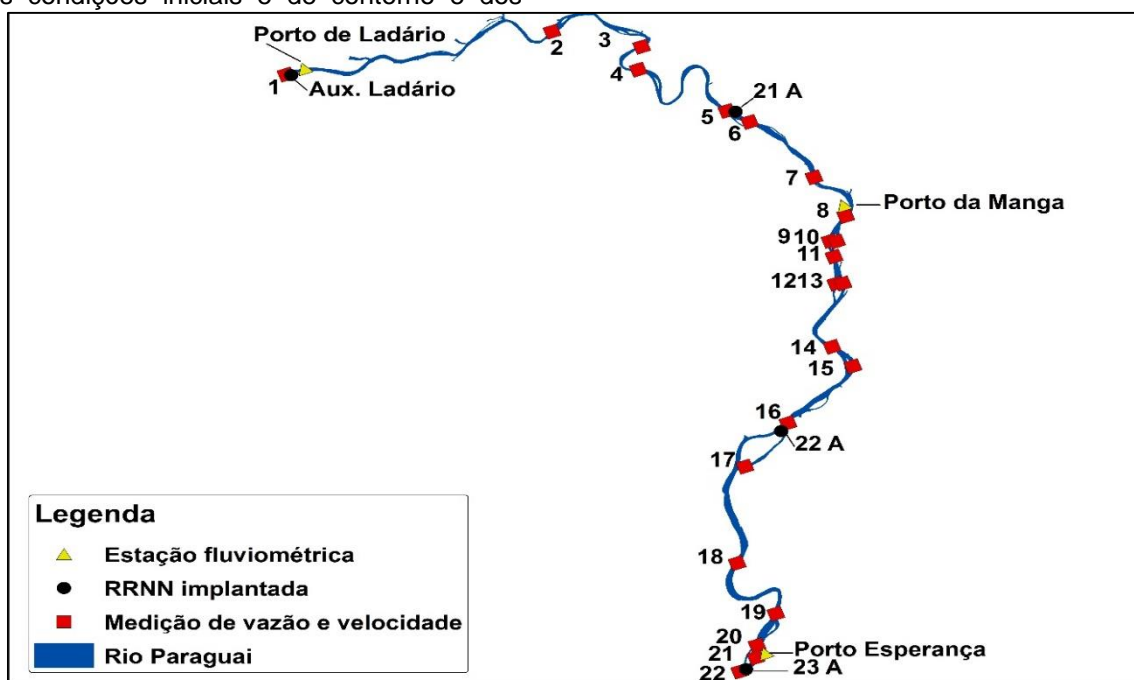


Figura 7 - Esquema da calibração do modelo hidrodinâmico com as condições iniciais, de contorno e pontos de controle.

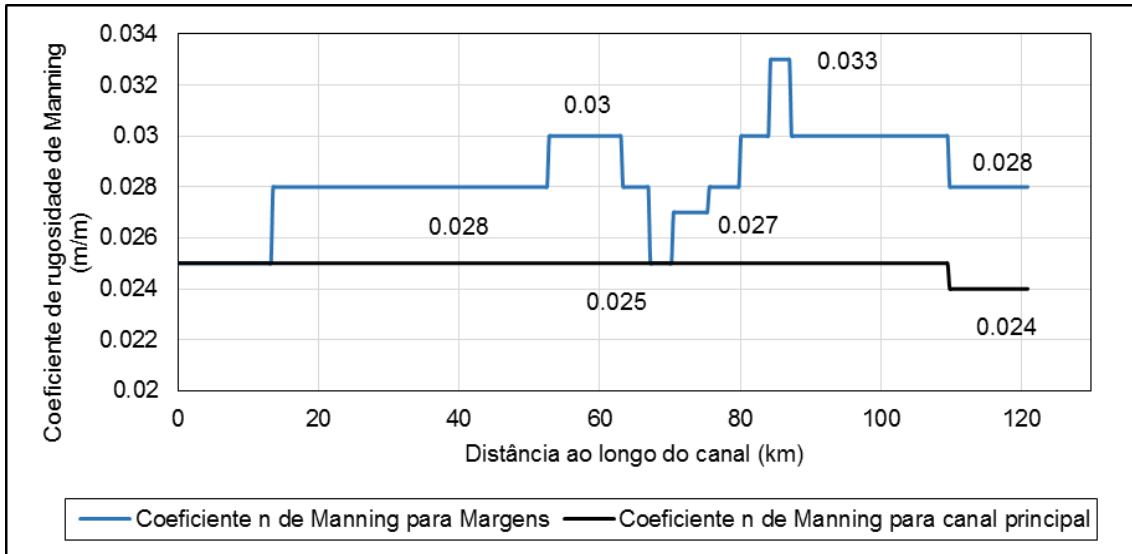


Figura 8 - Coeficientes de rugosidade n de Manning trecho modelado

7 – Simulações iniciais

7.1 Cenário de Calibração

Inseridas as condições iniciais e de contorno, os pontos de controle levantados em campo e os coeficientes de rugosidade de Manning ao longo do trecho estudado, tem-se um valor de nível de água, velocidade média, valor atribuído a linha de energia, número de Froude, área do escoamento, dentre outros parâmetros de saída associados a cada seção transversal. A Figura 9 ilustra um detalhe da seção transversal.

O Cenário de Calibração consistiu em diferentes representações de vazões medidas (valor constante, valores em distribuição em marcha e valor médio). Durante as simulações para o Cenário de Calibração, notou-se a boa representação do modelo no que se refere a geometria do canal e proximidade dos níveis d'água medidos. Alguns locais apresentaram variações bruscas nos níveis d'água, normalmente coincidindo com a bifurcação do canal ou na passagem do escoamento por obstáculos como ilhas e diques.

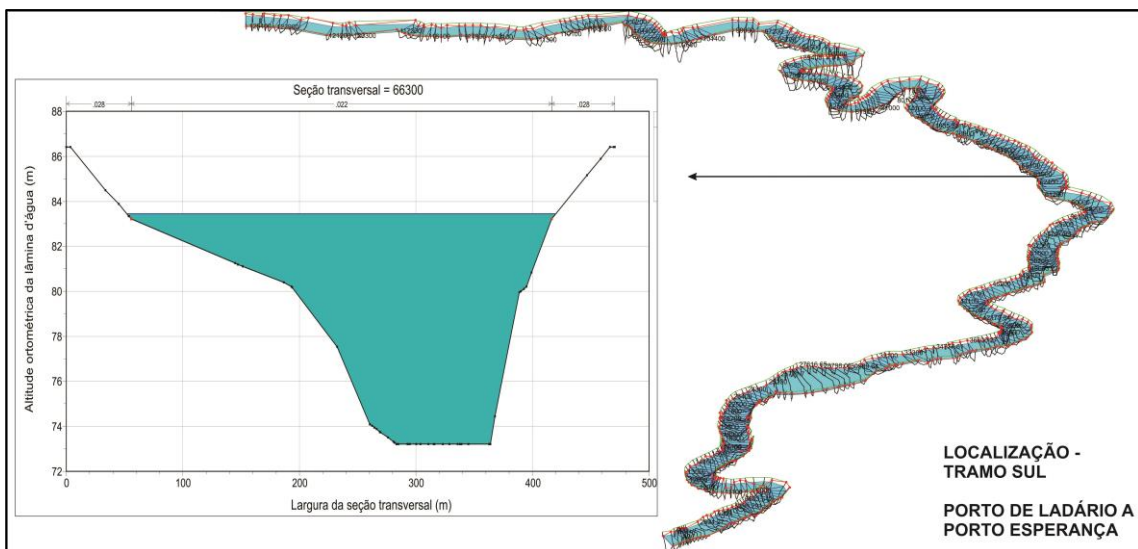


Figura 9 Visualização de resultados preliminares no HEC-RAS. Detalhe para uma seção transversal e nível d'água associado.

7.2 Cenário de Vazão de projeto

Uma vez completa a calibração do trecho, a simulação seguinte ocorreu para o Cenário de vazão de Projeto, correspondente as condições de estiagem do rio Paraguai relacionadas ao nível de redução.

A Figura 10 apresenta os primeiros resultados relacionados ao perfil longitudinal da lamina d'água para o trecho de Porto de Ladário a Porto Esperança, no rio Paraguai.

Em azul, tem-se o perfil longitudinal da lamina d'água para o trecho modelado. O traçado em vermelho representa a profundidade mínima aceitável para a navegação total neste trecho, previamente apresentada como 3 m.

O fundo do canal modelado está representado em preto e intersecta a linha de profundidade mínima em dois locais, como mostra o destaque em amarelo na Figura 10. Os locais de intersecção correspondem às passagens críticas de navegação conhecidas como Passo Caraguatá e Passo do Jacaré,

identificadas previamente por Guarneri et al (A) (2015) e que necessitarão de intervenções físicas para viabilizar a navegação.

A metodologia apresentada pelo autor, como mencionado nos itens 3 e 5.1, realiza a identificação de passagens críticas de navegabilidade por meio do perfil da lâmina d'água proveniente da interpolação linear das RRNN implantadas e das réguas linimétricas associadas ao nível de redução da Marinha do Brasil.

Neste contexto, o modelo hidrodinâmico surge como ferramenta certificadora dos resultados encontrados previamente, uma vez que considera todas as forças atuantes no regime de escoamento, alterações geométricas e hidrológicas do rio. Com isso, realizou-se um comparativo entre os perfis calculados para um dos locais de passagens críticas a navegação.

A Figura 11 apresenta este comparativo para o Passo Caraguatá. A linha d'água modelada posicionou-se cerca de 12 cm acima da interpolada linearmente, ainda intersectando o fundo do canal.

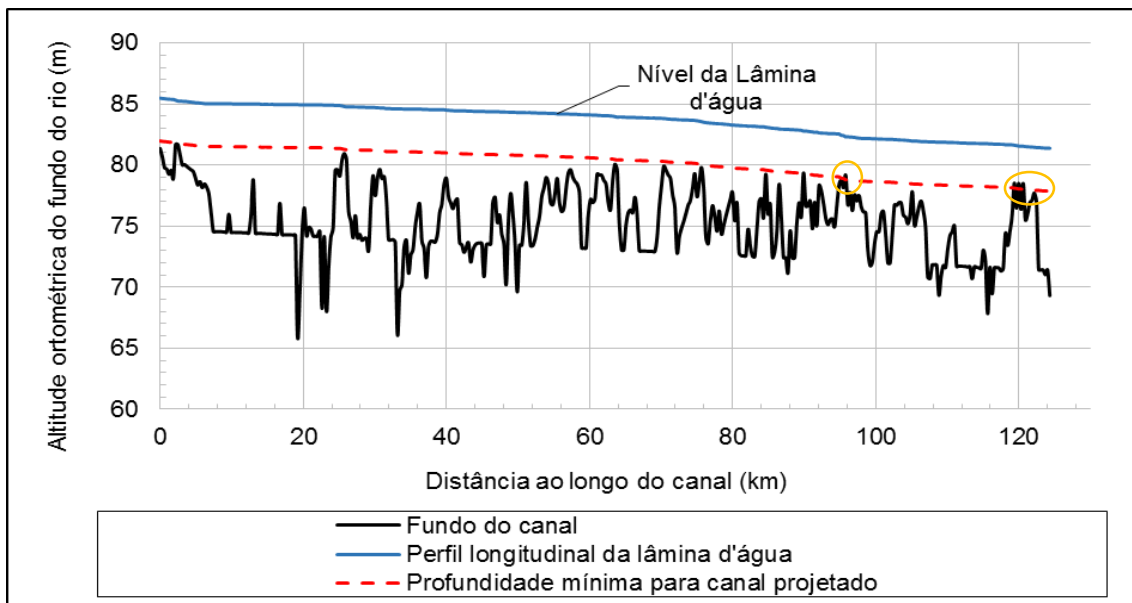


Figura 10 - Resultados preliminares para simulação do Cenário de vazão de Projeto.

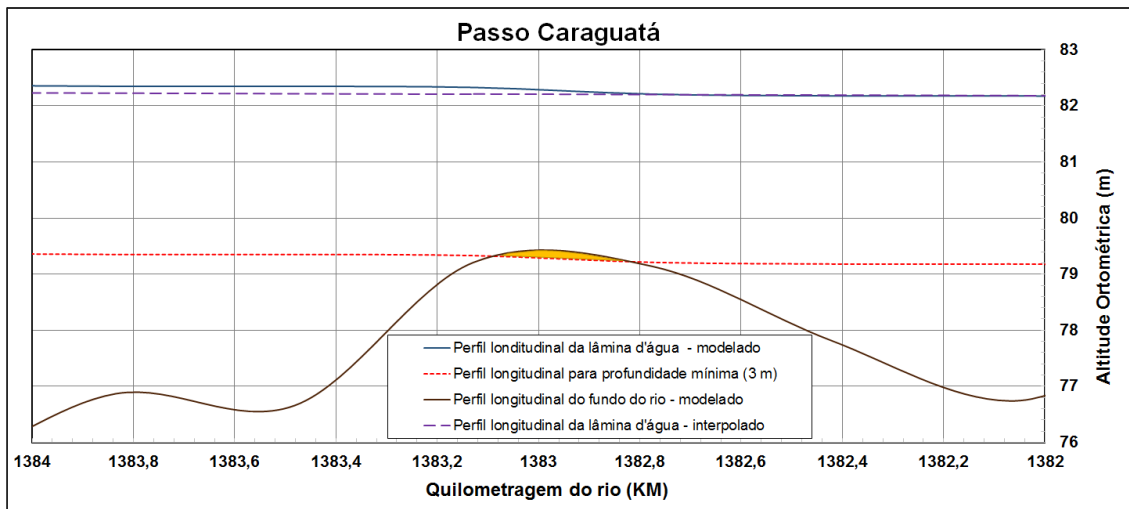


Figura 11 Comparação entre perfis longitudinais e sua influência no Passo Caraguatá.

Este resultado assegura os resultados encontrados por Guarneri et al (A) (2015) no que tange a identificação das passagens críticas a navegação para este trecho da hidrovia do Paraguai.

É importante destacar que neste trabalho estão sendo apresentados resultados preliminares, os quais podem ser passíveis de modificações ao longo de seu desenvolvimento. Os próximos passos para este trecho referem-se aos cálculos de volumes de dragagem com o novo perfil longitudinal da lâmina d'água para o Passo Caraguatá (Figura 11) e para o Passo do Jacaré.

8 – Considerações finais

Para compatibilizar e melhorar o transporte de cargas na Hidrovia do rio Paraguai faz-se necessário analisar o comportamento hidrodinâmico deste sistema fluvial de planície de inundação. Neste intuito, este estudo apresentou metodologia utilizada para aplicação de modelagem hidrodinâmica integrada a um sistema de informações geográficas que permita identificar variações batimétricas em níveis de estiagem, acoplar dados topo-batimétricos levantados em locais específicos ao longo da hidrovia e gerar cenários relacionados com perfis longitudinais da lâmina d'água para baixas vazões.

As próximas etapas dentro deste projeto referem-se à calibração e a execução de simulações para cenários de vazões de projeto nos demais trechos da hidrovia (ao todo são 8 trechos ao longo do território brasileiro da hidrovia do Paraguai, com extensões por trecho variando de 100 a 200 km,

aproximadamente) seguindo esta mesma metodologia.

Os perfis da lâmina d'água gerados pelo modelo hidrodinâmico certificarão desta forma o entendimento dos processos que governam o regime de escoamento e estendendo a análise dos resultados para toda a hidrovia com a geração de cenários subsidiando a análise preliminar da detecção dos passos críticos de navegabilidade e a determinação de volumes de dragagem.

Os resultados serão capazes de determinar com maior precisão a viabilidade da navegação na hidrovia e as potenciais intervenções necessárias.

Este trabalho está inserido no Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) da hidrovia do Paraguai. Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), à Marinha do Brasil, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA/UFPR) e ao Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR).

9 – Referências bibliográficas

AGGETT, G.R; WILSON, J.P. "Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river." *Geomorphology* 113.1, 21-34, 2009.

AZEVEDO, R. A. Modelagem matemática dos níveis d'água no rio Araguaia. Projeto Final do Curso de Graduação em Engenharia Civil. Goiânia: UFG, pp. 5-11, 2001.

BRASIL. Dispõe sobre a execução do Regulamento 7 (Regime Único de Dimensões Máximas dos Comboios da Hidrovia Paraguai-

Paraná (Porto de Cáceres - Porto de Nueva Palmira), de 19/6/96). *DECRETO No 3.533, DE 30 DE JUNHO DE 2000*. D.O. de 3.7.2000, 2000.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. Serviços de consultoria técnica para a elaboração de estudos de viabilidade técnico-econômica e ambiental – EVTEA e os projetos básico e executivo de engenharia de sinalização de margem e balizamento, projetos básico e executivo de engenharia de dragagem na hidrovia do rio Paraguai. *Termo de referência*, 2014

GILLAN, P.; JEMPSON, M.; ROGENCAMP, G.; “*The Importance of Combined 2D/1D Modelling of Complex Floodplain—Tatura Case Study.*” *Fourth Victorian Flood Management Conference*, 2005

GUARNERI, H.; RATTON, P.; BLENINGER, T.; BARSOTTI, H.; MORO, R.; TOMAS, G.; RATTON, E.; GODOY, P. et al. (A) Determinação de trechos críticos à navegação em rios de grande extensão – Estudo de caso: trecho brasileiro da hidrovia do Rio Paraguai. Artigo submetido ao IX Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior, Sobena 2015.

GUARNERI, H.; RATTON, P.; CORREIA, R.; MORO, R.; NADAL, C.; BLENINGER, T.; RATTON, E.; (B) Determinação do Modelo Digital de Elevação de rios de grande extensão para uso em projetos de engenharia - Estudo de caso do trecho brasileiro da hidrovia do rio Paraguai. Artigo submetido ao IX Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior, Sobena 2015.

HORRIT, M. S.; BATES, P. D. “Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation.” *Journal of Hydrology* 268, pp. 89-99, 2002.

ITTI, I. T. de Transportes e I. Dragagem do passo do Jacaré na hidrovia Paraguai-Paraná. Universidade Federal do Paraná, Relatório Técnico, 2012.

ITTI, I. T. de Transportes e I. Relatório de processamentos de dados das medições de ADCP. Universidade Federal do Paraná. Relatório a ser enviado ao DNIT, 2015.

MERWADE, V. et al. “GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping.” *Environmental Modelling & Software* 23, pp. 1300-1311, 2008.

MERWADE, V. MAIDMENT, D.R., HODGES, B. R., “Geospatial representation of river channels”. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10(3), pp.243-251, 2005.

NADAL, C.; VEIGA, A.; RATTON, E.; MORO, R.; BOESE, V.; NICOLAU, M.; GODOY, P. Posicionamento Vertical em Hidrovias Segundo Prescrições Internacionais da *FIG-International Federation of Surveyors*. Artigo submetido ao IX Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior, Sobena, 2015.

PAZ, A. R. da, et al. “*Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil).*” *Hydrological Processes* 25, pp. 1498-1516, (2011).

TOMAS, G. P. Avaliação Hidromorfológica do Uso de Espigões em Hidrovias. Dissertação de Mestrado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, UFPR, 2014.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydrologic Engineering Center. *HEC-RAS – River Analysis System, User’s Manual*. Version 4.0., 2006.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydrologic Engineering Center. *HEC-GeoRAS – GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS®, User’s Manual*. Version 4.2, 2010.

VERWEY, A. “*Latest Developments in Floodplain Modelling - 1D/2D Integration.*” *Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, 2001.