



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCO THIBÉRIO PINHEIRO LEITÃO

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D, 1D/2D E 2D DO EFEITO DE MARÉ NO RIO
COCÓ**

FORTALEZA

2018

FRANCISCO THIBÉRIO PINHEIRO LEITÃO

MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D, 1D/2D E 2D DO EFEITO DE MARÉ NO RIO
COCÓ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P719m Pinheiro Leitão, Francisco Thiberio.
Modelagem hidrodinâmica 1d, 1d/2d e 2d do efeito de maré no rio cocó / Francisco Thiberio Pinheiro
Leitão. – 2018.
137 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos.

1. HEC-RAS. 2. Hidráulica. 3. Hidrodinâmica. I. Título.

CDD 627

FRANCISCO THIBÉRIO PINHEIRO LEITÃO

MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D, 1D/2D E 2D DO EFEITO DE MARÉ NO RIO
COCÓ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Osny Enéas da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rubens Sonsol Gondim
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Terezinha Pinheiro e Aloisio Leitão, pelo apoio constante e educação que me permitirão chegar até aqui. Aos meus irmãos Thiago Leitão e Thales Pinheiro, pela companhia e apoio ao longo desse tempo.

A Amanda Sampaio pelo seu apoio constante, reflexões e companhia durante esses anos de estudo, com certeza tornou meus dias de estudo mais felizes e agradáveis.

Ao meu amigos e colegas do mestrado que contribuíram direta e indiretamente para meu aprendizado.

Aos professores do departamento pelo trabalho de excelência desenvolvido no ensino e na pesquisa, em particular para o prof. Nilson pela orientação na dissertação e no estudo, sempre disponível para tirar dúvidas e passar seu conhecimento. A coordenação por sempre estar disponível para solução dos problemas.

Ao CNPQ pela ajuda financeira com a bolsa durante o período do mestrado.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma atualização nos modelos hidrodinâmicos para o Rio Cocó, com base na versão mais recente e novas ferramentas disponíveis no HEC-RAS. Foram realizadas as modelagens hidráulicas unidimensional (permanente e transiente), unidimensional (para calha principal) conectada com uma modelagem bidimensional (para a planície de inundação) e uma modelagem bidimensional completa para o Rio Cocó, no Estado do Ceará, com o software HEC-RAS (versão 5.0.3) desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano. O sistema computacional foi utilizado para simular os efeitos de maré (na foz do rio) sobre a hidrodinâmica do Rio Cocó e nos seus entornos, particularmente na comunidade do Lagamar. O estudo mostrou que o modelo unidimensional transiente do HEC-RAS consegue, na versão 5.0.3, dar resultados aceitáveis na obtenção dos perfis de água (considerando o regime transiente), embora não capture completamente o efeito de amortecimento produzido pela planície de inundação. O modelo 1D/2D mostrou-se bastante instável e com tempo de processamento superior aos demais modelos implementados, devido as iterações necessárias para garantir um erro aceitável na conservação da massa na conexão entre os modelos 1D e 2D. O modelo 2D completo mostrou-se bastante eficiente para capturar a hidrodinâmica do rio, além de ser mais estável e permitir uma maior flexibilidade do que os demais modelos quanto a escolha do tempo de simulação e tamanho da célula (no caso do modelo 2D) ou espaçamento (no caso do modelo 1D). Os resultados obtidos mostraram-se consistentes com os trabalhos realizados anteriormente. Uma análise preliminar mostrou que a região do Lagamar apresenta tendência ao assoreamento. O modelo 2D mostrou-se promissor para aplicação em simulações de previsão em tempo real, devido ao seu baixo tempo de processamento e flexibilidade.

Palavras-chave: HEC-RAS. Hidráulica. Hidrodinâmica

ABSTRACT

This work presents an update on hydrodynamic models for the Cocó River, based on the latest version and new tools available in HEC-RAS. One-dimensional (permanent and transient) hydraulic modeling (for main channel) connected with a two-dimensional modeling (for the floodplain) and a complete two-dimensional modeling for the Cocó River in the State of Ceará were performed using the HEC- RAS (version 5.0.3) developed by the US Army Corps of Engineers. The computational system was used to simulate the effects of tide (at the mouth of the river) on the hydrodynamics of the Cocó River and its surroundings, particularly in the Lagamar community. The study showed that the transient one-dimensional model of the HEC-RAS can, in version 5.0.3, give acceptable results in obtaining the water profiles (considering the transient regime), although it does not completely capture the damping effect produced by the floodplain. The 1D / 2D model was very unstable and with a longer processing time than the other models implemented, due to the iterations necessary to guarantee an acceptable error in the conservation of the mass in the connection between the 1D and 2D models. The complete 2D model proved to be very efficient in capturing hydrodynamics of the river, besides being more stable and allowing greater flexibility than the other models in choosing the simulation time and cell size (in the case of the 2D model) or spacing (in the case of the 1D model). The results obtained were consistent with previous work. A preliminary analysis showed that the Lagamar region presents a tendency to sedimentation. The 2D model has shown promise for application in real-time forecasting simulations due to its low processing time and flexibility.

Keywords: HEC-RAS. Hydraulics. Hydrodynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Breve Histórico sobre o rio Cocó	20
Figura 2 - Bacia Hidrográfica do Rio Cocó.....	22
Figura 3 - Mapa de vulnerabilidade socioambiental para o curso baixo do Rio Cocó.....	24
Figura 4 - Classificação do escoamento em rios	26
Figura 5 - Composição da seção transversal – método padrão.....	29
Figura 6 - Aplicação da conservação do momento	30
Figura 7 - Notação para cotas	33
Figura 8 - Malha computacional.....	34
Figura 9 - Perfil da Face e Curva Área x Elevação	35
Figura 10 - Trabalhos anteriores sobre o Rio Cocó.....	38
Figura 11 - Características das modelagens regionais para o Rio Cocó.....	38
Figura 12 - Histórico de trabalhos anteriores	41
Figura 13 - Características dos trabalhos anteriores	41
Figura 14 - Geometria Importada	48
Figura 15 - Modelo de terreno base.....	50
Figura 16 - Modelo de terreno para batimetria do rio Cocó e canal da Aerolândia	51
Figura 17 - Modelo de terreno completo para o rio Cocó	51
Figura 18 - Processo de modelagem em 1D, estado permanente	53
Figura 19 - Modelo Combinado 1D/2D	56
Figura 20 - Modelo completo 2D	58
Figura 21 - Interpolação das seções transversais.....	60
Figura 22 - Estrutura lateral.....	67
Figura 23 - Estrutura lateral.....	67
Figura 24 - Modelo de terreno e área de fluxo 2D	76
Figura 25 - Camada de cobertura	77
Figura 26 - Vetor de velocidades no modelo 2D.....	78
Figura 27 - Malha não-estruturada com dados detalhados da submalha do terreno.....	93
Figura 28 - Benefícios de utilizado uma submalha com terreno detalhado para faces e tabelas de propriedades hidráulicas	94
Figura 29 - RAS Mapper sem terreno ou outras camadas.....	97
Figura 30 - Editor para aplicar o sistema espacial de referência do RAS	98
Figura 31 - Exemplo da criação de um novo terreno	99

Figura 32 - RAS Mapper com o modelo de terreno	100
Figura 33 - Janela de propriedades para a camada do modelo de terreno	101
Figura 34 - Terreno com sombreado de superfície e curva de nível aplicados	101
Figura 35 - RAS Mapper com o terreno base e as camadas do terreno mostradas	102
Figura 36 - Exportar geometria do canal	103
Figura 37 - Salvar o modelo de terreno do canal.....	104
Figura 38 - Terreno sem canal.....	105
Figura 39 - Terreno com canal	106
Figura 40 - Exemplo de polígono 2D	108
Figura 41 - Linhas de Quebra.....	109
Figura 42 - Comandos Básicos.....	109
Figura 43 - Propriedades da Malha Computacional	110
Figura 44 - Terminologia para modelagem computacional da malha no HEC-RAS 2D	111
Figura 45 - Editor para geração da malha computacional	112
Figura 46 - Espaçamento Computacional.....	112
Figura 47 - Malha Computacional Criada, com Linhas de Quebra.....	114
Figura 48 - Editar Espaçamento das Células na Linha de Quebra	116
Figura 49 - Transição gradual para células na Linha de Quebra	116
Figura 50 - Ferramentas de Edição Manual	117
Figura 51 - Método de Delaunay-Voronoi	118
Figura 52 - Erro no contorno da malha.....	119
Figura 53 - Erro no contorno da malha.....	119
Figura 54 - Correção com a suavização.....	120
Figura 55 - Correção adicionando mais células.....	120
Figura 56 - Erro devido a células com mais de 8 lados.....	121
Figura 57 - Correção do número de lados	121
Figura 59 - Correção para erros relacionados a Linhas de Quebra próximas.....	123
Figura 58 - Erros da geração de malha com Linhas de Quebra próximas.....	123
Figura 60 - Janela para criação de cobertura de terreno	125
Figura 61 - Janela para criação de cobertura de terreno preenchida	126
Figura 62 - Mapa de classificação de terreno	127
Figura 63 - Associação com a geometria.....	128
Figura 64 - Tabela relacionando Manning com as categorias	129
Figura 65 - Área de Manning 2D para o rio	130

Figura 66 - Detalhamento do modelo de terreno	132
Figura 67 - Elevação-Volume par uma célula	132
Figura 68 - Tabelas das Propriedades Hidráulicas para Face	133
Figura 69 - Água contida no canal com células computacionais maiores	134
Figura 70 - Mostrar as Áreas de Fluxo 2D	135
Figura 71 - Computar as Áreas de Fluxo 2D	136
Figura 72 - Editor Geométrico com os pontos da face da área de fluxo 2D mostrados	137
Figura 73 - Conexão entre rio 1D e estrutura lateral	137

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Envoltória de máximo e mínimos para o regime permanente	61
Gráfico 2 - Perfis de velocidade	62
Gráfico 3 - Tensão de cisalhamento	62
Gráfico 4 - Perfis de máximo e mínimo	63
Gráfico 5 - Diferentes perfis do regime não permanente	64
Gráfico 6 - Perfis de velocidade máximo e mínimo.....	65
Gráfico 7- Análise de sensibilidade para o regime não permanente	66
Gráfico 8 - Tensão de cisalhamento	66
Gráfico 9 - Perfis de água para diferentes tempos.....	68
Gráfico 10 - Perfil de velocidade para cota máxima e mínima	68
Gráfico 11 - Tensão de Cisalhamento	69
Gráfico 12 - Resultados para 3km, 7km, 12km e 18 km da simulação 01	70
Gráfico 13 - Simulação 1 x Simulação 2 – 3km e 7 km.....	70
Gráfico 14 - Simulação 1 x Simulação 3 – 3km e 7 km.....	71
Gráfico 15 - Simulação 1 x Simulação 4 – 3km, 7 km e 12km.....	72
Gráfico 16 - Simulação 1 x Simulação 5 – 3km, 7 km e 12km.....	72
Gráfico 17 - Simulação 1 x Simulação 6 – 3km, 7 km e 12km.....	73
Gráfico 18 - Simulação 1 x Simulação 7 – 3km, 7 km e 12km.....	73
Gráfico 19 - Simulação 1 x Simulação 8 – 3km, 7 km e 12km.....	74
Gráfico 20 - Simulação 1 x Simulação 9 – 3km, 7 km.....	74
Gráfico 21 - Simulação 1 x Simulação 10 – 3km, 7 km e 12km.....	75
Gráfico 22 - Perfis de água para o modelo 2D	77
Gráfico 23 - Perfis de velocidade para cota máxima e mínima.....	78
Gráfico 24 - Tensão de Cisalhamento	79
Gráfico 25 - Resultados da simulação 2 para 3km e 7km	79
Gráfico 26 - Resultados da simulação 3 para 3km e 7km	80
Gráfico 27 - Resultados da simulação 4 para 3km e 7km	80
Gráfico 28 - Resultados da simulação 5 para 3km e 7km	81
Gráfico 29 - Resultados da simulação 6 para 3km e 7km	81
Gráfico 30 - Resultados da simulação 7 para 3km, 7km e 12km	82
Gráfico 31 - Resultados da simulação 8 para 3km e 7km	82
Gráfico 32 - Resultados da simulação 9 para 3km e 7km	83

Gráfico 33 - Resultados da simulação 10 para 3km e 7km	83
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de perda de carga por contração e expansão	29
Tabela 2 - Condição de contorno de maré	49
Tabela 3 - Coeficientes de Manning calibrados por Nóbrega	52
Tabela 4 - Simulações para o fluxo permanente 1D.....	52
Tabela 5 - Simulações para o fluxo não permanente 1D.....	54
Tabela 6 - Coeficientes para estrutura lateral	55
Tabela 7 - Simulações para o modelo combinado 1D/2D.....	57
Tabela 8 - Simulações para o modelo 2D.....	58
Tabela 9 - Tempos de simulação	75
Tabela 10 - Tempos de simulação	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
SNUC	Sistema Nacional de Unidades Conservação
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	20
1.2	Objetivos	21
1.3	Organização do texto	21
2	ÁREA DE ESTUDO	22
2.1	Características Geomorfológicas e Climáticas	22
2.2	Classificação conforme CONAMA	23
2.3	Características Socioambientais	24
3	REFERENCIAL TEÓRICO	25
3.1	Conceitos fundamentais	25
3.2	Escoamento permanente	26
3.3	Escoamento não permanente - 1D	31
3.4	Escoamento não permanente - 2D	32
4	ANÁLISE DE TRABALHOS REGIONAIS, NACIONAIS E INTERNACIONAIS	38
4.1	Trabalhos regionais para o rio Cocó	38
4.2	Trabalhos em outras localidades	40
5	METODOLOGIA	47
5.1	Visão geral	47
5.2	Modelo de Terreno	49
5.3	Modelo 1D – Permanente	52
5.4	Modelo 1D – Não Permanente	54
5.5	Modelo combinado 1D/2D – Não Permanente	54
5.6	Modelo 2D – Não Permanente	58
6	RESULTADOS	60
6.1	Modelo permanente – 1D	60

6.2	Modelo não permanente – 1D	63
6.3	Modelo combinado 1D/2D	66
6.4	Modelo 2D	75
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	85
8	REFERÊNCIAS	88
9	ANEXO – TRADUÇÃO PARCIAL DO MANUAL DO USUÁRIO DO HEC-RAS 2D	90
9.1	Introdução.....	90
9.1.1	<i>Capacidades e vantagens do HEC-RAS 2D</i>	91
9.1.2	<i>Sumário de como realizar a modelagem de fluxo não permanente combinado em 1D/2D</i>	95
9.1.3	<i>Limitações da modelagem 2D com o HEC-RAS</i>	96
9.2	Desenvolvimento de um modelo de terreno para uso em modelos 2D e resultados de mapeamento	96
9.2.1	<i>Abrir o RAS Mapper</i>	97
9.2.2	<i>Definir sistema de coordenadas</i>	98
9.2.3	<i>Carregando os dados de terreno e criando o modelo de terreno</i>	98
9.2.4	<i>Utilizando as seções transversais para modificar e melhorar o modelo de Terreno</i>	102
9.3	Desenvolvimento de um modelo combinado 1D/2D	106
9.3.1	<i>Desenvolvimento da Malha Computacional 2D</i>	106
9.3.2	<i>Desenhando um polígono de contorno para a área 2D</i>	106
9.3.7	<i>Criando Tabelas de Propriedades Hidráulicas para as Células 2D e Faces</i> .	131

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC foi instituída pela Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012 incorpora princípios, objetivos e instrumentos de gestão de riscos de desastres. A PNPDEC instituiu o cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos. Do ponto de vista científico e tecnológico, a modelagem hidráulica e hidrológica constitui-se na ferramenta apropriada para delimitação de áreas de inundação e estudo de políticas e infraestruturas mitigadoras. As cheias em áreas vizinhas a rios urbanos, muitas delas ocupadas por populações de baixa renda, constitui-se em um problema sério a ser enfrentado pelas políticas públicas. Em Fortaleza, o rio Cocó é ocupado em suas margens por uma alta densidade populacional e casas de baixo padrão de habitabilidade.

O rio Cocó, que nasce na vertente oriental da Serra da Aratanha, tem uma extensão de 50 km e sua bacia tem uma área de drenagem total de 485 km². Constitui um dos principais rios para macrodrenagem da região metropolitana de Fortaleza (passando por três municípios em sua extensão: Pacatuba, Maracanaú e Fortaleza), com uma grande diversidade de fauna e flora ao longo de sua extensão¹. Esse rio possui várias unidades geoambientais, destacando-se o seu manguezal, que possui várias espécies de moluscos, crustáceos, peixes, répteis, aves e mamíferos que compõe um ecossistema rico e propício para reprodução, desova, crescimento e abrigo natural¹.

Por causa dessa importância, o governo estadual editou, em 1989, o decreto nº 20.253, declarando-a como área de interesse social para fins de desapropriação as áreas de que estiverem compreendidas no contorno do Parque Ecológico do Cocó. Em seguida, 1993, editou o decreto nº 22.587, ampliando a área destinada ao Parque do Cocó para fins de desapropriação. A área abrangida por esses decretos compreende o trecho da BR-116 à foz do rio Cocó, localizada no município de Fortaleza/CE, com o total de 115, 5 km². O parque está em adequação ao Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC (Lei Federal nº 9.985)¹.

SEMA (2016) apresenta um breve histórico sobre o rio Cocó e um estudo sobre a proposta de definição de unidades de conservação para o rio Cocó. Historicamente, o rio vem sendo pressionado pela exploração econômica ou pela urbanização no seu entorno. Nos anos de 1960 a 1970, foi intensamente explorada pela atividade salineira, consistindo na principal

¹ <http://www.semace.ce.gov.br/2010/12/paque-ecologico-do-rio-coco/>

fonte de degradação do manguezal do Cocó durante o período. Ao final da década de 60, grandes extensões de áreas de mangue ao longo do rio foram suprimidas em decorrência da produção de sal. Com a finalidade de diminuir o assoreamento causado por essa atividade, foi realizado uma dragagem e retificação, o que acabou reduzindo ainda mais a extensão do mangue. Ao mesmo tempo, a prefeitura de Fortaleza autorizou o parcelamento do solo da região leste, a qual ocasionou a incorporação dos terrenos de praias, dunas, seguindo até o limite do mangue. No final da década de 70, a construção do bairro Cidade 2000 adensou a taxa de ocupação e urbanização no entorno do rio. Isso além de impactar diretamente na redução do manguezal, na planície de inundação e aterramento de lagos naturais, ocasionou um incremento no escoamento superficial pelo aumento na impermeabilização causada.

Ainda, a instalação do Shopping Iguatemi em 1982 contribuiu fortemente para a aceleração da urbanização no entorno do rio. Ao mesmo tempo, o declínio da atividade de sal na década de 80 proporcionou a regeneração do mangue, contudo, somente em 1989, com a criação do Parque Ecológico do Cocó, que essa regeneração do manguezal acelerada e mantida de modo uniforme. Apesar de isso não ter impedido a construção e urbanização ao redor dessa área, como a construção do conjunto Areal em 1995, reduziu a degradação interna do Parque.

Com base nisso, e visando a proteção do rio Cocó, foi criada a Área de Proteção Ambiental do Vale do Rio Cocó, pelo Decreto N 7.302 em 1986. Ainda, pelo Decreto 20.253, as áreas no entorno do rio foram declaradas de interesse social para fins de desapropriação. O Decreto 31.741 de 2015, criou um Grupo de Trabalho multiparticipativo com a finalidade de elaborar um programa de revitalização e regularização das Unidades de Conservação. Ressalta-se que essa medida pode proporcionar novas oportunidades de trabalho e renda, assim como inclusão social, turismo, lazer entre outros benefícios. Além disso, que a luta pela proteção e melhoramento do Parque Ecológico do Cocó já tem mais de quarenta anos de história. Além dessa importância ecológica, o rio também é responsável pela drenagem de 2/3 da área de drenagem do município, exercendo grande influência no planejamento urbana e drenagem da cidade.

Dada essa elevada importância do rio Coco sob aspectos sociais, culturais, ambientais, urbanos e econômicos, revela-se importante o estudo e entendimento da hidrodinâmica do rio e sua interação com mar em sua foz. Nesse sentido, é apresentado no Capítulo 4 diversos trabalhos regionais sobre o rio, assim como trabalhos nacionais e internacionais sobre modelagem hidrodinâmica através de diferentes modelos e metodologias.

Figura 1 - Breve Histórico sobre o rio Cocó



Fonte: SEMA (2016)

1.1 Justificativa

Embora já existam trabalhos anteriores sobre o comportamento hidrodinâmico do Rio Cocó, as ferramentas e modelos computacionais evoluíram bastante desde do último trabalho realizado por Ribeiro (2005), já sendo possível a modelagem 1D/2D e 2D por meio do HEC-RAS, assim como o mapeamento das zonas de inundação obtidas através de um modelo de terreno no RAS Mapper. Também já é possível a implementação da condição de contorno de maré pelo HEC-RAS, que antes constituía uma limitação no desenvolvimento do modelo. Esse trabalho visa a desenvolver novos modelos e aplicar essas novas técnicas/ferramentas na

modelagem hidráulica do rio, assim como analisar e comparar os resultados com os obtidos pelos trabalhos anteriores.

1.2 Objetivos

Esse trabalho tem os seguintes objetivos:

- Construção de um modelo digital de terreno que possa ser usado para modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional;
- Simulação do escoamento não-permanente, com condição de contorno de maré, por meio do HEC-RAS, considerando o fluxo em modelos hidráulicos 1D, 2D e 1D combinado com 2D;
- Análise dos resultados através de um estudo de sensibilidade, intercomparação dos resultados e comparação com os trabalhos anteriores
- Mapeamento dos resultados para um modelo de terreno

1.3 Organização do texto

Esse trabalho está dividido em 9 Capítulos, conforme descrição a seguir. No Capítulo 1 são apresentados os aspectos gerais e breve histórico do rio Cocó, os objetivos e as justificativas do trabalho. No Capítulo 2 são apresentadas as características da área de estudo: aspectos geomorfológicos e socioeconômicos. No Capítulo 3 o desenvolvimento das equações e modelos utilizados pelo HEC-RAS para simulação hidráulica são detalhados. No Capítulo 4 apresenta-se um histórico de trabalhos regionais sobre a hidrodinâmica do rio, assim como o desenvolvimento de trabalhos similares e modernos para outras localidades, principalmente na comparação entre modelos unidimensionais e bidimensionais. No Capítulo 5 é descrita a metodologia utilizada no trabalho: obtenção do modelo digital de terreno bruto, extração das seções pelo HEC-GeoRAS, exportação para o HEC-RAS, combinação das seções com o modelo bruto, parâmetros utilizados, entre outros elementos. No Capítulo 6 os resultados são apresentados e avaliados para as diferentes combinações de modelagem, assim como comparativamente com trabalhos anteriores. No Capítulo 7 as conclusões são apresentadas. O Capítulo 8 apresenta as referências utilizadas. O Capítulo 9 é um anexo referente à tradução parcial do manual do usuário para HEC-RAS 2D.

2 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Rio Cocó tem uma área de aproximadamente 500 km², abrangendo os seguintes municípios: Fortaleza, Maracanaú, Maranguape, Pacatuba e Aquiraz. A Figura 2 apresenta uma imagem de satélite com a localização e delimitação da bacia hidrográfica.

Figura 2 - Bacia Hidrográfica do Rio Cocó



Fonte: elaborada pelo autor

2.1 Características Geomorfológicas e Climáticas

A bacia do Rio Cocó é um dos principais elementos da macrodrenagem para cidade Fortaleza, tendo uma extensão de 50km desde de sua nascente, na Serra da Aratanha em Pacatuba, até sua foz, na praia da Sabiaguaba da costa leste de Fortaleza.

Em sua nascente, o Rio é denominado Riacho Pacatuba e, após a contribuição de alguns córregos, passa a ser conhecido de Rio Gavião (Ribeiro, 2005). Neste rio, foi construído o açude do Gavião, que faz parte do sistema de abastecimento da cidade de Fortaleza. Após a confluência do Rio Timbó, o rio passa a ser denominado de Rio Cocó.

Em relação à climatologia, a bacia é caracterizado por ter uma pluviosidade média de 1400 mm e um clima tropical úmido (Ribeiro, 2005). O ecossistema é do tipo manguezal, o qual abriga uma variedade de espécies.

Conforme Mavignier (1992), apud Ribeiro (2005), o rio apresenta uma área de hipertrofização das águas, desenvolvimento exagerado de plantas aquáticas, decorrente da alta concentração de fósforo, potássio e nitrogênio.

Segundo Ribeiro (2005), a formação geológica da bacia do Rio Cocó caracteriza-se por quatro tipos de formações: aluvião, cristalino, dunas e barreiras.

- A formação aluvional é encontrada na planície de inundação do Rio Cocó, com largura variando até 2 km em alguns locais. Tendo sua origem do período quaternário, é composto de sedimentos argilosos e plásticos, apresentando alto teor de matéria orgânica e cor escura;
- O cristalino é caracterizado por solos rasos e poucos permeáveis. É originário do pré-cambriano e ocupa uma área mais próxima da nascente;
- A formação dunas, também originária do período quaternário, é encontrada em toda a costa;
- A formação barreiras, de granulação fina a média, predomina a cor vermelha e é composta de sedimentos areno-argilosos com variações de face.

2.2 Classificação conforme CONAMA

Conforme a Resolução nº 20 do CONAMA, que classifica as águas baseadas na qualidade uso da água, Mavignier (1992) classifica as águas do Rio Cocó da seguinte maneira:

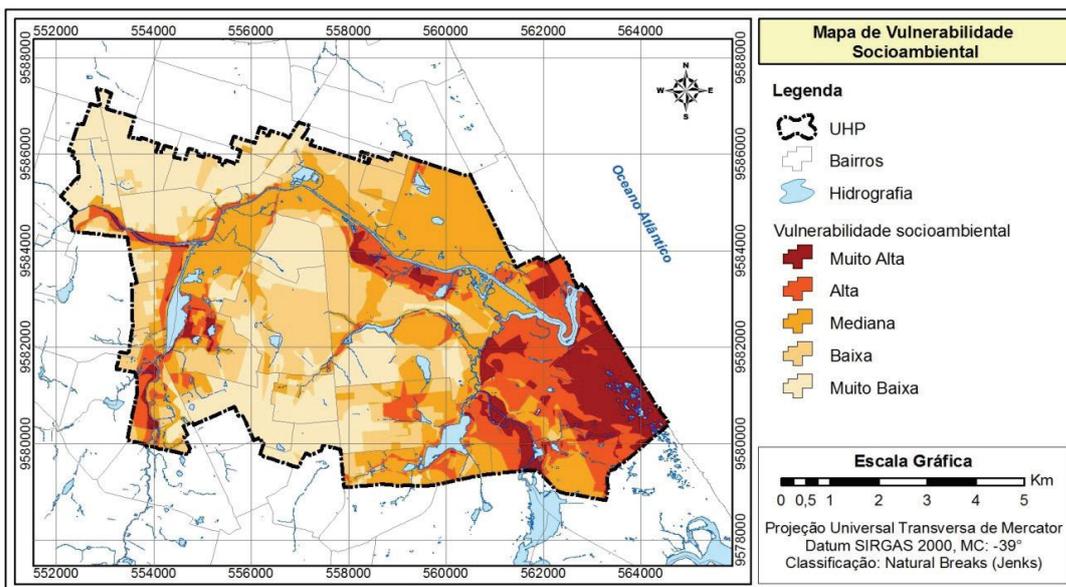
- Águas Salobras (classe 7): no trecho que vai do da foz até 8 km a montante (Av. Washington Soares), cuja concentração salina é maior que 0,5 ‰, com uso principalmente para recreação de contato primário, proteção de comunidades aquáticas e criação de espécies destinadas à alimentação humana.
- Águas doces (classe 3): do km 8 até a nascente, cujos valores de concentração salina são menores que 0,5 ‰ e usos como irrigação, dessedentação de animais, uso domésticos, entre outros.

2.3 Características Socioambientais

Zanella et al. (2013) ressaltam a importância da análise integrada entre os problemas ambientais (como inundações) e as questões sociais e econômicas. Os autores realizaram um estudo de classificação do baixo curso do Rio Cocó, sob o aspecto da vulnerabilidade dos grupos sociais e ambientais no em torno do curso do Rio. Um exemplo clássico dessa inter-relação é a ocupação da planície de inundação por populações socialmente vulneráveis. Os autores utilizaram as ferramentas de geoprocessamento para construir um mapa de vulnerabilidade socioambiental, baseado em critérios de classificação que levam em consideração a vulnerabilidade ambiental e social, resultando no mapa da Figura 3.

Constatou-se que a bacia possui extensos setores de alta e muito alta vulnerabilidade, principalmente aqueles localizados em planícies de inundação. E que essas áreas de maior vulnerabilidade social coexistem com a de maior vulnerabilidade ambiental.

Figura 3 – Mapa de vulnerabilidade socioambiental para o curso baixo do Rio Cocó



3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Conceitos fundamentais

Os escoamentos em rios e canais podem ser classificados, em relação a sua dinâmica temporal, em regimes permanente e não permanente. Quando as variáveis do modelo não mudam com o tempo, o escoamento é dito permanente. Por outro lado, quando as variáveis mudam com o tempo, o escoamento é dito não permanente.

Uma aplicação clássica de escoamento em regime permanente é a confecção de manchas de inundação para rios e canais, que são usadas no planejamento urbano para avaliar os efeitos de potenciais eventos de cheia que possam ocorrer. Esse tipo de estudo pode ser usado para projeto de estruturas de proteção com o objetivo mitigar os possíveis efeitos das inundações (REMO et al., 2012 e DIERAUER et al., 2012) ou simplesmente para mensurar possíveis danos causados e avaliar a viabilidade econômica do projeto (Paula, 2013; MACHADO et al., 2005; DYHOUSE et al., 2003; e TACHINI et al., 2001). Embora o escoamento real não tenha uma vazão constante, a prática de engenharia é a simplificação para o regime permanente, simulando para diferentes condições de contorno de vazão (normalmente a vazão de pico do hidrograma) e obtendo-se diferentes manchas de inundação. De fato, por exemplo, nos E.U.A, qualquer alteração que cause impacto em um rio ou canal deve ser acompanhada de um estudo indicando que não há um aumento maior que 0.3 m no nível da água para um evento de período de retorno de 100 anos, segundo Dyhouse et al. (2003).

Já o escoamento não permanente é aplicável em situações em que a dinâmica do sistema não pode ser representada adequadamente por um modelo permanente simplificado, normalmente relacionado com a translação de uma onda ao longo do rio, conforme Chow (1959). Embora na literatura não haja valores numéricos expressos para definir tais situações, o bom senso e a experiência podem ser utilizados para traçar o limite entre um modelo que pode ser simplificado para o regime permanente ou não. Além disso, há exemplos clássicos de situações típicas de aplicação de regime não permanente: rompimento de estruturas (barragem, dique, contenção lateral), interação do rio com o mar (estuários), operação e controle de comportas, entre outros.

Quanto a classificação em relação a variação espacial ($\partial/\partial x$), o escoamento pode ser classificado em uniforme ou variável. É dito uniforme quando os parâmetros (velocidade, vazão ou altura do nível da água) não variam com ao longo do rio para um determinado tempo.

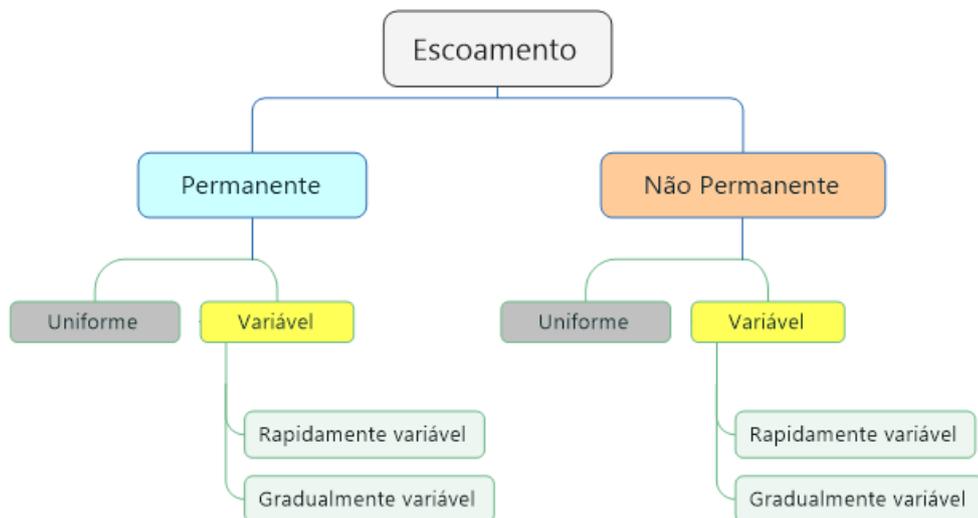
Por outro lado, é dito variável quando esses parâmetros mudam ao longo do rio. Ainda, o escoamento pode ser gradualmente variável (sem mudanças bruscas) ou rapidamente variável (com mudanças bruscas).

O efeito da gravidade no estado do escoamento é representado pela relação entre forças inerciais e forças gravitacionais. Essa relação é dada pelo número de Froude, conforme equação 1.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad 1$$

Em que V é a velocidade, g é a aceleração da gravidade e D é a profundidade hidráulica. Para $F_r = 1$ o escoamento é dito crítico, se $F_r < 1$ o escoamento é subcrítico (com predominância de forças gravitacionais) e se $F_r > 1$ o escoamento é supercrítico (com predominância de forças inerciais). Uma consequência importante deste conceito é que uma onda gravitacional pode ser propagada para montante para um escoamento subcrítico, mas não para um escoamento supercrítico. Isso ocorre porque a velocidade de propagação da água é maior que a celeridade da onda (\sqrt{gD}), segundo Chow (1959).

Figura 4 – Classificação do escoamento em rios



3.2 Escoamento permanente

Para o cálculo de perfis de água no regime permanente podem ser utilizadas duas equações fundamentais: conservação da energia ou conservação do momento. Em situações em que o fluxo é gradualmente variado (sem mudanças bruscas) a equação da energia pode ser aplicada, enquanto que em situações que isso ocorre ou existem condições especiais (pontes,

bueiros, estrutura lateral, junções, entre outros) a equação do momento é aplicada automaticamente pelo programa (BRUNNER, 2016). Hipóteses da aplicabilidade do escoamento permanente:

1. Vazão constante
2. Regime gradualmente variado
3. Fluxo unidimensional
4. Rios ou canais com pequenas declividades, menores que 1:10

Dadas essas hipóteses, pode-se derivar a equação de conservação da energia de diversas formas. Nos livros de hidráulica, normalmente, ela é apresentada na forma clássica da equação de Bernoulli (HENDERSON, 1966 e CHOW (1959), conforme equação 2.

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad 2$$

Em que p é a pressão hidrostática da coluna de água, γ é peso específico, z é a elevação do fundo do canal, V é a velocidade e g a aceleração da gravidade. Vale ressaltar que embora a equação possa ser derivada do princípio da conservação da energia (como também da segunda Lei de Newton), não é correto afirmar que os termos dessa equação representem Energia, pois possuem unidade dimensional de comprimento (HENDERSON, 1966). Os termos p/γ e $V^2/2g$ normalmente são chamados de carga piezométrica e carga dinâmica.

Para consideração da distribuição não uniforme da velocidade ao longo da seção transversal, utiliza-se um fator de ponderação α , determinado pela equação 3.

$$\alpha = \frac{\int v^3 dA}{\bar{V}^3 A} = \frac{\sum_i V_i^3 A_i}{\bar{V}^3 A} \quad 3$$

Aplicando esse princípio entre seções transversais consecutivas de um rio, considerando as perdas de carga e o fator de distribuição não uniforme da velocidade, obtém-se a equação 4.

$$Z_{i+1} + Y_{i+1} + \frac{\alpha_{i+1} V_{i+1}^2}{2g} = Z_i + Y_i + \frac{\alpha_i V_i^2}{2g} + h_e \quad 4$$

Em que:

Z_i, Z_{i+1} : elevações dos talvegues dos canais

Y_i, Y_{i+1} : profundidades da água nas seções transversais

V_i, V_{i+1} : velocidades ponderadas para as seções transversais

α_i, α_{i+1} : coeficientes de ponderação das velocidades

g : aceleração da gravidade

h_e : perdas de carga

A perda de carga entre duas seções transversais é formada pelas perdas de fricção e perdas de contração e expansão. A equação para perdas de carga é dada pela equação 5 (BRUNNER, 2016).

$$h_e = \bar{L}\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_{i+1}V_{i+1}^2}{2g} - \frac{\alpha_iV_i^2}{2g} \right| \quad 5$$

Em que:

\bar{L} : comprimento ponderado com base na vazão

\bar{S}_f : inclinação da perda de carga por fricção entre duas seções

C : coeficiente de contração e expansão

A determinação do coeficiente de ponderação da velocidade α requer que o fluxo seja subdividido em seções cuja velocidades seja uniformemente distribuída. A metodologia adotada no HEC-RAS é subdividir as seções transversais entre as planícies de inundações e o canal principal, com base nos valores do coeficiente de Manning. A capacidade de transporte (equação 6) é calculada para cada subdivisão, conforme Figura 5. A vazão é distribuída para cada subdivisão (equação 7) com base na relação entre a capacidade de transporte local e capacidade de transporte total (equação 8).

$$K_i = \frac{1}{n} A_i R_i^{2/3} \quad 6$$

$$Q_i = \phi_i Q \quad 7$$

$$\phi_i = \frac{K_i}{K_t} \quad 8$$

Além disso, é necessário estimar o comprimento médio entre duas seções que irá ser utilizado no cálculo da perda de água, já que as distâncias entre as planícies podem ser diferentes da distância para o canal. O comprimento médio é calculado considerando a ponderação entre os comprimentos das planícies de inundação e do canal, usando a vazão em cada partição como fator de ponderação, conforme a equação 9.

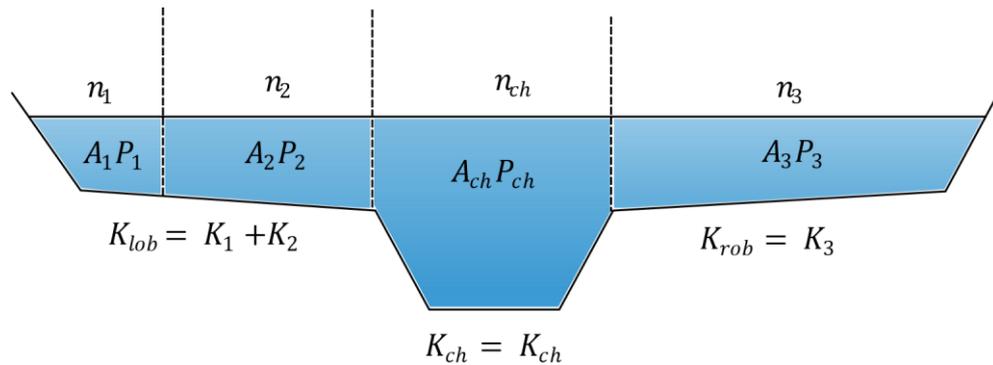
$$\bar{L} = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad 9$$

Em que:

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} : distância entre as seções transversais para planície de inundação a esquerda, canal principal e planície de inundação a direita, respectivamente.

$\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$: média aritmética entre as seções transversais para planície esquerda, canal principal e planície direita, respectivamente.

Figura 5 - Composição da seção transversal – método padrão



Fonte: elaborada pelo autor

A determinação da inclinação da linha de perda de energia por fricção (S_f) para um determinado trecho entre duas seções transversais é realizada utilizando a equação de Manning (equação 10).

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad 10$$

A perda de carga por contração e expansão da seção transversal é determinada com base um coeficiente empírico (C), que é dado pela tabela Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficiente de perda de carga por contração e expansão

	Contração	Expansão
Sem transição	0,0	0,0
Transição gradual	0,1	0,3
Seções em pontes	0,3	0,5
Transição abrupta	0,6	0,8

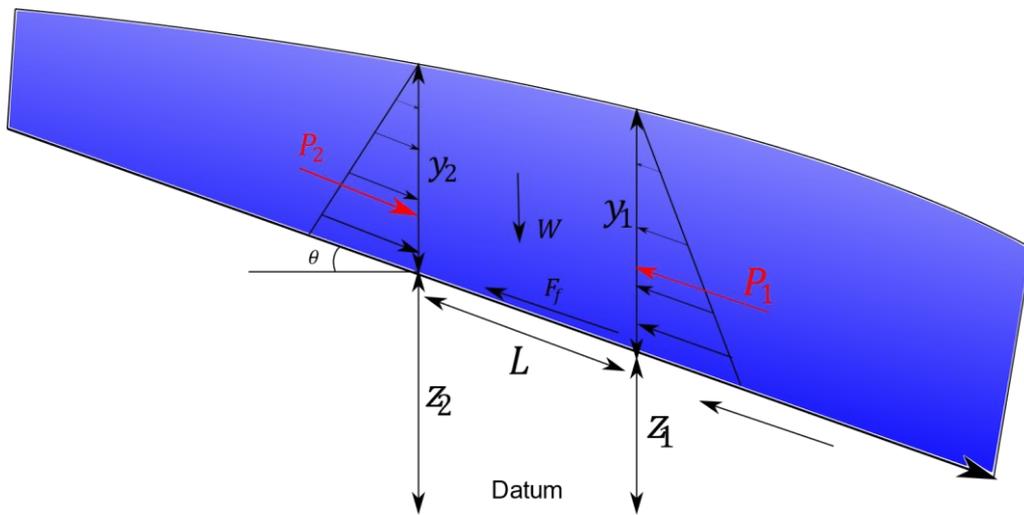
Para situações em que a equação da energia não é aplicável – quaisquer situações em que ocorre mudança brusca no regime do escoamento ou na geometria do canal – o sistema **HEC-RAS** aplica a equação do momento (equação 11 e equação 12) para solução da cota da água.

$$\frac{Q_{i+1}^2 \beta_{i+1}}{g A_{i+1}} + A_{i+1} \bar{Y}_{i+1} + \frac{A_i + A_{i+1}}{2} L S_o - \frac{A_i + A_{i+1}}{2} L \bar{S}_f = \frac{Q_i^2 \beta_i}{g A_i} + A_i \bar{Y}_i \quad 11$$

$$\beta = \frac{\sum_i V_i^2 A_i}{\bar{V} A} \quad 12$$

Em que β é o coeficiente de correção das velocidades para equação do momento, \bar{Y} é a profundidade medida da superfície da água até o centroide da área da seção transversal.

Figura 6 – Aplicação da conservação do momento



Fonte: elaborada pelo autor

O procedimento computacional para determinação da elevação da superfície da água no HEC-RAS é o seguinte (BRUNNER, 2016):

1. Assumir uma elevação da superfície da seção a montante WS_{i+1}^* (ou jusante se um perfil supercrítico está sendo calculado);
2. Baseado nessa elevação, determinar a capacidade de transporte (K_{i+1});
3. Determinar a velocidade média para seção \bar{V}_{i+1} ;
4. Determinar o coeficiente de distribuição de velocidades (α ou β);
5. Com os valores dos passos anteriores, calcular \bar{S}_f e h_e ;
6. Com os valores dos passos anteriores, resolver a equação 4 ou 11 para elevação da superfície WS_{i+1} ;
7. Comparar o valor calculado WS_{i+1} com o valor assumido no passo inicial; repetir os passos de 1-5 até que esteja com uma precisão de 0.003m, ou uma tolerância definida pelo usuário.

3.3 Escoamento não permanente - 1D

O escoamento não permanente é caracterizado pela variação temporal dos parâmetros do modelo ao longo da simulação. O modelo matemático para esse tipo de problema é composto pela equação da continuidade (equação 13) e pela equação do momento (equação 14), conforme Brunner (2016a).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_t \quad 13$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad 14$$

O esquema de solução utilizado no HEC-RAS é aplicar essas equações de forma integrada para o canal principal e para planície de inundação, conforme Barkau (1982) apud Brunner (2016a). Em seguida um esquema de solução implícita de quatro pontos (FREAD, 1974 e FREAD; LEWIS, 1993) é utilizado para discretização pelo método das diferenças finitas, resultando em um sistema de equações (equação 15), que devem ser resolvidas para cada passo de tempo t .

$$\mathbf{A}_t \mathbf{x}_t = \mathbf{b}_t \quad 15$$

Esse sistema é resolvido no HEC-RAS utilizando um algoritmo específico para matrizes esparsas, chamado de *Skyline Solver*, segundo Brunner (2016a). O objetivo principal deste algoritmo é reduzir o número de operações necessárias para solução do sistema (já que muitos valores da matriz \mathbf{A}_t são nulos, portanto, não sendo necessário seu armazenamento).

A solução para cálculo das elevações da água em todas as seções transversais, áreas de armazenamento e áreas de fluxo 2D segue o seguinte procedimento (BRUNNER, 2016):

1. O *solver* faz uma estimativa inicial da elevação da água, vazão, derivadas, etc. As equações de fluxo não permanente são resolvidas no *solver de diferenças finitas implícito (Skyline Solver)* para os nós 1D. Para áreas 2D é utilizado um algoritmo implícito de volumes finitos.
2. Todos os pontos computacionais (seções transversais, áreas de armazenamento e células 2D) são verificados para saber se o valor computado da elevação da água menos o valor antecedente é menor que a tolerância.

3. Se o erro é menor que a tolerância numérica, então o procedimento é finalizado para aquele passo de tempo, considerando-a como correta e seguindo para o próximo passo de tempo.
4. Se o erro é maior que a tolerância em qualquer ponto computacional, ele realiza novas estimativas e resolve as equações novamente. Se durante esse processo de iteração achar uma solução (cujo erro seja menor que a tolerância em todos os pontos), finaliza para o passo de tempo e move para o próximo.
5. Durante esse processo (até na primeira estimativa), o programa salva a solução que possuir menor erro como a melhor solução. As elevações da superfície da água e vazões são salvas para todo o domínio espacial.
6. Qualquer iteração que produzir melhores resultados, mas não satisfizer os critérios de tolerância, será salva como a melhor solução.
7. Se esse processo de solução alcançar o máximo de iterações (20 por padrão), então é mostrado um aviso. Contudo, na solução, considera-se aquela que teve menor erro. Também apresenta o local com maior erro numérico e a magnitude do mesmo.
8. Isso ocorre mesmo quando, durante o processo de iteração, uma das estimativas (*trial and error*) faz com que a matriz fique completamente instável. Ainda assim, normalmente, o sistema consegue encontrar uma nova estimativa que não seja instável, embora não produza um erro menor que a tolerância.

3.4 Escoamento não permanente - 2D

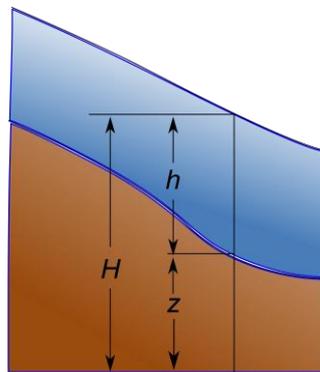
As equações de Navier-Stokes descrevem o movimento do fluxo em três dimensões. No contexto da modelagem de rios e enchentes, simplificações a essas equações podem ser impostas. As Equações de Águas Rasas são um conjunto de equações derivadas com base em simplificações, como:

1. Fluxo incompressível
2. Densidade uniforme
3. Pressão hidrostática
4. Equações médias de Reynolds (Viscosidade turbulenta – Eddy viscosity)
5. Dimensão vertical é muito menor que a dimensão horizontal
 - a. Velocidade vertical baixa, com pressão hidrostática dominante

Mais hipóteses simplificadoras podem ser aplicadas para as Equações de Águas Rasas, como, em alguns casos, o termo gravitacional e de fricção serem dominantes nas equações do momento, possibilitando desconsiderar os termos de aceleração e viscosidade. A equação do momento então toma a forma bidimensional do modelo de Onda de Difusão. Combinando esse termo com a equação da continuidade, tem-se o conhecido modelo de Onda de Difusão para as Equações de Águas Rasas.

Assumindo que a elevação da superfície do terreno é dada por $z(x, y)$, a altura da lâmina de água é dada por $h(x, y, t)$ e que a elevação da superfície da água é dada por $H(x, y, t) = z(x, y) + h(x, y, t)$.

Figura 7 - Notação para cotas



Fonte: elaborada pelo autor

Considerando que o fluxo é incompressível, a forma não-permanente da equação da continuidade é dada pela equação 16.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad 16$$

Em que t é o tempo; u e v são os componentes da velocidade nas direções x e y respectivamente; q é o termo que representa a fonte/retirada de vazão.

Na notação vetorial, a equação da continuidade é dada pela equação 17.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot h\mathbf{V} + q = 0 \quad 17$$

Em que $\mathbf{V} = (u, v)$ é o vetor velocidade e $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$ é o operador gradiente diferencial das derivadas parciais.

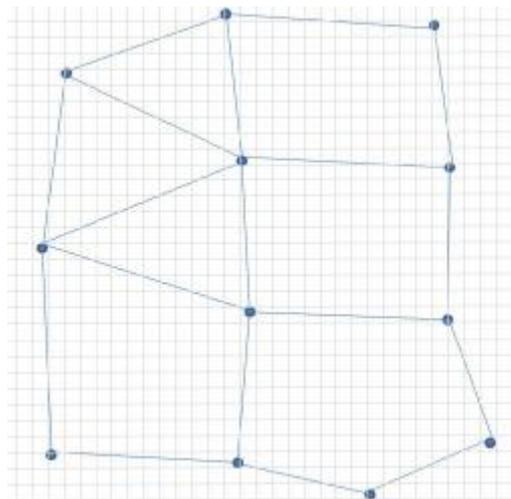
Integrando sobre uma região horizontal com vetor normal \mathbf{n} no contorno e usando o *Teorema da Divergência de Gauss*², a forma integral da equação da continuidade é dado pela equação 18.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dS + Q = 0 \quad 18$$

A região Ω representa o espaço tridimensional ocupado pelo fluido. As superfícies de contorno do volume são dadas por S . É assumido que Q representa qualquer vazão que passa pela superfície de baixo (infiltração) ou de cima (chuva ou evaporação). Esse termo também pode ser utilizado para representar outros elementos que retiram ou jogam água do sistema, como bombas. Convencionando-se que entradas são positivas e retiradas negativas.

A solução para esse problema no HEC-RAS é a utilização de uma malha subjacente Casulli (2008). As células computacionais contêm algumas informações extras, como raio hidráulico, volume e área da seção transversal que podem ser computadas a partir da topografia detalhada. Os detalhes de alta resolução são perdidos, mas há informação suficiente para realizar a modelagem com uma malha mais grosseira do que aquela que normalmente é utilizada por outros métodos. Em muitos casos, esse método é apropriado porque a superfície livre da água é mais suave que a da topografia, então uma malha mais grosseira pode efetivamente ser utilizada (Figura 8).

Figura 8 - Malha computacional



Fonte: Manual do Usuário do HEC-RAS

² $\iiint_{\Omega} \nabla \cdot h\mathbf{V} = \iint_S (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dS$

A integral tripla da equação 18 representa o volume Ω da região que é delimitada pela superfície da água. Assumindo que é função da elevação da superfície da água, o primeiro termo da equação é discretizado como a equação 19.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega = \frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} \quad 19$$

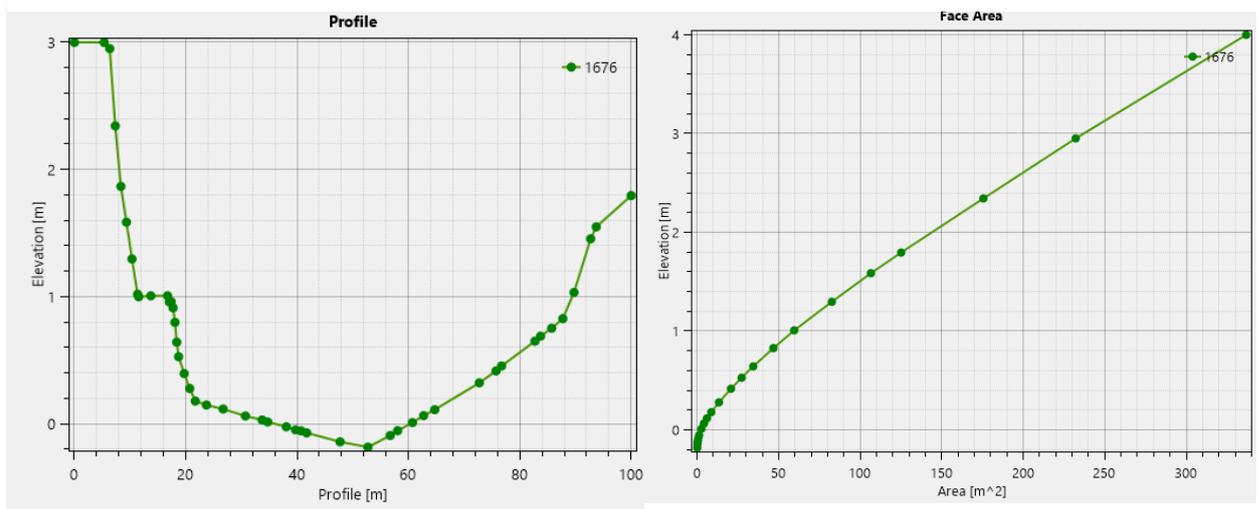
Em que os sobrescritos são usados para indexar os passos de tempo e a diferença entre dois passos consecutivos é Δt .

Se as células são consideradas como tendo faces poligonais, a integral de contorno da equação 18 pode ser escrita como a soma sobre todas as faces da região volumétrica, conforme equação 20.

$$\iint_S (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = \sum_k \mathbf{v}_k \cdot \mathbf{n}_k A_k(H) \quad 20$$

Em que \mathbf{V}_k e \mathbf{n}_k são, respectivamente, a velocidade média na direção normal a *Face* e o vetor normal a área da *Face*; e $A_k(H)$ é a área da *Face* “*k*” em função da elevação da superfície da água, conforme metodologia da malha subjacente (*sub-grid bathymetry technique*). Na Figura 9, a imagem da esquerda representa o formato da *Face* e a da direita o gráfico da função correspondente de elevação x área.

Figura 9 - Perfil da Face e Curva Área x Elevação



Fonte: elaborada pelo autor

As equações 19 e 20 podem ser substituídas na equação 18, resultando na equação 21 para conservação da massa com o método de malha subjacente.

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} + \sum_k \mathbf{V}_k \cdot \mathbf{n}_k A_k(H) + Q = 0 \quad 21$$

Percebe-se que essa equação pressupõe algum conhecimento da batimetria da malha subjacente, principalmente, o volume da *Célula* $\Omega(H)$ e a área da *Face* em função da elevação da água $A_k(H)$. Contudo, se essa informação não estiver disponível, a metodologia clássica “*box scheme*” pode facilmente ser recuperada fazendo $\Omega(H) = P \cdot h$ e $A_k(H) = l_k \cdot h$, em que P é a área da *Célula* e l_k é o comprimento do lado k (ambos independentes de H) e $h = H - z$ é altura da água.

Quando as dimensões horizontais são muito maiores que as verticais, implica que as velocidades verticais serão pequenas. As equações do momento de *Navier-Stokes* podem ser usadas com pressão quase hidrostática. Considerando a água como incompressível, desconsiderando as forças do vento e pressões não hidrostáticas, a equação do momento ponderada verticalmente é adequada. As velocidades verticais e derivadas em relação ao eixo z podem ser desconsideradas (na equação do momento e da massa). As equações de águas rasas são obtidas.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad 22$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad 23$$

Em que u e v são as velocidades no Sistema Cartesiano, g é a aceleração gravitacional, ν_t é o coeficiente horizontal de viscosidade, c_f é o coeficiente de fricção, f é o coeficiente de Coriolis.

O lado esquerdo das equações contém os termos de aceleração (local e advectiva). O lado direito contém as forças internas e externas agindo no fluido.

Essas equações também podem ser apresentadas na forma vetorial em uma única equação. A vantagem disso é torna-la mais compacta.

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -g \nabla H + \nu_t \nabla^2 \mathbf{V} - c_f \mathbf{V} + f \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{V} \quad 24$$

Cada termo da equação tem um significado físico. Da esquerda para direita, tem-se: aceleração local, aceleração advectiva, gradiente de pressão, difusão devido a turbulência (*Eddy diffusion*), fricção da superfície e termo de Coriolis.

O método das diferenças finitas é utilizado para discretizar as derivadas em relação ao tempo, enquanto um esquema híbrido é utilizado para derivadas em relação ao espaço. O método generalizado de Crank-Nicolson é usado para ponderar os termos de contribuição em cada passo de tempo.

$$\Omega(H^{n+1}) + \sum_j \alpha_j \left((1 - \theta)H_j^n + \theta H_j^{n+1} \right) = d \quad 25$$

Tem uma equação dessa forma para cada Célula do domínio. Esse sistema de equações pode ser escrito na forma matricial conforme equação 26.

$$\mathbf{\Omega}(H) + \mathbf{\Psi}H = \mathbf{b} \quad 26$$

Em que $\mathbf{\Omega}$ é o vetor de volumes das *Células*, H é o vetor das elevações da água nas *Células* no passo de tempo $n + 1$, $\mathbf{\Psi}$ é a matriz de coeficientes do sistema e \mathbf{b} um vetor de parâmetros conhecidos. O Jacobiano (matriz de derivadas) de $\mathbf{\Omega}$ em relação a H é dada pela diagonal da matriz de superfície de água $\mathbf{P}(H)$ para cada *Célula*.

4 ANÁLISE DE TRABALHOS REGIONAIS, NACIONAIS E INTERNACIONAIS

4.1 Trabalhos regionais para o rio Cocó

Por se tratar de um dos principais rios da Região Metropolitana de Fortaleza, o Rio Cocó já foi objeto de alguns estudos e pesquisas anteriores. Contudo, ressalta-se que a quantidade de trabalhos sobre o funcionamento e modelagem hidrodinâmica do rio ainda é pequeno. A Figura 10 apresenta os trabalhos locais anteriores que estudaram a parte da hidrodinâmica do rio.

Figura 10 - Trabalhos anteriores sobre o Rio Cocó



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 11 - Características das modelagens regionais para o Rio Cocó

Villela(1988)	Nóbrega(1998)	Silva(2004)	Ribeiro (2005)
<ul style="list-style-type: none"> •Escoamento na calha •Esquema implícito •1D •Equações de Saint-Venant •40 seções transversais 	<ul style="list-style-type: none"> •Escoamento na calha •Modelo DYNHYD •Esquema Explícito •1D •Equações de Saint-Venant •Limitado a geometria retangular •Medições de campo •Calibração e Verificação 	<ul style="list-style-type: none"> •Análise da dragagem •HEC-RAS •1D •Equações de Saint-Venant •Geometria irregular •Novas seções transversais 	<ul style="list-style-type: none"> •Comparação dos modelos HEC-RAS e DYNHYD

Fonte: elaborada pelo autor

O primeiro estudo sobre o comportamento hidrodinâmico do Rio Cocó foi realizado por Villela (1988). Conforme reportado por Nóbrega (1998) e Ribeiro (2005), Villela utilizou em seu estudo um modelo unidimensional das equações de *Saint-Venant*, utilizando o método das características com um esquema implícito de discretização. Pela descrição de Ribeiro, para o estudo foram consideradas 40 seções transversais, espaçadas 500m entre si. Não houve

pesquisa de campo para permitir a calibração do modelo, tendo sido usado um coeficiente de Manning empírico e constante para toda extensão do rio. O estudo realizado por Villela se deu considerando o regime dentro da calha do rio, e, portanto, não foram realizados estudos de inundação ou do efeito de amortecimento da planície de inundação e suas consequências para dinâmica do rio.

Dez anos após os estudos realizados por Villela, Nóbrega (1998), em sua dissertação de mestrado, realizou um novo estudo hidrodinâmico do rio. Nesse estudo, foi utilizado o módulo *Dynamic Estuary Model* (DYNHYD) do sistema computacional *Water Quality Analysis Simulation Program* (WASP) da *Environmental Protection Agency* (EPA) para simulações. Esse sistema utilizava, no tempo das simulações, o método das diferenças finitas para discretização das equações unidimensionais de *Saint-Venant*. Além disso, o sistema usava um método explícito para aproximação das diferenças finitas. Para desenvolvimento do trabalho, foram realizadas campanhas de medições em campo para as seguintes variáveis: condutividade (relacionada com a salinidade da água), medições de velocidades (relacionadas com as vazões) e medições dos níveis da água (relacionados com o efeito da maré no estuário). As seções transversais utilizadas foram as mesmas utilizadas por Villela.

Esse estudo realizado por Nóbrega representou um grande avanço no entendimento do comportamento do rio Cocó, não só por ter utilizado um sistema computacional moderno para simulações, como devido ao trabalho inovador no levantamento de campo realizado. Esses dados permitiram validar algumas hipóteses necessárias para aplicação do modelo, assim como permitiram a calibração do mesmo. Os resultados da condutividade mostraram que não há estratificação dos materiais misturados com a água, implicando que a hipóteses de considerar a água homogênea e com densidade constante é razoável. Além disso, Nóbrega realizou a calibração parâmetro de Manning n com base nas medições.

Aproximadamente seis anos após Nóbrega, Silva (2004) realizou um novo estudo hidrodinâmico no rio Cocó, para análise de um projeto de dragagem da calha menor do rio, contratado pelo prefeitura de Fortaleza, com o objetivo de reduzir problemas com enchentes nas regiões ribeirinhas. Este trabalho é um marco não só por ser um estudo cujo resultado tenha diretamente um impacto social e econômico, mas também por ser uma das primeiras iniciativas tomadas pelo governo para entendimento do comportamento do rio. Foram realizados novos levantamentos topográficos e a confecção de cartas topográficas digitais (.dwg). Segundo

relatado por Ribeiro (2005), por ser mais bem detalhada e devido a grande diferença temporal, as novas seções transversais localizadas na região do Lagamar apresentaram uma grande diferença entre aquelas utilizadas por Villela e Nóbrega. Para simulação, Silva empregou o sistema computacional HEC-RAS.

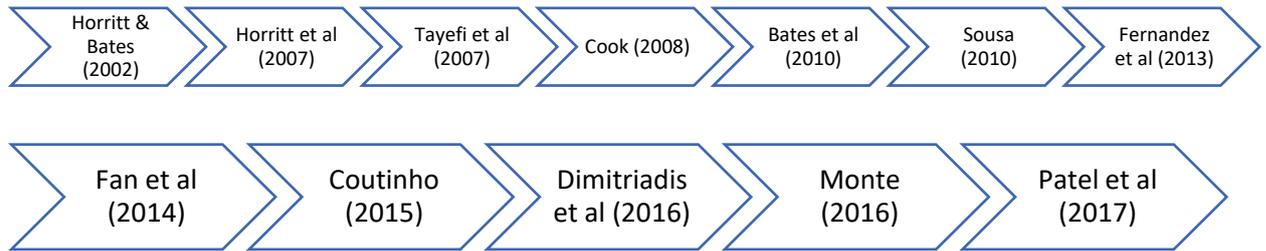
O trabalho de Ribeiro (2005) consistiu na comparação dos modelos unidimensionais do HEC-RAS (versão 3.1) e do DYNHYD, que foram empregados nos trabalhos anteriores para o rio. Este trabalho foi o primeiro no sentido de avaliar a aplicabilidade de diferentes modelos na simulação. Ribeiro conclui que devido as limitações do HEC-RAS (em sua versão 3.1), o sistema não conseguiu descrever a evolução do prisma de maré dentro do estuário do rio, mas obteve bons resultados para os níveis máximos e mínimos. Já o modelo DYNHYD apresentou melhores resultados para simulação do efeito de maré, cujos perfis estavam diferentes dos obtidos com o HEC-RAS na condição permanente.

Este trabalho, desenvolvido 13 anos após o de Ribeiro, visa a comparação entre os resultados obtidos com os modelos unidimensionais e bidimensionais no HEC-RAS. Atualmente, em sua versão 5.03, o HEC-RAS 1D já permite a aplicação das condições de contorno de maré satisfatoriamente e, portanto, a limitações anterior citado por Ribeiro já não é mais aplicável. Além disso, esse sistema já permite a simulação hidrodinâmica bidimensional, sendo também possível aplicar as condições de contorno de maré em 2D, assim como o mapeamento da inundação em um modelo de terreno. Neste trabalho foi desenvolvido novos modelos 1D, 2D e 1D/2D com o HEC-RAS e realizadas simulações. Os resultados são comparados entre si e os com os obtidos pelos trabalhos anteriores. Percebe-se que o modelo 2D permite realizar uma simulação mais adequada do efeito de maré, assim como da planície de inundação, além de ser mais flexível na definição da malha e tempo computacional.

4.2 Trabalhos em outras localidades

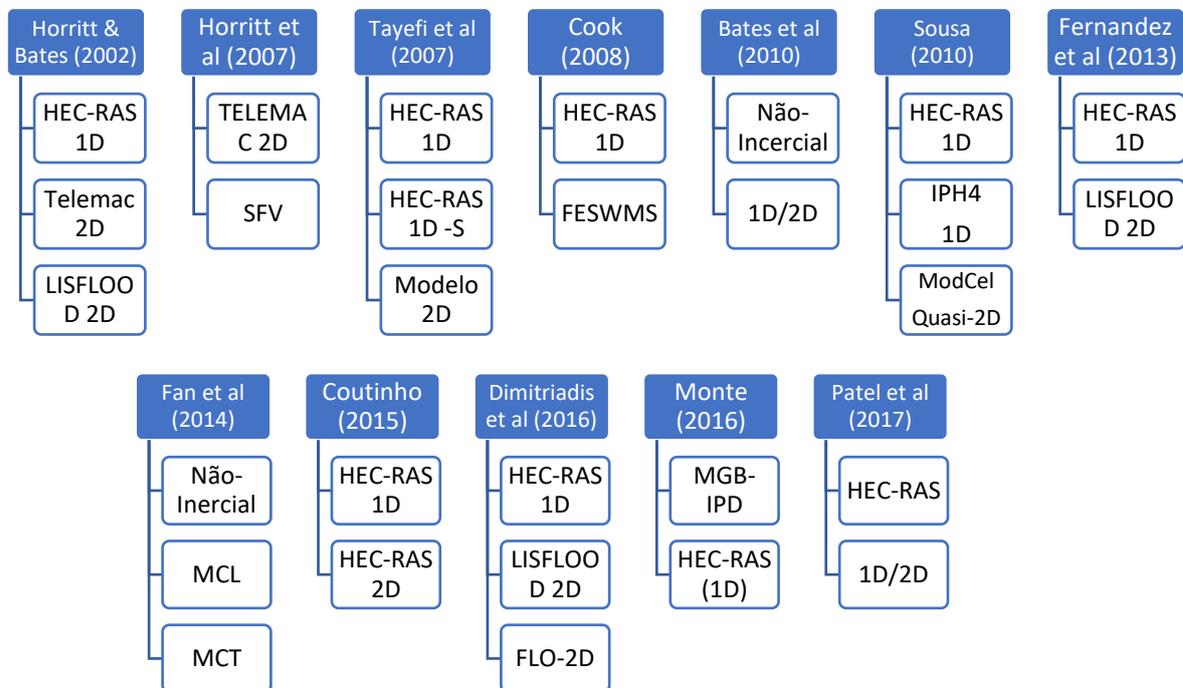
A Figura 12 apresenta o histórico de trabalhos anteriores sobre a modelagem hidráulica de rios, utilizando diferentes métodos e sistema computacionais. Embora haja uma gama maior de trabalhos nesta área, estes são os que foram considerados mais relevantes em termos de contribuição para o desenvolvimento desta pesquisa. Por sua vez, a Figura 13 apresenta, em resumo, as características analisadas em cada um dos trabalhos. Os detalhes são discutidos a seguir.

Figura 12 - Histórico de trabalhos anteriores



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 13 - Características dos trabalhos anteriores



Fonte: elaborada pelo autor

Uma das primeiras pesquisas para análise e comparação entre modelos 1D e 2D foi a realizada por Horritt & Bates (2002). Eles realizaram a calibração, simulação e comparação entre três modelos hidrodinâmicos para previsões de inundações: HEC-RAS – 1D, LISFLOOD-FP – 2D e TELEMAC-2D. A calibração foi realizada com base em dados medidos (hidrograma) e pela área inundação, assim como uma análise de sensibilidade para saber qual melhor método de calibração para cada modelo. Um dos objetivos principais desse estudo é avaliar a possibilidade de utilizar dados pontuais de vazão – mais facilmente acessíveis, aplicados em modelos 1D - para calibração dos parâmetros dos modelos que serão utilizados para previsão

de uma extensão de área inundada. Além disso, também avaliar a utilização de mapas observados de inundação como fonte de calibração para modelos esses modelos. Outro ponto importante avaliado foi a possibilidade de utilizar parâmetros calibrados para um evento de intensidade menor para simular um evento de intensidade maior.

Essa pesquisa chegou à conclusão que os modelos HEC-RAS (1D) e TELEMAC-2D podem ser calibrados usando tanto um hidrograma (dados pontuais de vazão), quanto mapas de inundação, dando bons resultados para previsões das manchas de inundação em ambos os casos. Já o modelo LISFLOOD-FP precisa ser calibrado de forma independente para área de inundação para dar resultados aceitáveis, pois quando foi calibrado utilizando dados pontuais de vazão (hidrograma) apresentou resultados pobres. Além disso, pelas simulações realizadas, o modelo LISFLOOD-FP apresentou menor sensibilidade em relação a variação dos parâmetros quando calibrados para diferentes eventos. Os resultados mostraram que a resposta do HEC-RAS (1D) e TELEMAC – 2D foram semelhantes, apesar da diferença dimensional dos modelos.

Horritt et al. (2007) compararam o desempenho na reprodução de uma inundação de um modelo baseado em elementos finitos (TELEMAC-2D) com um modelo de volumes finitos (SFVcode). Para calibração e verificação foram utilizadas imagens de satélite que mapearam os eventos de inundação. O modelo TELECMAC-2D apresentou menor sensibilidade a variação dos valores de Manning e maior sensibilidade em relação a variação do tamanho da malha do que o SFV. Os valores ótimos de Manning para o SFV foram mais consistentes com a literatura do que o do TELECMAC-2D. Reforçaram os estudos anteriores que indicaram que o parâmetro de Manning, na modelagem 2D, varia com a resolução do modelo, evento utilizado e vazão utilizada para calibração, sendo específico para cada modelo, aumentando a incerteza na determinação do parâmetro.

Tayefi et al. (2007) realizaram a comparação entre os modelos HEC-RAS-1D (1D-E), HEC-RAS-1D + células de armazenamento para planície de inundação (1D-S) e um modelo 1D combinado com 2D de onda de difusão para planície (2D-D). Esse estudo mostrou que a capacidade de previsão da mancha de inundação do modelo 2D-D foi melhor que os modelos 1D-E e 1D-S. Outra conclusão importante foi a que o modelo 2D-D é menos sensível a mudança do parâmetro de Manning n do que os outros modelos. Foi demonstrado também que a utilização de células de armazenamentos para planície de inundação causa um comportamento não adequado para propagação da onda. Isso acontece porque nesse modelo a água ao entrar em uma célula de armazenamento somente flui para as adjacentes quando a água alcança o nível

de transbordamento, causando uma grande redução no tempo de pico da onda, que não se verifica e se justifica na prática.

Cook (2008), em sua dissertação de mestrado, compara o HEC-RAS-1D com FESWMS-2D (elementos finitos) em relação a capacidade de previsão de área de inundação. Em seu estudo, utilizou diferentes resoluções espaciais de modelos digitais de elevação. Devido à falta de dados, não foi realizada a calibração e verificação dos modelos, apenas à simulação para uma comparação entre as respostas dos mesmos. Como conclusão, percebeu-se que a área de inundação aumentou conforme a resolução espacial do modelo digital de elevação diminuiu. Além disso, o aumento do número de seções transversais aumentou a área de inundação mapeada, assim como o aumento na resolução da malha computacional também aumentou a área inundada.

Bates et al. (2010) propuseram uma nova formulação inercial para resolução das equações de Saint-Venant e simulação de inundações em 2D. Neste trabalho, foi exposto que limitações de modelos anteriores são causadas principalmente pela desconsideração do termo inercial (aceleração) na formulação, levando a restrições severas quanto utilização do intervalo de tempo (condição de Courant–Friedrichs–Lewy). Na formulação proposta o termo inercial é levado em consideração no esquema de solução, com melhoras e menores restrições para o intervalo de tempo, implicando a possibilidade de utilização de intervalos maiores de 1 a 3 vezes aos esquemas anteriores. Os modelos foram comparados com duas soluções analíticas de propagação de onda em planos horizontais, uma solução analítica para condição de maré e uma simulação para um centro urbano com alta resolução espacial. Para as soluções analíticas, o modelo inercial apresentou resultados levemente melhores que o modelo clássico de difusão, enquanto que para condição de maré foi levemente pior que a solução analítica. Embora não tenha grandes avanços em termos de precisão da profundidade de água, o tempo computacional foi bastante reduzido.

Sousa (2010), em sua dissertação de mestrado, realizou um estudo comparativo entre o modelo permanente unidimensional do HEC -RAS, modelo hidrodinâmica 1D completo (IPH4) e um modelo de células de armazenamento Quasi-2D (ModCel). A comparação teve como parâmetros os perfis de água calculado e foi realizada de duas formas: do rio Iguaçu comparando os modelos IPH4 e ModCel e do rio Botas comparando os modelos HEC-RAS 1D permanente e ModCel hidrodinâmico. Para o primeiro caso, os perfis de água encontrados foram semelhantes, indicando que ambos os modelos foram válidos para aquele rio (cujo escoamento ocorreu predominantemente na calha principal). Para o segundo caso os resultados

para chuvas de projeto com período de retorno baixo foram semelhantes, o que foi justificado porque o escoamento ocorre principalmente pela calha principal, e modelagem da planície pelo 2D não pode ser capturada. Contudo, para chuvas de projeto com tempo de retorno maiores, percebeu-se uma grande diferença entre os resultados, com o modelo 1D superestimando a elevação das cotas de água em relação ao modelo quase-2D.

Fernandez et al. (2013) realizaram a comparação entre a capacidade de previsão da área inundada do modelo HEC-RAS 1D e do LISFLOOD-FP, assim como o tempo de processamento para cada um. Utilizaram com medida de desempenho o indicador F (HORRITT & BATES, 2002). Para área de inundação, chegaram a uma conclusão que o HEC-RAS 1D e LISFLOOD-FP tem resultados semelhantes. Contudo, em relação ao tempo de processamento, ressaltaram que o tempo de processamento para o HEC-RAS foi menos de 1 minuto, enquanto que para o LISFLOOD-FP foi mais de 12h.

Fan et al. (2014) avaliaram a utilização do modelo inercial unidimensional proposto por Bates et al. (2010) para aplicação em modelos hidrológicos chuva-vazão. Foi utilizado um método explícito para discretização. Este modelo foi comparado com outros modelos simplificados, Muskingum-Cunge Linear (MCL) e Muskingum-Cunge-Todini (MCT), assim como com a equação completa de *Saint-Venant*. Os autores chegaram à conclusão que o modelo inercial deu resultados similares aos obtidos pela equação completa de *Saint-Venant*, ressaltando a simplicidade de aplicação computacional do modelo inercial. Comparando com MCL e MCT, os autores concluíram que o modelo inercial dá resultados iguais ou melhores esses modelos.

Coutinho (2015), em sua dissertação de mestrado, realizou a comparação da modelagem unidimensional e bidimensional do rio Doce, para região de Colatina/ES. Esse estudo focou no comportamento do rio frente a inundações, diferentemente dos estudos relacionados no rio Cocó, cujo objetivo era o comportamento médio na calha principal.

Para simulação, Coutinho utilizou o sistema computacional HEC-RAS 1D/2D (versão 5.0). A calibração do parâmetro de Manning foi realizada com base em uma função objetivo e através de machas de inundações disponíveis, utilizando a medida de desempenho proposta por Horritt & Bates (2002), que tem como base a relação entre área de inundação simulada e área inundada real. Foram avaliadas: a sensibilidade do método de indicador F de calibração em relação a inclusão da calha principal na comparação; a utilização de parâmetros calibrados para eventos de pequenas magnitudes para simulação de eventos de maior magnitude; a avaliação de células de diferentes tamanhos.

Coutinho percebeu que a utilização do indicador F é sensível a inclusão da calha principal, mascarando os resultados e erros e indicando uma perfeita sobreposição de manchas. Ainda, a utilização de células computacionais maiores não prejudicou a precisão no modelo 2D, o que está de acordo com a teoria no manual de referência do HEC-RAS. Além disso, os dados calibrados para eventos de frequência maior puderam ser usados com precisão para os eventos de frequência menor. Isso reforça e expande os estudos realizados por Horritt & Bates (2002). Coutinho relata que uma das maiores vantagens do HEC-RAS 2D em relação ao 1D são as possibilidades de detalhamento das informações.

Dimitriadis et al. (2016) realizaram um relevante estudo relacionado às incertezas nas simulações hidráulicas para mapas de inundações. Essas incertezas foram avaliadas através de três modelos computacionais amplamente usados: HEC-RAS (1D), LISFLOOD-FP (2D) e FLO-2D. O método de simulação de *Monte-Carlo* foi utilizado para gerar múltiplos conjuntos de entrada e simulações, gerando múltiplos resultados para a análise estatística.

Na primeira fase desse estudo, os autores utilizaram uma geometria pré-definida e conhecida, evitando a interferência de condições de contorno desconhecidas e geometria complexa. O conjunto de parâmetros utilizados para análise de sensibilidade foi o seguinte: vazão de entrada, inclinação lateral (planície) e longitudinal (canal), coeficiente de rugosidade para o canal e planície e a resolução espacial do modelo.

As principais conclusões obtidas deste estudo foram os seguintes: as distribuições empíricas de probabilidade (DEP) (para altura da água e volume total) apresentam uma assimetria negativa; as DEP no contorno da altura da água apresentaram proximidade com a normalidade, enquanto que o volume total não; a incerteza global varia significante com o modelo adotado na simulação; grande parte da incerteza varia com o a escolha do coeficiente de Manning.

Monte et al. (2016) realizaram a análise do acoplamento entre modelos hidrológicos e hidráulicos utilizando o MGB-IPH (distribuído) e o HEC-RAS (1D). O estudo se deu no Rio Largo (Alagoas), no qual foram simulados diversos hidrogramas sintéticos, após ajuste dos dados de vazões observados a uma distribuição de probabilidade. Com os resultados do modelo hidrológico MGB-IPH, o mapa de inundação foi calculado utilizando o programa HEC-RAS (1D) no regime permanente. Os autores obtiveram bons resultados para o mapeamento da mancha de inundação observada no ano de 2010.

Patel et al. (2017) realizaram a modelagem hidrodinâmica acoplada 1D/2D do rio Tapi, cidade de Surat, Índia. O trabalho consistiu no desenvolvimento de um modelo 1D, com

seções topográficas detalhas, e de um modelo 2D (acoplado ao 1D), obtido pela combinação de curvas de nível intercaladas a 0,5m e dados de SRTM (30m e 90m). Na foz do rio foi considerada a condição de maré como condição de contorno, na seção mais a montante foi considerada a condição de saída de água de uma barragem. O modelo foi simulado na condição não-permanente e validado para o evento extremo que ocorreu em 2006. A calibração foi realizada para o parâmetro de rugosidade de Manning, com base na comparação entre as vazões observadas em uma determinada seção e as vazões simuladas para a mesma seção. A verificação foi realizar comparando-se a profundidade da água simulada e a profundidade de água medida para diversas áreas da planície de inundação. Os resultados indicaram uma boa correlação entre os valores simulados e observados. Além disso, os autores utilizaram esse modelo para avaliar a utilização de medidas estruturas para mitigações das inundações.

5 METODOLOGIA

5.1 Visão geral

O estudo foi desenvolvido com base na metodologia de modelagem hierárquica (BUCALEM; BATHE, 2011), partindo de um modelo simples (regime permanente 1D) que ajuda na compressão do problema, para um modelo mais robusto (regime não permanente 2D), mantendo, sempre que possível, a parcimônia do modelo. Além disso, foram realizadas várias simulações para análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo e comparação entre os resultados para diferentes hierarquias de modelo.

Os dados necessários para realizar a modelagem unidimensional no estado permanente são os seguintes:

1. Seções transversais do rio (SILVA, 2004);
2. Coeficiente de Manning ao longo da extensão do rio (NÓBREGA, 1998)
3. Vazão ao longo da extensão do rio e suas mudanças (mesma utilizada nos trabalhos anteriores)
4. Inclinação do rio como condição de contorno a montante (estimado)
5. Cotas máxima e mínima do nível de maré para cálculo das envoltórias máximas e mínimas (NÓBREGA, 1998)

Para modelagem 1D e não permanente, adicionalmente, precisam-se dos seguintes parâmetros

6. Condição inicial em todas as seções transversais
7. Variação do nível de maré ao longo do tempo

Para o modelo 2D e não permanente, precisa-se também dos seguintes parâmetros:

8. Modelo de Terreno para Planície
9. Manning 2D para o Modelo

As seções transversais utilizadas foram as obtidas pelo levantamento realizado por Silva (2004) em uma consultoria para o projeto de dragagem do rio Cocó. Essas informações encontravam-se em forma bruta de um arquivo AutoCAD (.dwg), contudo, para uma adequada modelagem e mapeamento da inundação pelo HEC-RAS, as seções e demais parâmetros precisam estar georreferenciados e em formato legível pelo *RAS Mapper*. Como o programa

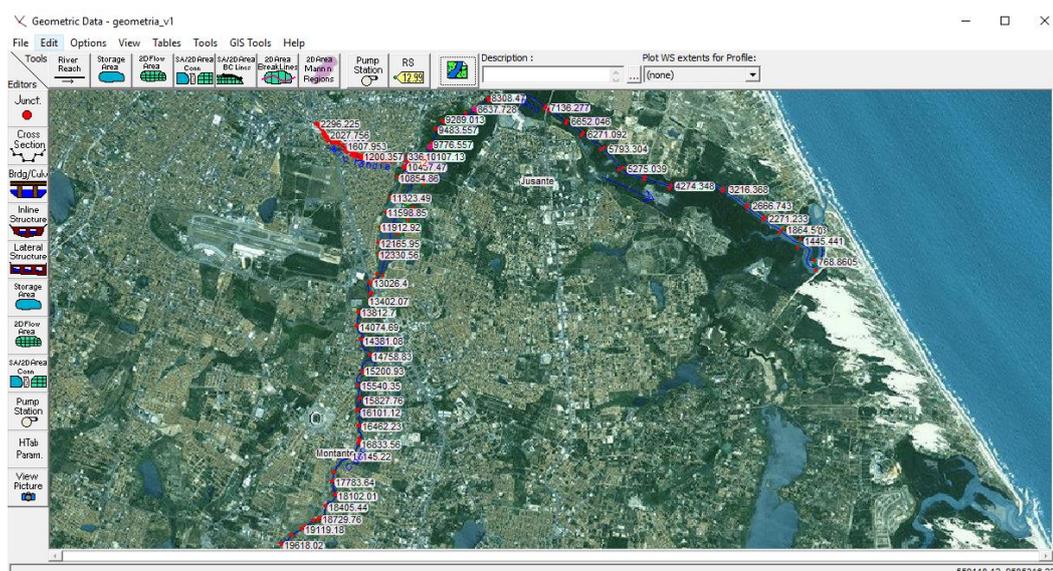
computacional ArcMap possui o plug-in HEC-GeoRAS³ para permitir o pré-processamento da geometria e exportação diretamente para o HEC-RAS, esse programa foi escolhido para o trabalho.

As seções brutas foram importadas para o ArcGIS e georreferenciadas para o sistema de coordenadas *UTM_SAD_69*. Após isso, foram aplicados os processos descritos em Ackerman (2009) para processamento e exportação da geometria para o HEC-RAS, de forma resumida nos passos a seguir:

1. Criar camada representando a linha central do fluxo do rio (*River Stream Centerline*)
2. Criar a camada com as seções transversais (*XS Cut Lines*)
3. Criar camada com a batimetria do rio
4. Criar as camadas opcionais
 - a. Linhas de delimitação da calha principal (*Bank Lines*)
 - b. Camada com os tipos de terrenos (*LandUse*) – Manning
5. Extrair geometria para seção transversal
6. Exportar geometria

Após esse pré-processamento a geometria pode ser importada para o HEC-RAS, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Geometria Importada



Fonte: elaborada pelo autor

³ <http://downloads.esri.com/archydro/HecGeoRAS/>

As simulações foram realizadas considerando uma vazão constante de 3 m³/s como condição de contorno a montante no rio Cocó (seção na Av. Dep. Paulinho Rocha) e no Canal da Aerolândia e para a foz do rio a relação de cota-tempo da Tabela 2. Com base nessa simulação, foi obtido o comportamento dinâmico da propagação da onda de maré para dentro do rio Cocó. Em seguida, foram realizadas diversas análises de sensibilidade nos modelos, para saber o impacto da variação de determinados parâmetros nos resultados.

Tabela 2 - Condição de contorno de maré

Tempo		Cota(m)
Hora	Minuto	
0	0	0,67
6	10	2,89
12	17	0,55
18	32	2,80
0	15	0,67

Fonte: Nóbrega (1998)

5.2 Modelo de Terreno

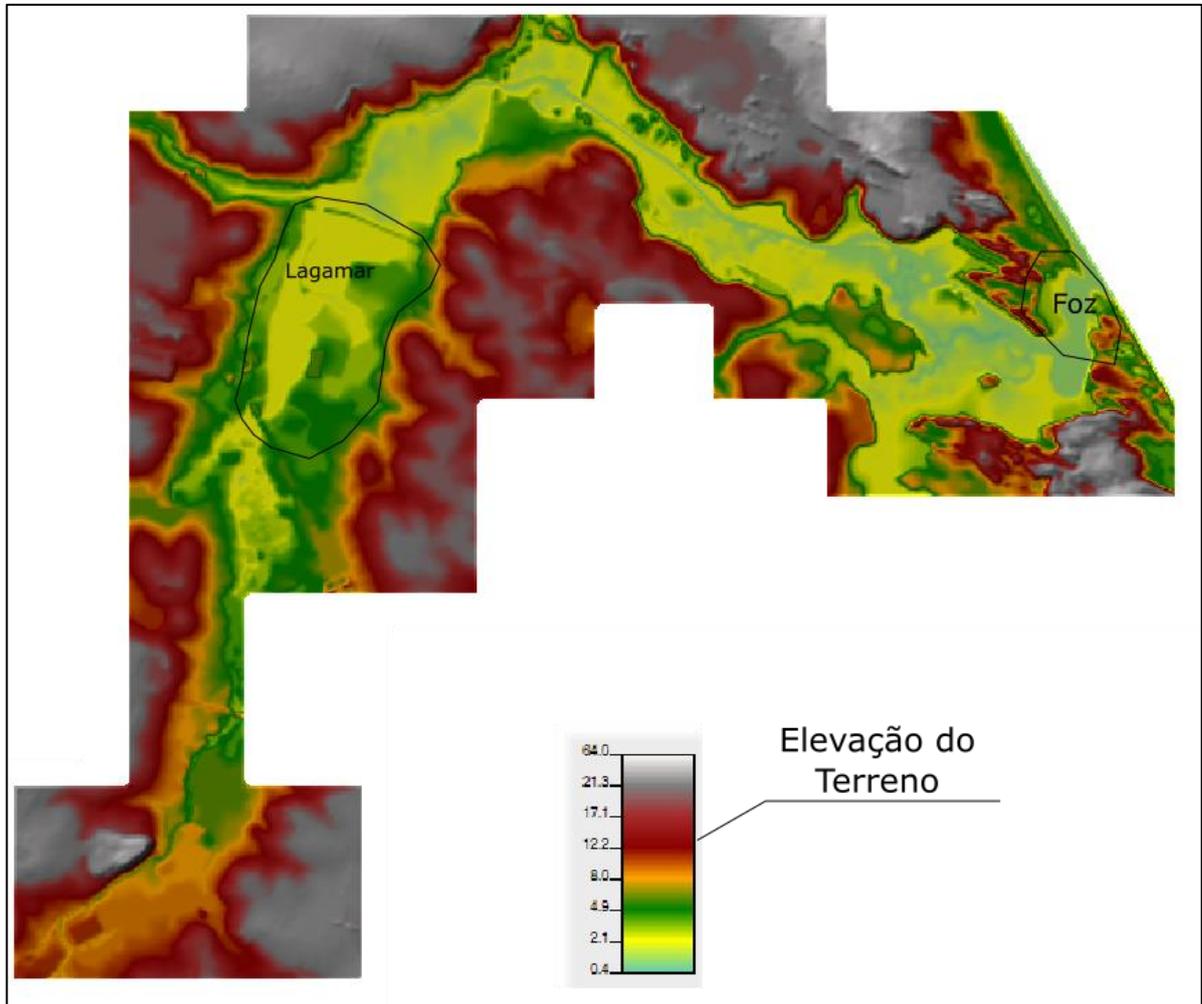
O desenvolvimento de um bom modelo de terreno é fundamental para adequada modelagem 2D ou modelagem 1D/2D. Além disso, esse modelo é necessário para realizar o mapeamento das cotas de água e a visualização dos resultados sobre uma determinada imagem de satélite para melhor apresentação.

Nesse sentido, para desenvolvimento do modelo digital, foi utilizado um conjunto de cartas com curvas de nível de 1m disponíveis para região. Essas curvas são suficientes para captar a topografia geral do Rio Cocó, exceto pela batimetria do rio e pelas planícies de inundação em determinados locais. Para gerar essas planícies de inundação foram utilizadas medidas pontuais obtidas por GPS também disponíveis nesse conjunto de cartas topográficas. Com isso, foi desenvolvido o modelo digital base apresentado na Figura 15.

Além desse modelo digital de terreno como base para a modelagem, é necessário desenvolver separadamente um modelo digital para o rio do Cocó e para o canal da Aerolândia. Para isso foram utilizados os dados de batimetria obtidos por Silva (2004). Esses dados foram transferidos do Autocad para o ArcGIS e georeferenciados para o sistema de coordenadas apropriado. Em seguida, os procedimentos do HEC-GeoRAS foram utilizados para captar a

batimetria do rio para as seções transversais desenhadas no programa e a geometria foi exportada para o HEC-RAS.

Figura 15 - Modelo de terreno base

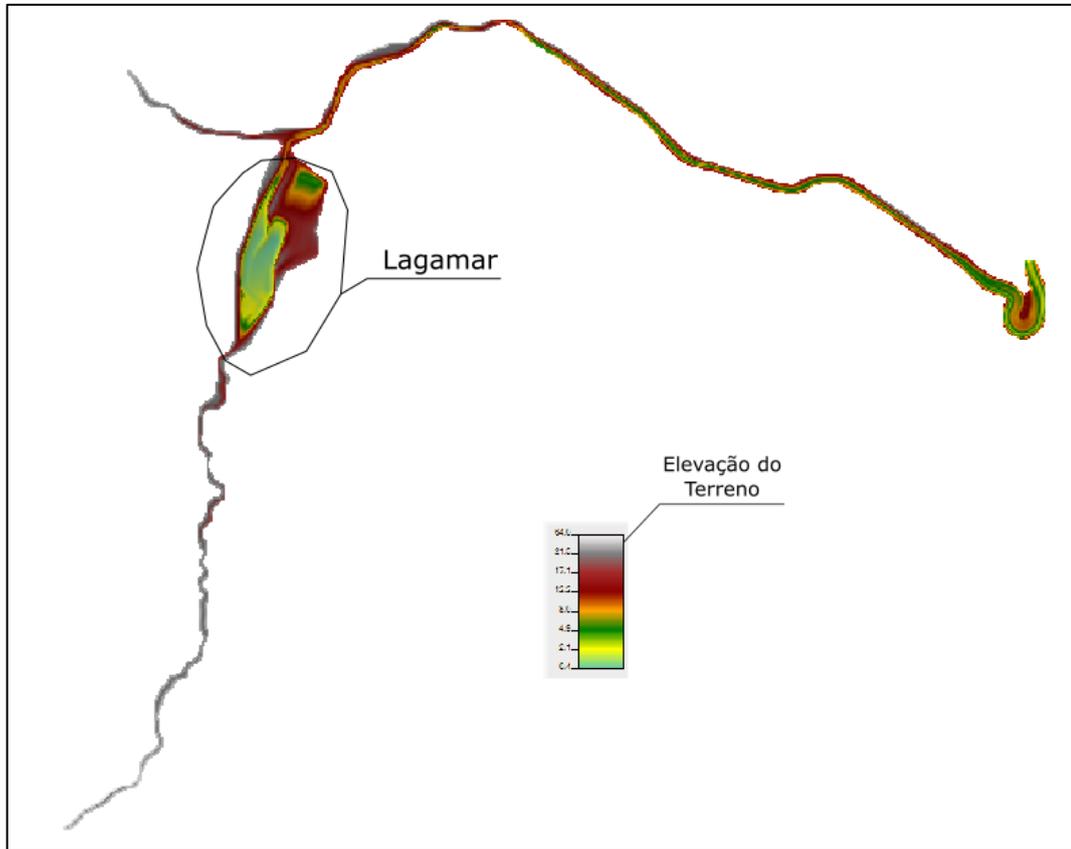


Fonte: elaborada pelo autor

No HEC-RAS os procedimentos descritos em Brunner (2014) foram utilizados para construir um modelo digital representativo para o rio Cocó e canal da Aerolândia, conforme apresentado na Figura 16.

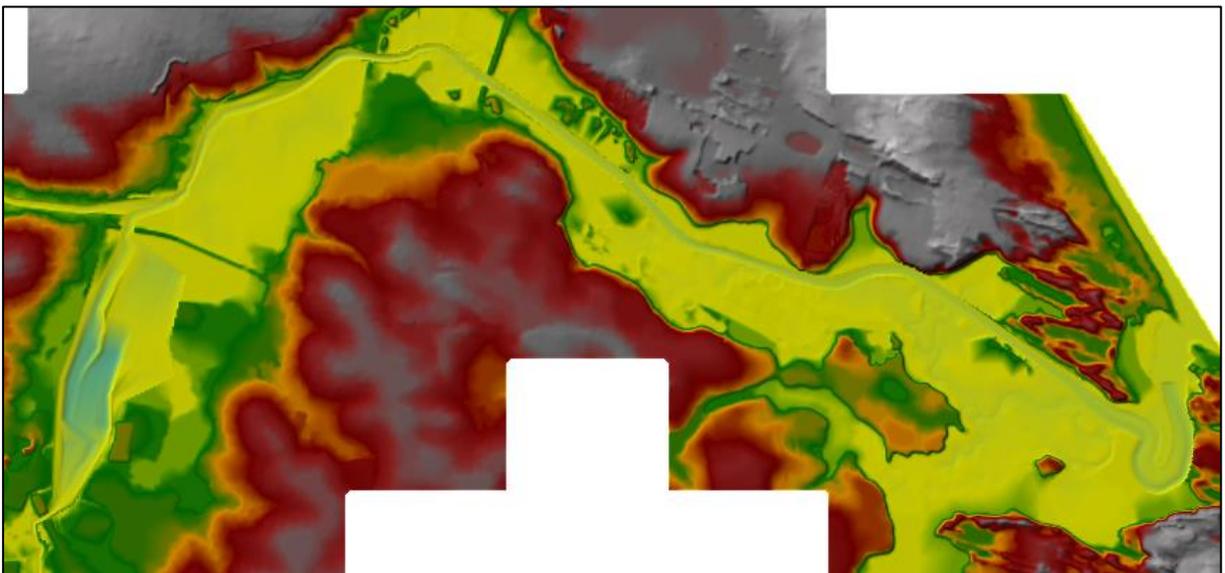
Finalmente, esses modelos digitais foram sobrepostos de modo a formar um único modelo digital de terreno, formando a base para as modelagens 1D/2D e 2D, assim como no mapeamento das cotas de água obtidas nos resultados para as imagens de satélite.

Figura 16 - Modelo de terreno para batimetria do rio Cocó e canal da Aerolândia



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 17 - Modelo de terreno completo para o rio Cocó



Fonte: elaborada pelo autor

5.3 Modelo 1D – Permanente

Os coeficientes de Manning utilizados tiveram como base os desenvolvidos pela calibração realizada por Nóbrega (1998), na qual concluiu-se que os coeficientes são variáveis ao longo do rio conforme a Tabela 3. Tendo como base esses valores, foram realizadas diversas simulações para avaliar a sensibilidade dos resultados em relação ao coeficiente de Manning.

Tabela 3 - Coeficientes de Manning calibrados por Nóbrega

Início (em relação à foz) km	Fim (em relação à foz) km	Manning
0	6,5	0.022
6,5	7,5	0.033
7,5	9,1	0.06
9,0	11,0	0.053
11,0	20	0.045

Fonte: Nóbrega (1998)

Além disso, foram avaliadas também a sensibilidade dos resultados em relação a condição de contorno a montante do rio Cocó e do canal da Aerolândia em relação à profundidade normal adotada. Conforme Brunner (2016), essas condições devem ser estabelecidas a uma distância que não afetem o ponto que se deseja calcular, já que a linha de água calculada converge conforme se distância da condição de contorno.

Já para condição de contorno a jusante (maré), como varia ao longo do tempo e a simulação no estado permanente não permite é limitada a variáveis fixas no tempo, é necessário utilizar pontos específicos da onda (valores máximo e mínimo) e obter uma envoltória de máximo e mínimo. A

Tabela 4 apresenta as simulações realizadas para o modelo permanente 1D.

Tabela 4 – Simulações para o fluxo permanente 1D

	C.C. – Aerolândia	C.C. - Cocó	C.C. – Maré - Cocó
Sim. 1	0,00029 m/m	0,00095 m/m	0,67 m
Sim. 2	0,000319 m/m	0,001045 m/m	0,67 m
Sim. 3	0,000261 m/m	0,000855 m/m	0,67 m
Sim. 4	0,000435 m/m	0,001425 m/m	0,67 m
Sim. 5	0,000145 m/m	0,000475 m/m	0,67 m
Sim. 6	0,00029 m/m	0,00095 m/m	2,89 m

Fonte: elaborada pelo autor

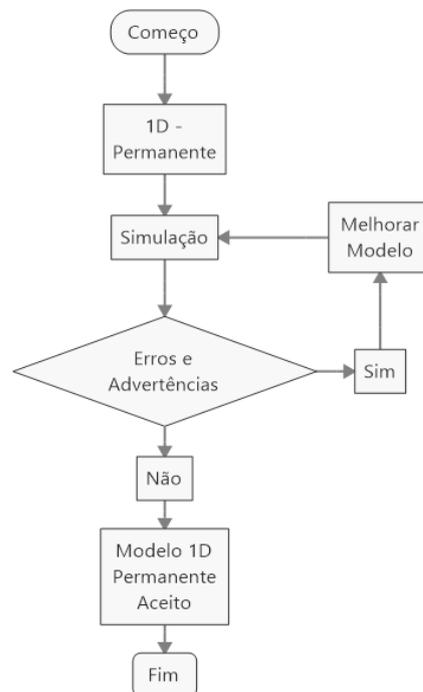
Foi adotado um processo iterativo de simulação, conforme o fluxograma da Figura 18, que apresenta o processo lógico que foi realizado para chegar no modelo final aceito para estado permanente unidimensional.

Nesse processo as advertências que apareceram com maior constância foram as seguintes:

1. A relação de capacidade de transporte entre duas seções transversais é maior que 1,4 ou menor que 0,7
2. A perda de energia entre seções transversais foi maior que 0,3m
3. A mudança da carga hidráulica dinâmica entre duas seções transversais foi maior que 0,15 m

Segundo Brunner et al. (2016), essas advertências normalmente ocorrem quando as seções transversais estão muito afastadas entre si. Para melhorar o modelo, a recomendação é um novo levantamento (para diminuir o espaçamento) ou a interpolação das seções transversais utilizando as ferramentas do HEC-RAS. Foi adotado o último procedimento, até todas essas advertências desaparecerem.

Figura 18 - Processo de modelagem em 1D, estado permanente



Fonte: elaborado pelo autor

5.4 Modelo 1D – Não Permanente

Para o modelo não-permanente é necessário entrar com a relação variável da cota no tempo como condição de contorno na foz do rio, conforme a condição de maré da Tabela 2. Além disso, é necessário indicar a condição inicial do modelo. Este procedimento pode ser estabelecido das seguintes formas:

1. Indicar a vazão e declividade normal como condição inicial. O sistema irá calcular o nível da água para condição inicial com base na metodologia do estado permanente.
2. Utilizar o resultado de uma simulação anterior como condição inicial
3. Utilizar um período de aquecimento no modelo, para preenchimento da calha principal do rio, pois a utilização de vazões nulas pode gerar instabilidades no modelo

Seguindo a metodologia similar à adotada em trabalhos anteriores, foi utilizada o método 1 para cálculo da condição inicial. Foram realizadas várias simulações para avaliar o efeito do parâmetro de Manning nos resultados, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Simulações para o fluxo não permanente 1D

	Manning – Aerolândia	Manning - Cocó
Sim. 1	0.06	0.06
Sim. 2	0.0025	0.06
Sim. 3	0.0015	0.06
Sim. 4	0.0015	0.003
Sim. 5	0.0015	0.1

Fonte: elaborada pelo autor

5.5 Modelo combinado 1D/2D – Não Permanente

O modelo combinado 1D/2D no HEC-RAS foi construído utilizando as Áreas de Fluxo 2D para modelagem bidimensional e considerando uma estrutura lateral conectando o rio 1D a malha 2D.

A estrutura lateral é utilizada para conectar o modelo 1D da calha do rio ao modelo 2D da área de fluxo. A metodologia utilizada é modelar a passagem da água entre o rio 1D e a área de fluxo 2D através de uma estrutura lateral que funciona como um vertedor. No HEC-

RAS essa transferência de água da estrutura lateral pode ser calculada utilizando a equação clássica do vertedor, na qual você entra diretamente com o coeficiente de descarga, ou pode ser calculada com base no método de Hager's, no qual o coeficiente de descarga é calculado automaticamente de forma iterativa (BRUNNER, 2014). A Tabela 6 apresenta a recomendação dos coeficientes a serem utilizados na modelagem utilizando uma estrutura lateral, conforme Brunner (2016b). No caso do modelo combinado deste trabalho, os coeficientes do vertedor da estrutura lateral variam entre 0,28 – 0,55.

Percebe-se que esses coeficientes são bem menores que os coeficiente normalmente utilizados em vertedores de barragens, sendo essa o principal erro cometido na modelagem deste tipo de estrutura (BRUNNER, 2014).

Tabela 6 – Coeficientes para estrutura lateral

O que está sendo modelado	Descrição	Limites dos coeficientes
Contenção // Estrada – 1m ou mais acima do terreno	Vertedor de largura espessa; fluxo como vertedor	0,83 – 1,43
Contenção // Estrada – 0,3m a 1m acima do terreno	Vertedor de largura espessa; fluxo como vertedor; facilmente submerso	0,55– 1,1
Terreno natural elevado– 0,3m a 1m acima do terreno	Não é um vertedor, mas a água deve fluir por cima para passar para área 2D	0,28 – 0,55
Terreno lateral não elevado	Vazão saindo do rio principal	0,06 – 0,28

Fonte: elaborada pelo autor

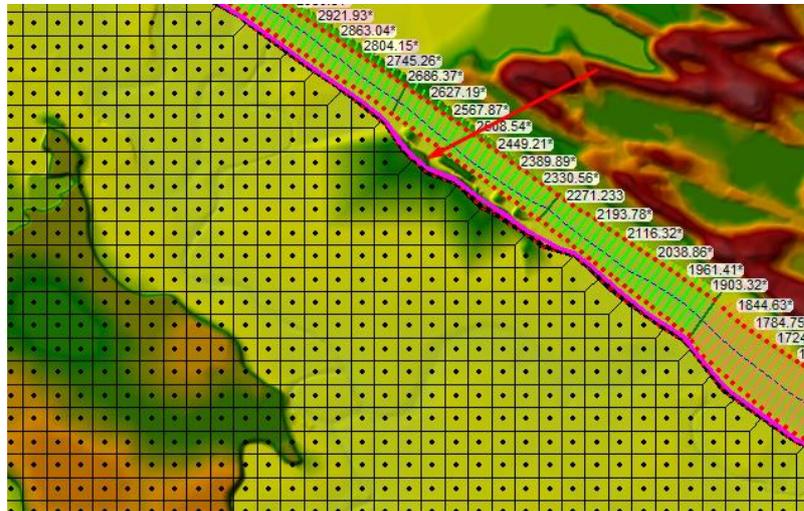
Essa estrutura lateral funciona como um vertedouro hipotético que transporta a água do modelo 1D para o modelo 2D quando a cota da água ultrapassa a cota do vertedouro, conforme Figura 19 e Figura 20. Os parâmetros básicos para definição da estrutura lateral são os seguintes:

- Largura do vertedor: define a espessura ou largura do vertedouro para a estrutura lateral
- Método de cálculo: equação clássica ou equação de Haeger's
- Coeficiente de descarga do vertedor
- Forma do vertedor

Já para área de fluxo 2D os principais parâmetros para modelagem são os seguintes:

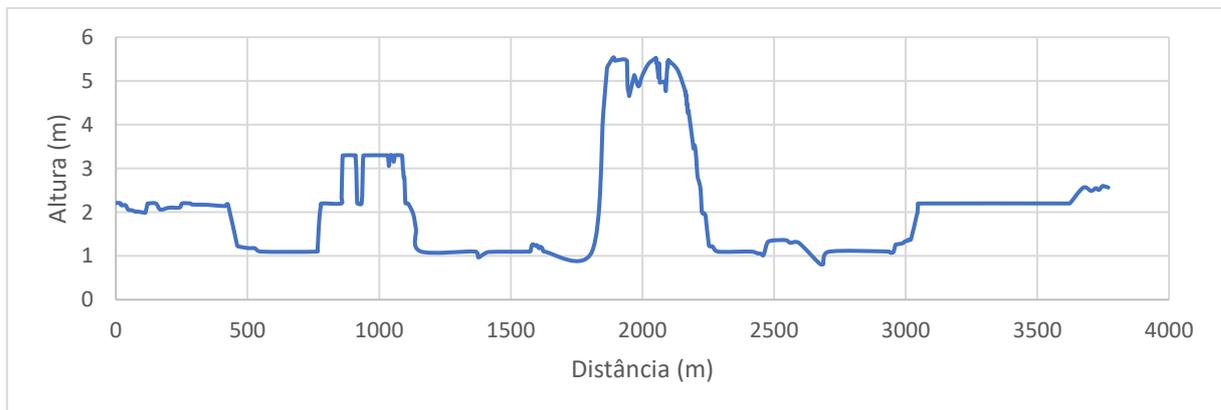
- Coeficiente de Manning para região
- Tamanho das Células da malha

Figura 19 - Modelo Combinado 1D/2D



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 20 - Estrutura lateral conectando rio e área 2D – jusante do Lagamar



Fonte: elaborada pelo autor

Uma análise de sensibilidade foi realizada para avaliar o impacto na mudança de determinados parâmetros do modelo e avaliar, de forma indireta, a incerteza nos resultados. A Tabela 7 apresenta um resumo das simulações realizadas. Os parâmetros são os seguintes: *Manning 2D/Cél. Comp.* representa o coeficiente de Manning utilizado na planície de inundação e o tamanho da célula computacional utilizada. *L. Vertedor* representa a largura do vertedor utilizada para fazer a conexão entre calha principal e a planície de inundação. *Coef. Vert.* representa o coeficiente do vertedor utilizado na conexão entre o modelo 1D e o modelo 2D. *Nº Áreas 2D* representa o número de áreas 2D utilizadas para simular a planície de

inundação. Manning 1D representa o coeficiente de Manning utilizado no modelo 1D da calha principal do rio.

Tabela 7 - Simulações para o modelo combinado 1D/2D

	Manning 2D / Cél. Comp.	L. Vertedor	Coef. Vert.	Nº Áreas 2D	Manning 1D
Sim. 1	0,1 / 50x50	1m	0,41	1,2	0,1 – 0,03 – 0,1
Sim. 2	0,1 / 50x50	5m	0,41	1,2	0,1 – 0,03 – 0,1
Sim. 3	0,1 / 50x50	1m	0,41	1,2	0,1 – 0,1 – 0,1
Sim. 4	0,2 / 50x50	1m	0,41	1,2	0,1 – 0,03 – 0,1
Sim. 5	0,1 / 50x50	1m	0,41	1,2,3,4,5	0,1 – 0,03 – 0,1
Sim. 6	0,1 / 50x50	1m	0,6	1,2	0,1 – 0,03 – 0,1
Sim. 7	0,1 / 50x50	1m	0,2	1,2	0,1 – 0,03 – 0,1
Sim. 8	0,1 / 100x100	1m	0,41	1,2	0,1 – 0,03 – 0,1
Sim. 9	0,1 / $\Delta t = 5min$	1m	0,41	1,2	0,1 – 0,03 – 0,1
Sim. 10	0,1 / 50x50	1m	0,41 (Hager's)	1,2	0,1 – 0,03 – 0,1

Fonte: elaborada pelo autor

A comparação entre a simulação 1 e 2 visou avaliar a influência da largura do vertedouro da estrutura lateral nos resultados, aumentando a largura de 1m (na simulação 1) para 5 metros (simulação 2). Já a comparação entre as simulações 1 e 3 tem como objetivo avaliar o impacto da mudança do coeficiente de Manning na calha principal do rio (mudando de 0,03 para 0,1), enquanto a comparação entre as simulações 1 e 4 avalia o impacto da mudança desse coeficiente para as áreas de fluxo 2D (mudando de 0,1 para 0,2). A comparação das simulações 1 e 5 permite avaliar o impacto da inclusão de áreas de fluxo 2D para as planícies de inundação menores no modelo combinado. A comparação das simulações 1, 6 e 7 permite avaliar a escolha do coeficiente do vertedor das estruturas laterais. A comparação das simulações 1 e 8 permite avaliar o impacto do tamanho das células computacionais utilizadas. A simulação 9 avalia qual o maior intervalo de tempo computacional que pode ser utilizado sem fazer o modelo ficar instável. Finalmente, a simulação 10 avalia a utilização no método de Hager's para o cálculo do coeficiente de descarga para a estrutura lateral.

5.6 Modelo 2D – Não Permanente

O último modelo na hierarquia é o modelo completo bidimensional (Figura 21), constituindo de uma única área de fluxo 2D, sem nenhum elemento relacionado com o modelo 1D (seções transversais por exemplo). No modelo 2D completo também foram aplicadas linhas de quebra (*break lines*) para forçar o alinhamento em seções críticas, como as pontes que atravessam o Rio (BRUNNER, 2016).

Para esse modelo também foi realizada uma análise de sensibilidade para os parâmetros, conforme a Tabela 8. Os principais elementos analisados foram os seguintes:

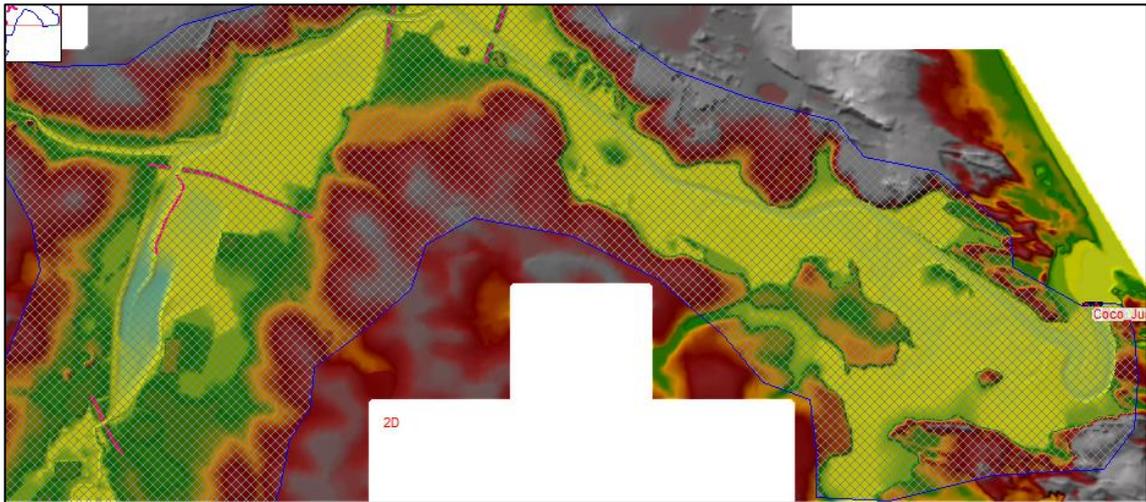
- Manning 2D: a consideração de um Manning para toda região comparando com a aplicação de um Manning variável entre o rio principal e a planície de inundação
- Tamanho da célula computacional: a adoção de diferentes tamanhos para as células computacionais e seu impacto na estabilidade e nos resultados
- Intervalo de cálculo computacional: adoção de um intervalo de tempo maior e análise do impacto na estabilidade e nos resultados

Tabela 8 - Simulações para o modelo 2D

	Manning 2D - Planície	Manning 2D – Rio	Tamanho - Cél Comp.	Δt	Alinhamento ao rio	Método
Sim. 1	0,1	0,03	50x50	1 min	Não	Difusão
Sim. 2	0,1	0,06	50x50	1 min	Não	Difusão
Sim. 3	0,2	0,03	50x50	1 min	Não	Difusão
Sim. 4	0,1	0,03	25x25	1 min	Não	Difusão
Sim. 5	0,1	0,03	100x100	1 min	Não	Difusão
Sim. 6	0,1	0,03	200x200	1 min	Não	Difusão
Sim. 7	0,1	0,03	300x300	1 min	Não	Difusão
Sim. 8	0,1	0,03	50x50	1 min	Sim	Difusão
Sim. 9	0,1	0,03	50x50	30 min	Não	Difusão
Sim. 10	0,1	0,03	50x50	1 min	Não	Completo

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 21 - Modelo completo 2D



Fonte: elaborada pelo autor

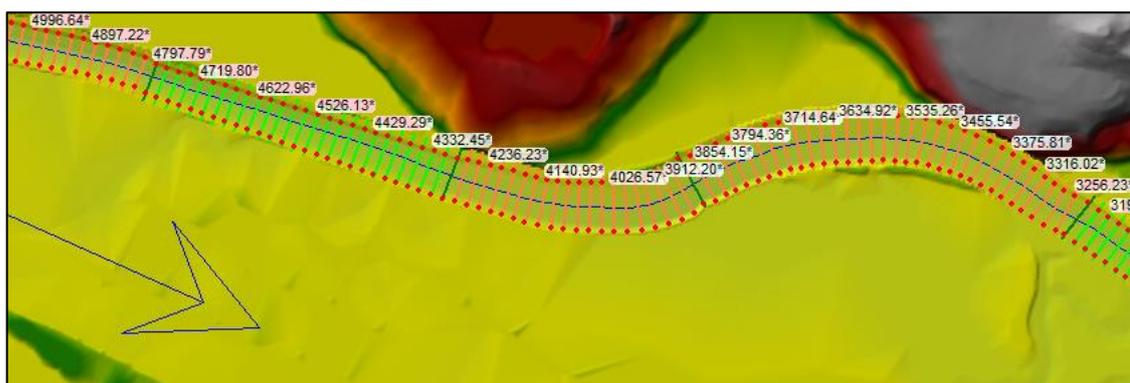
A comparação entre a simulação 1 e 2 tem como objetivo avaliar a influência do coeficiente de Manning ao longo do rio. A comparação entre a simulação 1 e 3 tem como objetivo avaliar a influência do coeficiente de Manning da planície de inundação. A comparação entre a simulação 1 e 4 tem como objetivo avaliar o impacto da redução no tamanho da célula computacional. As simulações 5 a 7 avaliam o impacto do aumento no tamanho da célula computacional nos resultados e na estabilidade do modelo. A simulação 8 avaliar a utilização da linha de quebra (*break line*) para forçar o alinhamento das células de forma similar a uma estrutura lateral no modelo combinado, conforme recomendado pelo manual. A simulação 9 avaliar o aumento no tempo computacional nos resultados e na estabilidade do modelo. A simulação 10 avaliar a utilização das equações completas do modelo 2D (*full shallow water equations*).

6 RESULTADOS

6.1 Modelo permanente – 1D

Durante o processo de simulação foi necessário realizar interpolações entre as seções transversais originais para remoção dos alertas, indicando um grande espaçamento entre as seções transversais originais.

Figura 22 – Interpolação das seções transversais

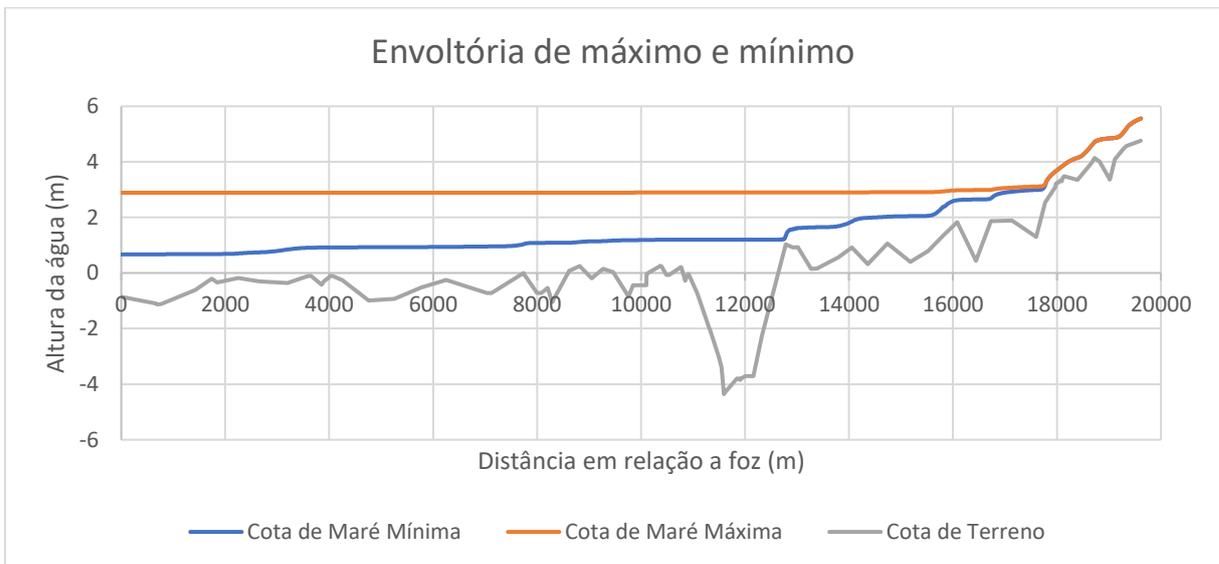


Fonte: elaborada pelo autor

No Gráfico 1 são apresentadas as envoltórias de máximo e mínimo para o Rio Coco calculadas respectivamente para as cargas hidráulicas de 2,89m e 0,67m. Como para o regime permanente não é possível simular diretamente a propagação de onda de cheia no rio, a melhor alternativa para esse modelo é a obtenção da envoltória para a cota máximo e mínima de maré. Para ambos os casos foi considerado uma vazão constante de 3 m³/s a montante do Rio Cocó e do Canal da Aerolândia.

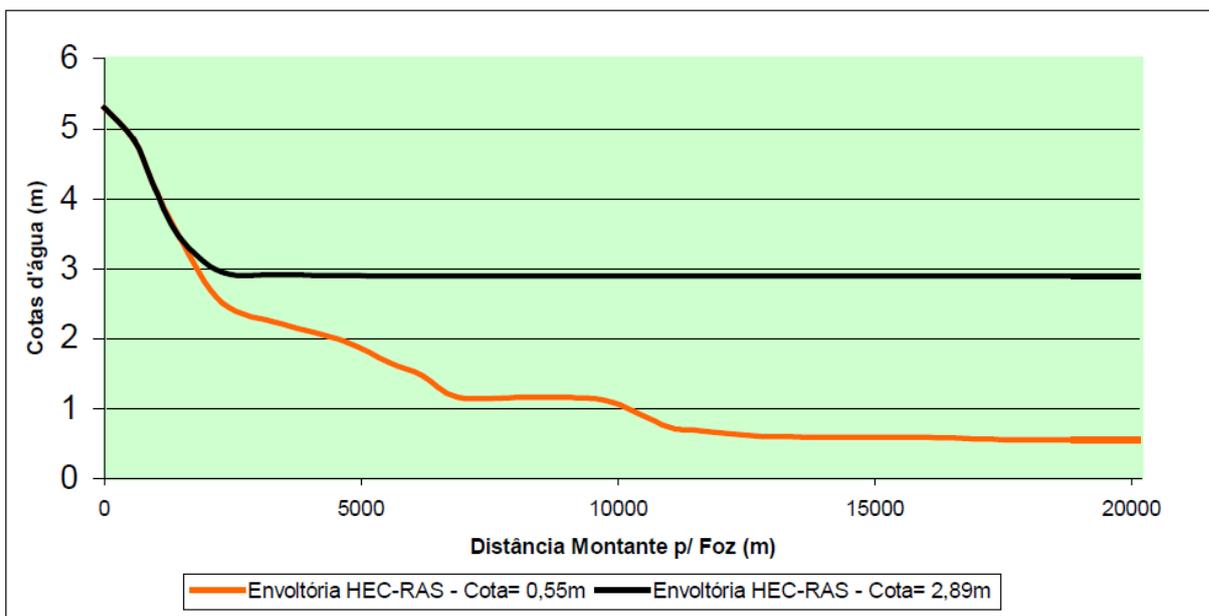
Ressalta-se que a simulação para carga hidráulica de 2,89m fez com que boa parte das seções transversais à jusante do lagamar fossem extrapoladas, indicando a necessidade de ampliação da simulação para planície de inundação (realizada para o modelo combinado 1D/2D e 2D). O impacto disso é que essas alturas de água calculadas sejam superestimadas, já que foi desconsiderado o efeito de amortecimento da planície de inundação.

Gráfico 1- Envoltória de máximo e mínimos para o regime permanente



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 23 - Resultado obtido por Ribeiro (2005) para mesma simulação



Fonte: Ribeiro (2005)

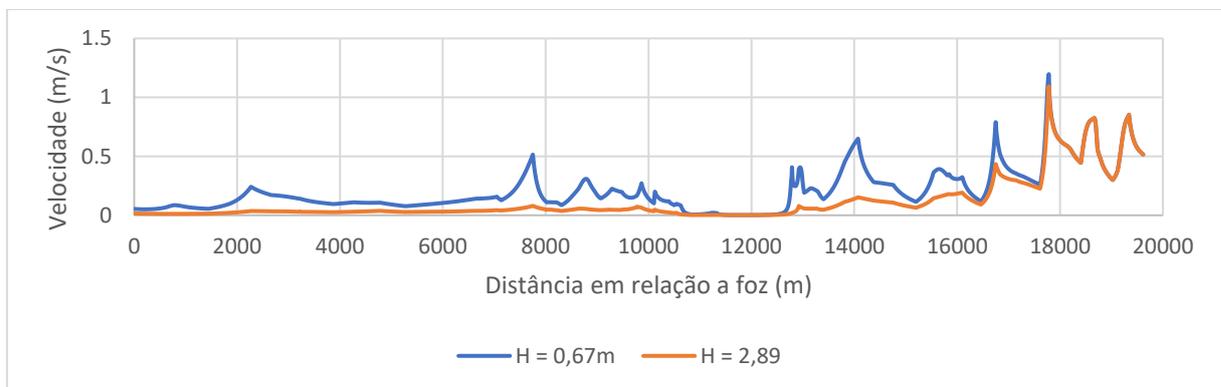
A Figura 23 apresenta o resultado obtido por Ribeiro (2005) para a mesma simulação. Podemos perceber que os resultados obtidos são bastantes similares, só que o gráfico está invertido em relação ao eixo de referência horizontal.

Ainda, a condição de contorno inicial a montante para o Rio Cocó foi de altura normal para uma declividade de $S = 0,00095$ e para o canal da Aerolândia de $S = 0,00029$. Uma análise de sensibilidade foi realizada para a condição de contorno a montante do Rio Cocó

e do canal da Aerolândia, já que esses valores carregam elevada incerteza em sua estimativa. Apesar de ser realizadas simulações com diferentes declividades para estimativa da altura normal, não foi observada nenhuma diferença nos resultados, indicando que essas condições de contorno não têm grande influência.

O Gráfico 2 mostra o perfil de velocidade para a cota mínima e cota máxima no regime permanente. É possível perceber que o regime não fornece os valores de velocidade negativa que se espera obter durante o processo de elevação de maré, que ocasiona uma onda que se propaga no sentido contrário ao fluxo normal do rio.

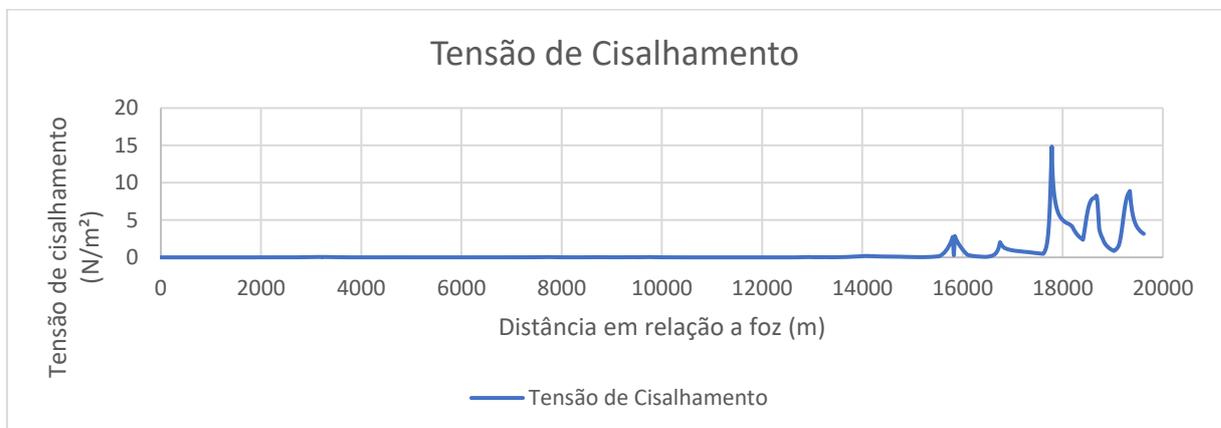
Gráfico 2- Perfis de velocidade



Fonte: elaborada pelo autor

Já o Gráfico 3 mostra a variação da tensão de cisalhamento ao longo do Rio Cocó. Percebe-se que os trechos iniciais a montante no Rio possuem uma tensão cisalhante positiva, enquanto que para os trechos da condição de maré até a jusante do Lagamar apresentam tensões de cisalhamento nula. Como para cota máxima e cota mínima os resultados obtidos forma similares, mostrou-se apenas um único gráfico.

Gráfico 3- Tensão de cisalhamento

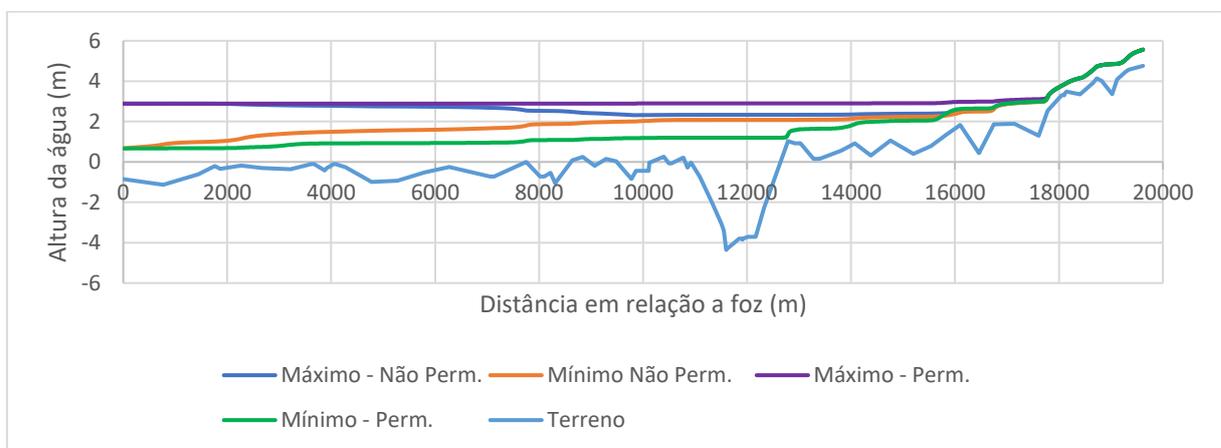


Fonte: elaborado pelo autor

6.2 Modelo não permanente – 1D

Na simulação não permanente para condição de contorno de maré é possível obter os perfis da cota de água para diferentes tempos. No Gráfico 4 temos os perfis de máximo e mínimo para o regime permanente e regime não permanente. Percebe-se que há uma diferença da região central do rio, sendo que a cota máxima do regime permanente é superestimada em relação ao do não permanente. De maneira similar, a cota mínima do regime permanente é menor que a do regime não permanente.

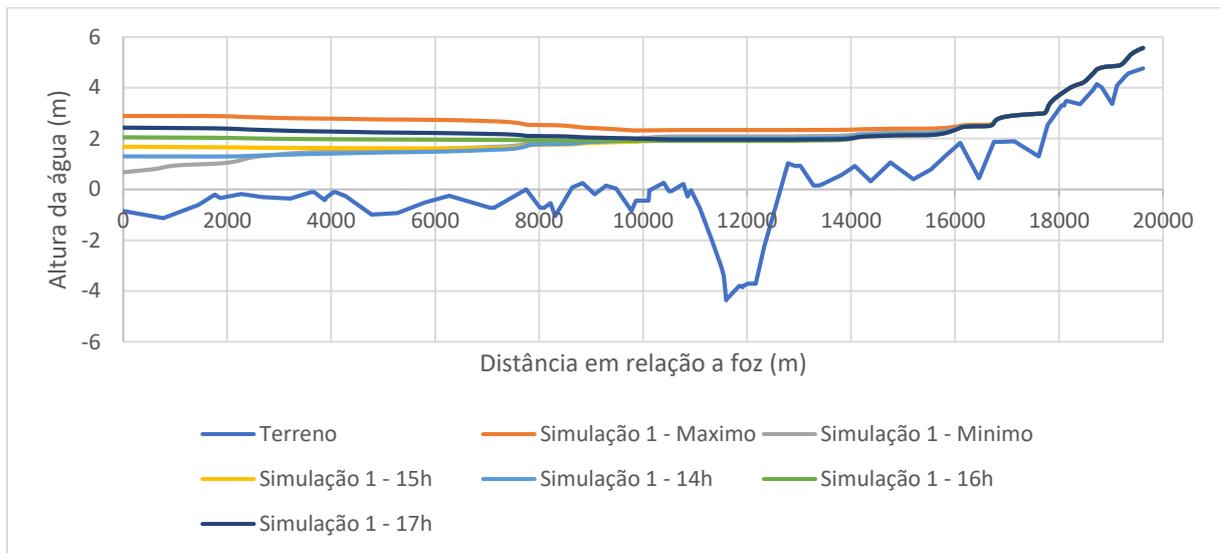
Gráfico 4 - Perfis de máximo e mínimo



Fonte: elaborada pelo autor

No Gráfico 5 tem-se os perfis de água para diferentes passos de tempo ao longo do Rio. Primeiramente é possível identificar a evolução da variação da cota de água de maré ao longo do rio (diferente do regime permanente). Nota-se que conforme se aproxima da região do Lagamar ocorre uma convergência das linhas de água devido ao efeito de amortecimento que ocorre por causa das profundidades maiores e aumento na largura da seção transversal.

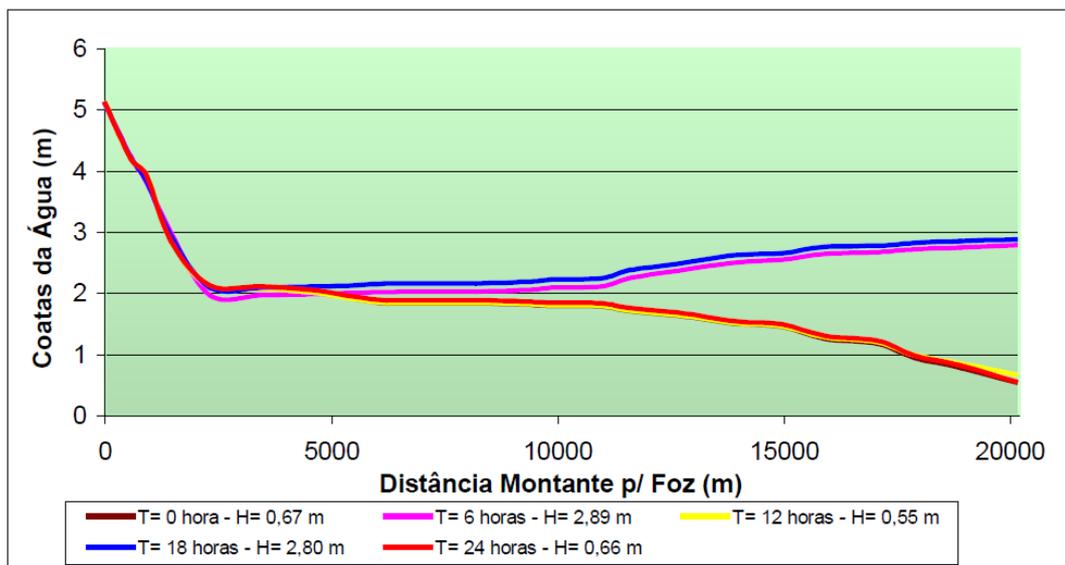
Gráfico 5 - Diferentes perfis do regime não permanente



Fonte: elaborada pelo autor

Os resultados se mostraram coerentes com os obtidos por Ribeiro (2005) utilizando o modelo dinâmico de estuário (DYNHYD5), fortalecendo os resultados obtidos na simulação com o HEC-RAS.

Figura 24 - Resultados dos perfis utilizando o modelo dinâmico de estuário



Fonte: Ribeiro (2005)

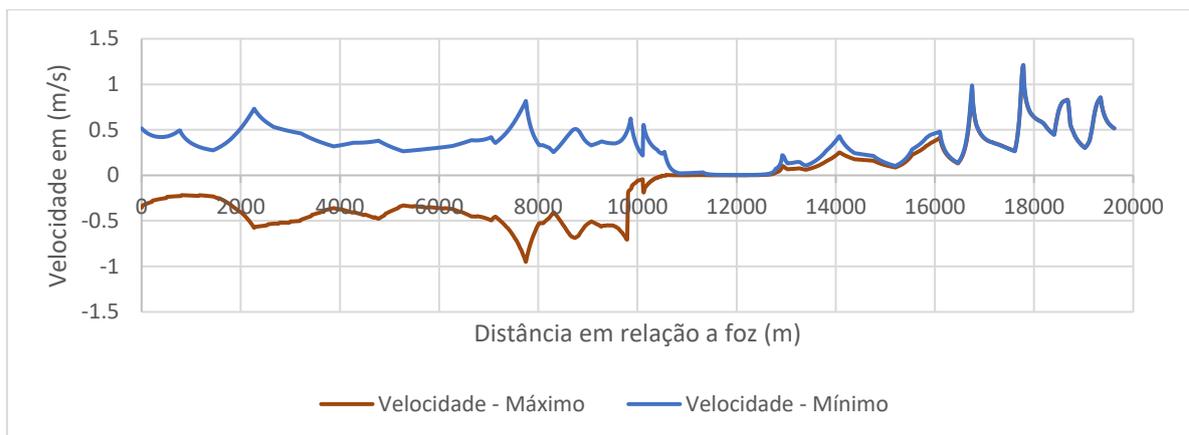
Já no Gráfico 6 apresenta-se a variação da velocidade para cota de maré de 2,89m (máximo) e de 0,67m (mínimo). Diferentemente do que ocorre nos resultados do regime permanente, é possível identificar a ocorrência de velocidades negativas (contra o fluxo normal

do rio). No caso quando a maré se encontra em seu nível máximo obtém-se um fluxo negativo no Rio até a região do Lagamar na qual a velocidade torna-se nula e mantém-se nula até a uma certa distância a montante do Lagamar. Em seguida ocorre uma convergência das velocidades, servindo como indicativo que a partir deste ponto não há um grande impacto da maré no regime hidráulico do Rio.

No Gráfico 7 é mostrada o perfil da água para diferentes parâmetros utilizados no modelo hidráulico. É possível perceber que não há grandes diferenças nos níveis de água para regiões a jusante do Lagamar, sendo o impacto maior desses parâmetros nos níveis de água para regiões a montante do Rio.

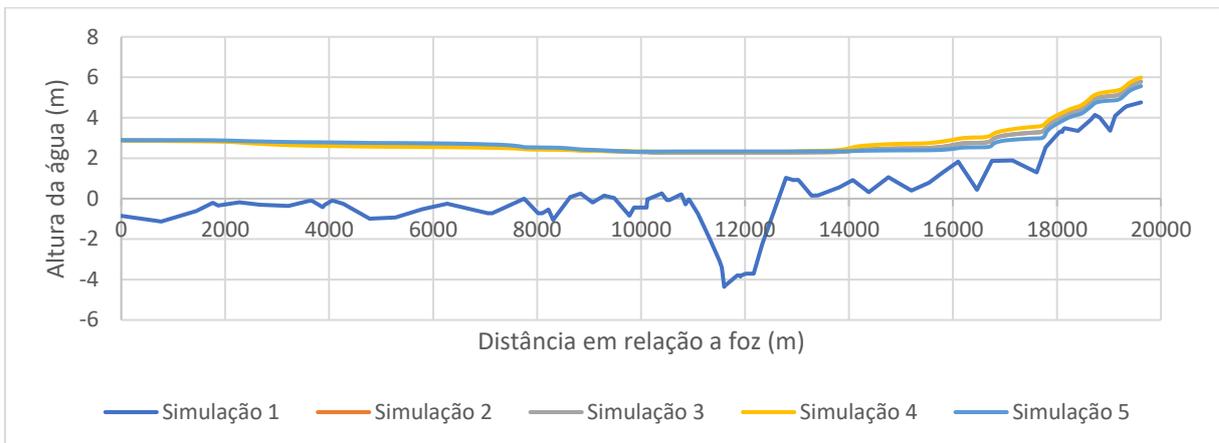
Já no Gráfico 8 tem-se a tensão de cisalhamento para o perfil de cota de água máximo na condição de maré. Percebe-se uma tensão de cisalhamento elevada para pontos a montante do Lagamar, tensão nula para região do Lagamar e uma tensão com menor intensidade a jusante do Lagamar.

Gráfico 6 - Perfis de velocidade máximo e mínimo



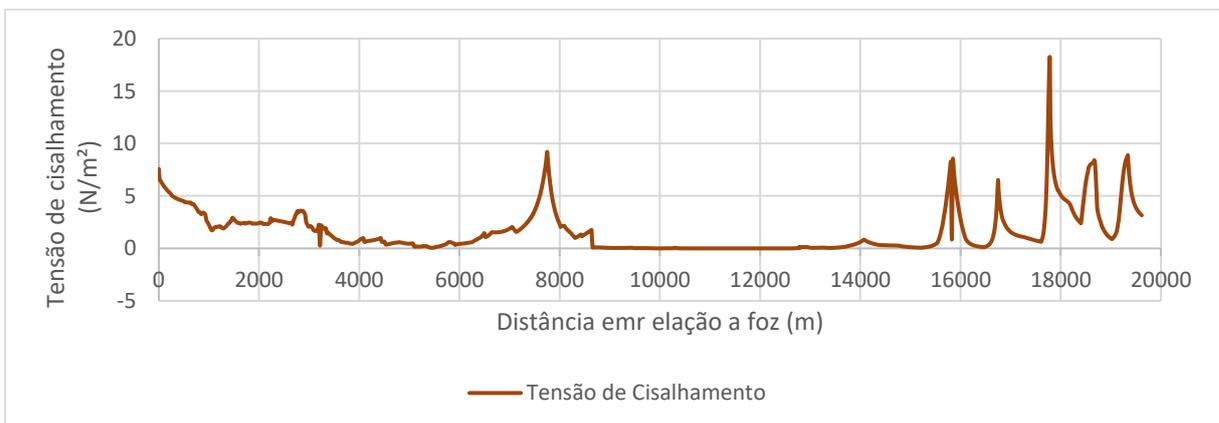
Fonte: elaborada pelo autor

Gráfico 7- Análise de sensibilidade para o regime não permanente



Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 8 - Tensão de cisalhamento

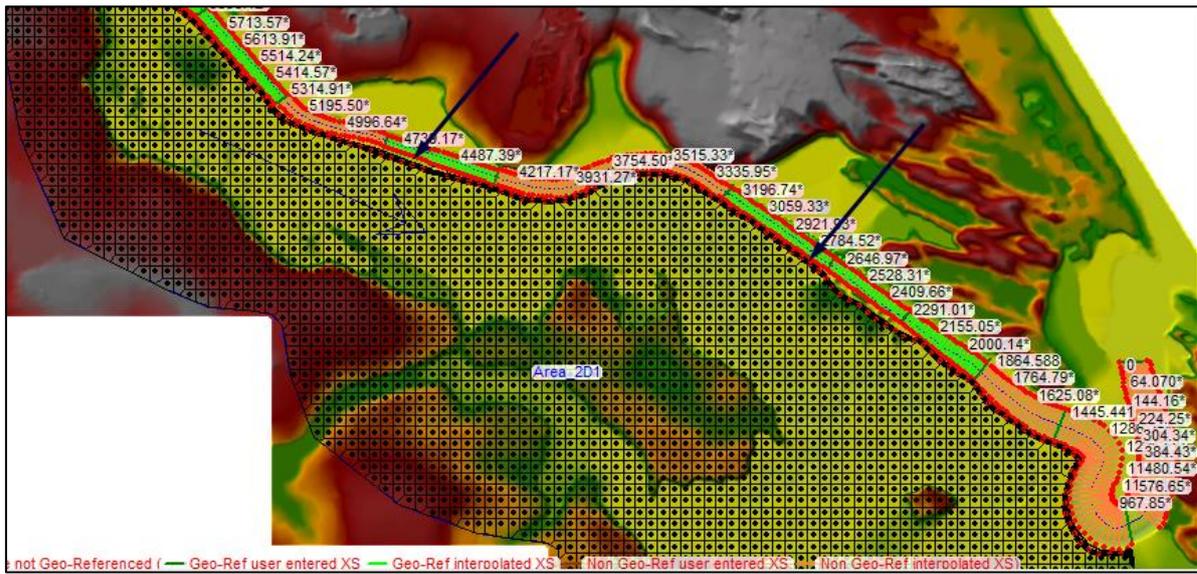


Fonte: elaborada pelo autor

6.3 Modelo combinado 1D/2D

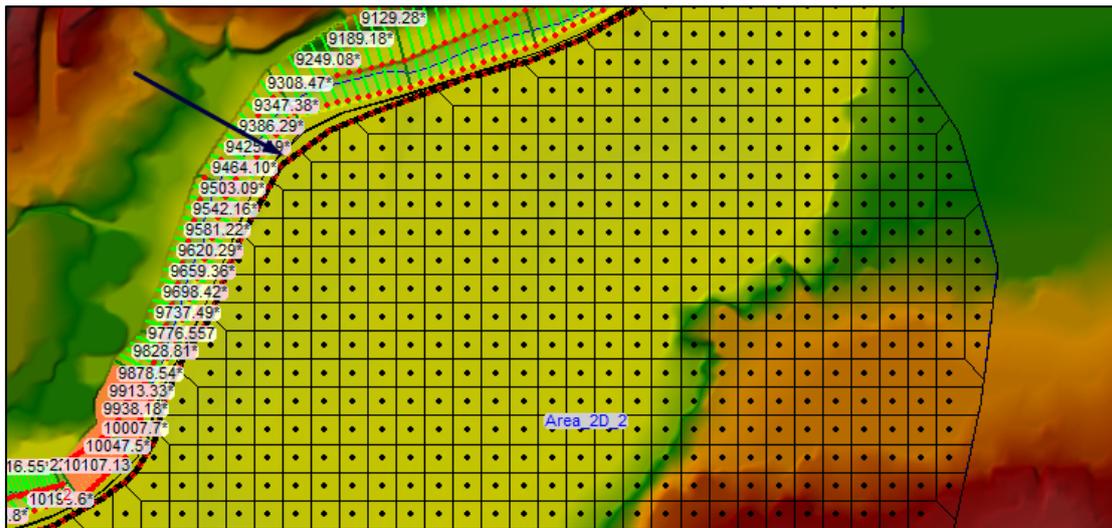
O modelo combinado 1D/2D foi desenvolvido utilizando o modelo não permanente 1D para propagação da onda de maré no Rio e uma área de fluxo 2D para propagação na planície de inundação. A conexão entre o modelo 1D e o modelo 2D é realizada através de estruturas laterais, conforme as Figura 25 e Figura 26. Essa estrutura lateral funciona como um vertedouro que transfere a água do Rio principal para a área de fluxo 2D, utilizando a equação normal de vertedouro para cálculo da vazão de transferência.

Figura 25 - Estrutura lateral



Fonte: elaborado pelo autor

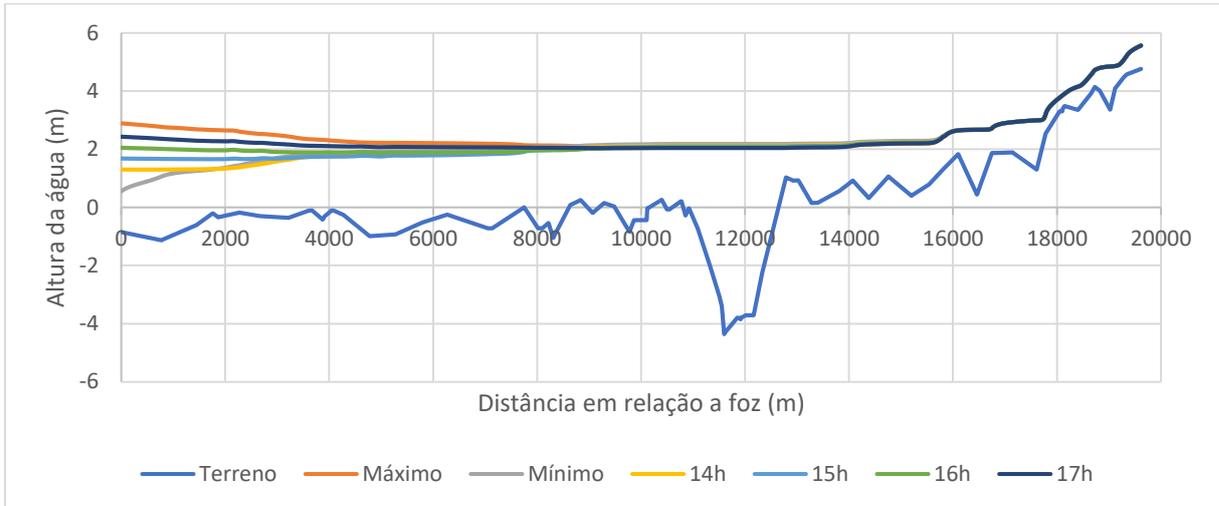
Figura 26 - Estrutura lateral



Fonte: elaborado pelo autor

No Gráfico 9 têm-se os perfis de nível da água para diferentes tempos na simulação. O resultado mostra-se coerente com o obtido pelo modelo 1D no regime não permanente. Percebe-se que o efeito de amortecimento é mais acentuado devido a consideração da planície de inundação na modelagem. Há uma convergência dos perfis de forma mais acentuada antes da região do Lagamar.

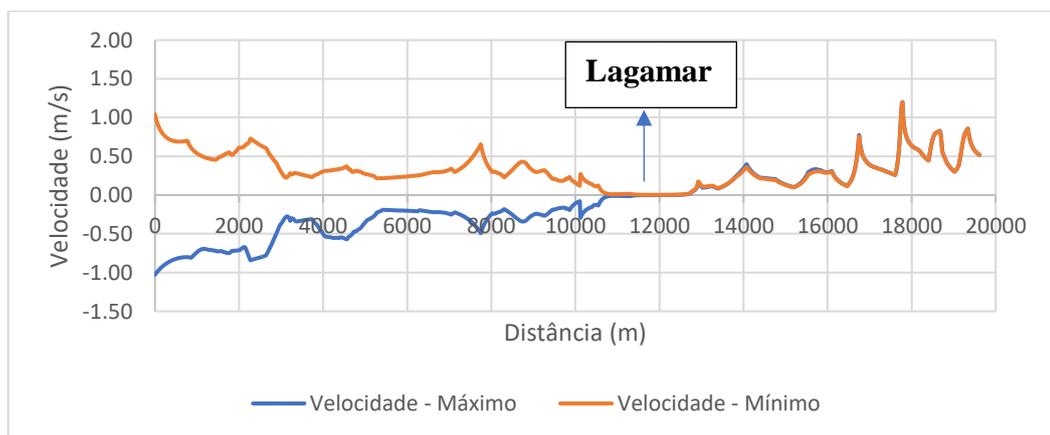
Gráfico 9 - Perfis de água para diferentes tempos



Fonte: elaborado pelo autor

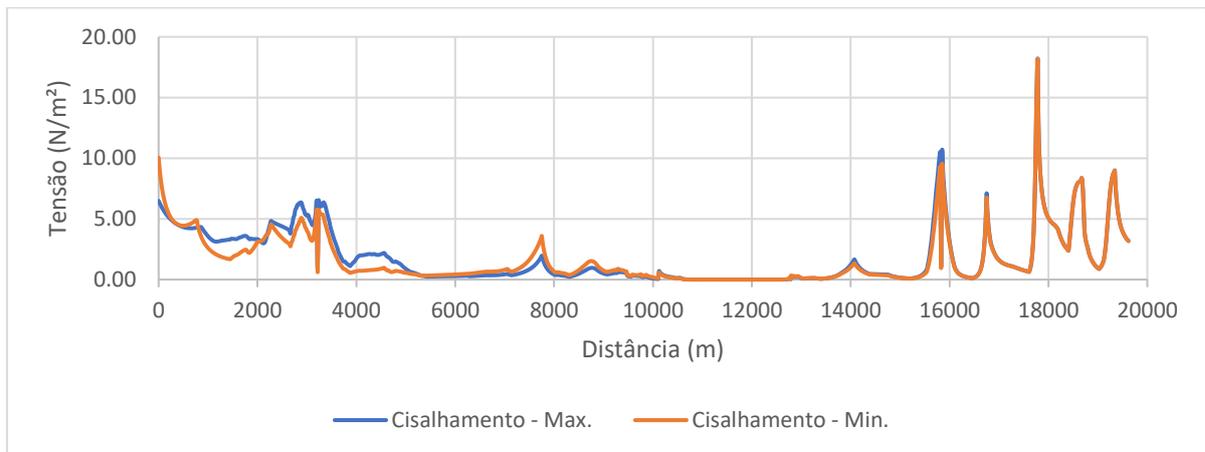
No Gráfico 10 têm-se os perfis da velocidade da água para cota de maré máxima e mínima. Percebe-se que o resultado é similar ao obtido com o modelo do regime não permanente. Já no Gráfico 11 tem-se o perfil da tensão de cisalhamento ao longo do Rio. O resultado para este parâmetro também é similar ao obtido pelo modelo 1D, mas as tensões de cisalhamento obtidas a jusante do Lagamar são mais acentuadas, enquanto a do modelo 1D são mais suaves.

Gráfico 10 - Perfil de velocidade para cota máxima e mínima



Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 11- Tensão de Cisalhamento

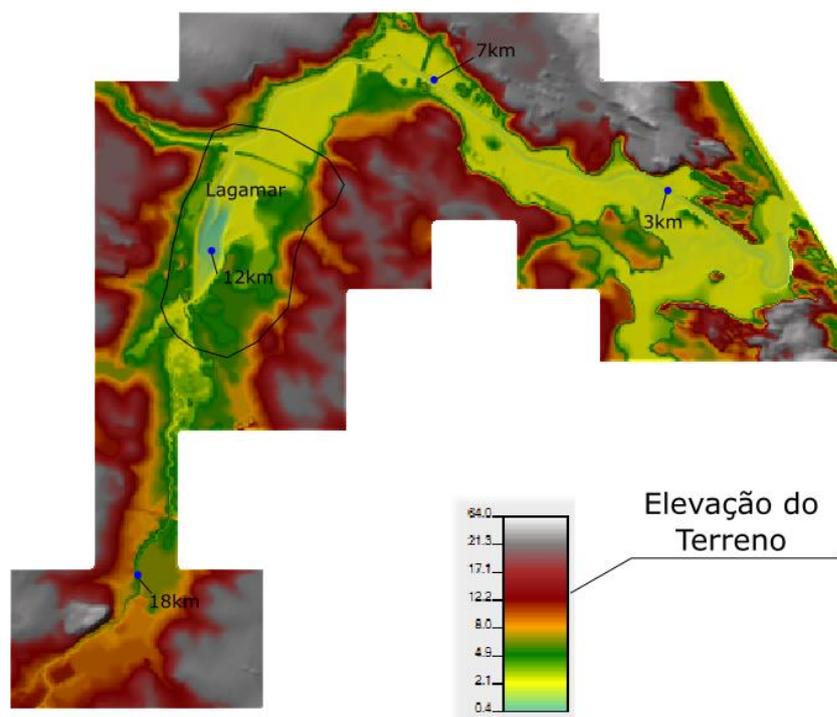


Fonte: elaborado pelo autor

Para comparação dos resultados referentes a análise de sensibilidade dos parâmetros, selecionou-se as seguinte seções (ao mesmo tempo os resultado podem ser comparados com os obtidos pelo DYNHYD5, Ribeiro (2005)):

- Ponto 01: Seção distante a 3 km da foz
- Ponto 02: Seção distante a 7 km da foz
- Ponto 03: Seção distante a 12 km da foz
- Ponto 04: Seção distante a 18 km da foz

Figura 27 - Pontos de comparação dos resultados

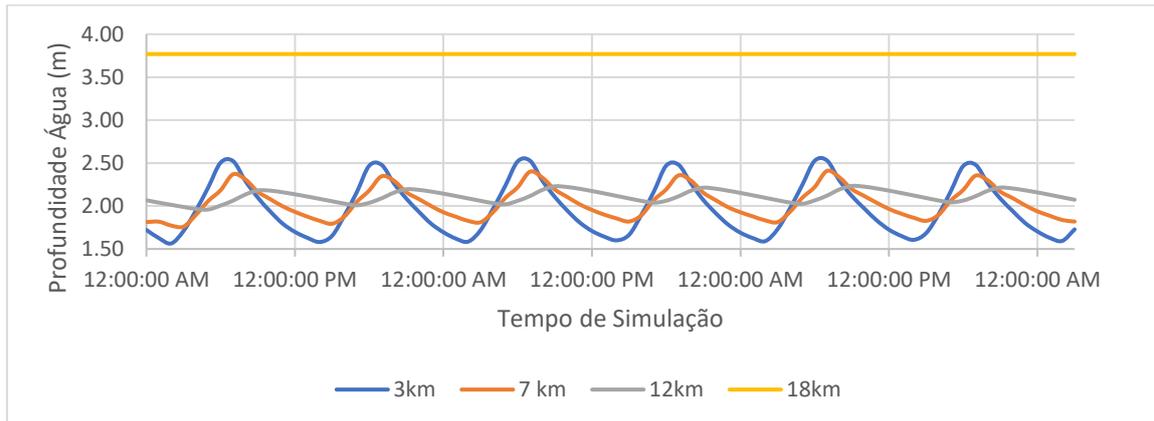


Fonte: elaborada pelo autor

O objetivo é avaliar a diferença observada entre a série temporal dos níveis de águas em diferentes pontos, comparando as simulações para análise de sensibilidade.

O Gráfico 12 apresenta o resultado para simulação 01 nesses diferentes pontos. A análise de sensibilidade será realizada em comparação com os resultados obtidos na simulação 01.

Gráfico 12 - Resultados para 3km, 7km, 12km e 18 km da simulação 01

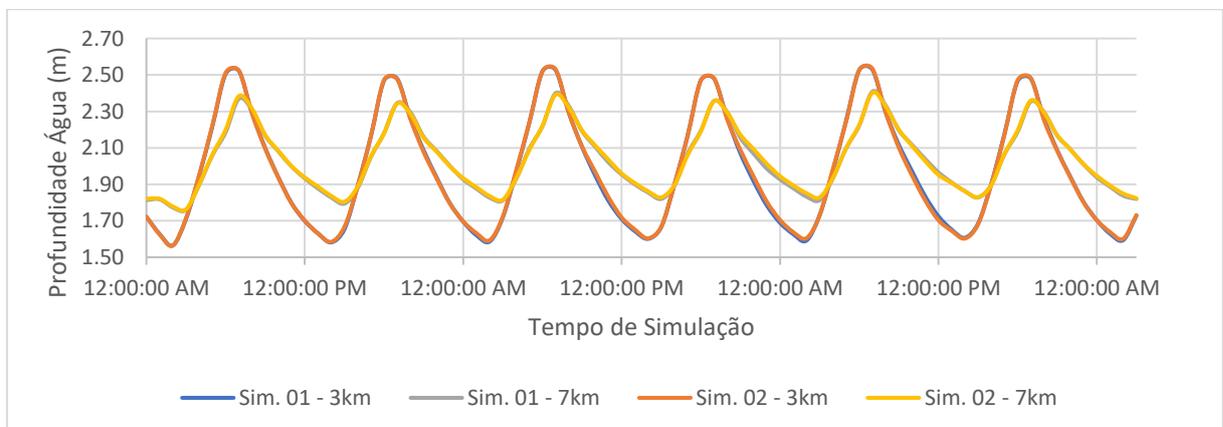


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 01 – Simulação 01 x Simulação 02 – Largura da estrutura lateral

Tem como objetivo avaliar o impacto do parâmetro da largura do vertedor nos resultados da simulação. Para simulação 01 a largura é de 1m, enquanto que para simulação 02 é de 5m. O Gráfico 13 apresenta os resultados para os pontos 01 e 02. Como não é possível perceber qualquer mudança entre gráficos, conclui-se que esse parâmetro tem pouco impacto nos resultados de nível de água. A diferença média segundo a medida RMSE (*Root Mean Square Error*) é 0,01m.

Gráfico 13 - Simulação 1 x Simulação 2 – 3km e 7 km

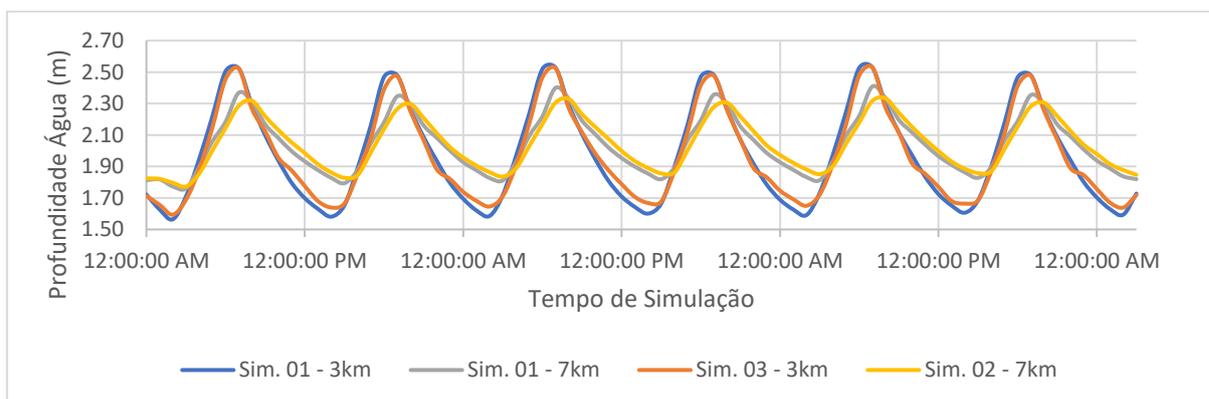


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 02 – Simulação 01 x Simulação 03 – Manning do rio principal

Tem como objetivo avaliar o impacto do parâmetro de Manning ao longo da calha principal do rio nos resultados da simulação. Para simulação 01 o coeficiente de Manning é 0,06, enquanto que para simulação 02 é de 0,1. O Gráfico 14 apresenta os resultados para os pontos 01 e 02. Para o ponto 01 (3km) é possível perceber que esse parâmetro tem um pequeno impacto, fazendo com que a cota de água seja um pouco maior. Isso é o comportamento esperado quando se aumenta o coeficiente de Manning. Por outro lado, no ponto 02 não é possível realizar qualquer distinção entre os níveis simulados, isso ocorre por causa do efeito de amortecimento do Lagamar, causando também a convergência das cotas de água. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,05m para o ponto 01 e 0,04m para o ponto 02.

Gráfico 14 - Simulação 1 x Simulação 3 – 3km e 7 km



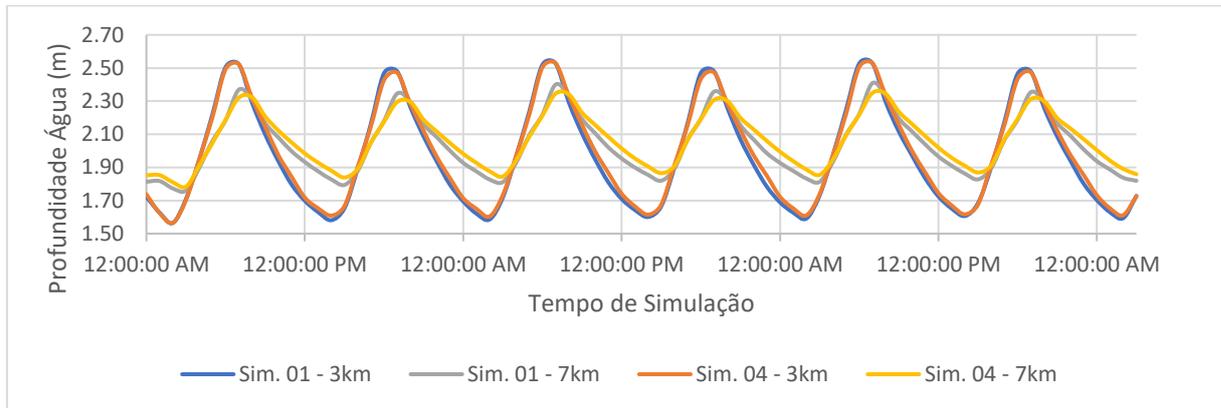
Fonte: elaborado pelo autor

Análise 03 – Simulação 01 x Simulação 04 – Manning do rio principal

Tem como objetivo avaliar o impacto do parâmetro de Manning ao longo das áreas de fluxo 2D nos resultados da simulação. Para simulação 01 o coeficiente de Manning da área de fluxo 2D é 0,1, enquanto que para simulação 04 é de 0,2. O Gráfico 15 apresenta os resultados para os pontos 01, 02 e 03. Em relação a simulação anterior, o coeficiente de Manning para planície de inundação tem um impacto superior nos resultados do modelo. O acréscimo no nível da água é impactado até o ponto 02, contudo, no ponto 03 (12km) os níveis de água já são os mesmos. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,03m para o ponto 01 e 0,04m para o ponto 02.

Considerando a incerteza combinado com a simulação anterior, pode-se dizer que o parâmetro de Manning terá um efeito da ordem de 0,1 m.

Gráfico 15 - Simulação 1 x Simulação 4 – 3km, 7 km

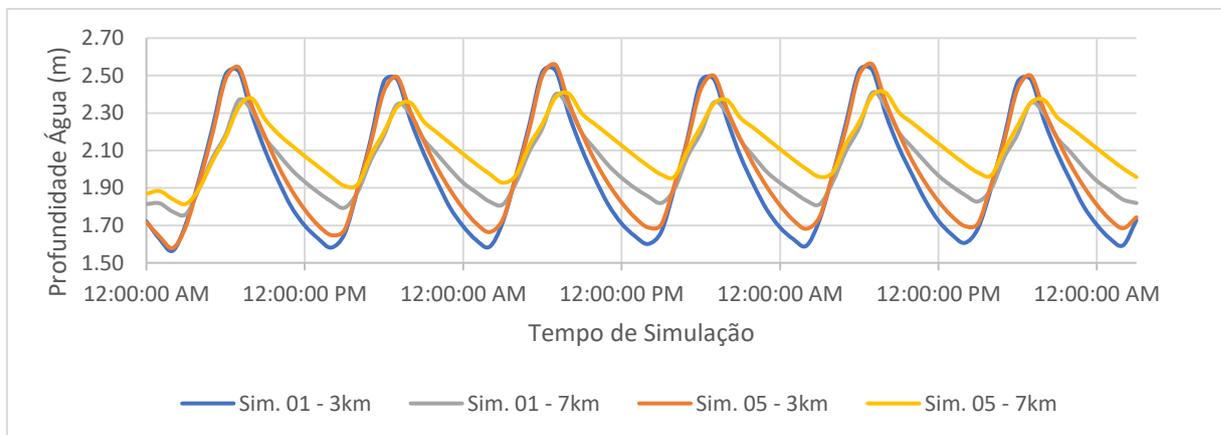


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 04– Simulação 01 x Simulação 05 – Inclusão de áreas 2D menores

Tem como objetivo avaliar o impacto da inclusão de áreas 2D menores como planície de inundação nos resultados da simulação. Para simulação 01 tem-se duas áreas de fluxo 2D, enquanto que para simulação 05 tem-se cinco áreas de fluxo 2D. O Gráfico 16 apresenta os resultados para os pontos 01, 02 e 03. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,07m para o ponto 01, 0,11m para o ponto 02.

Gráfico 16 - Simulação 1 x Simulação 5 – 3km, 7 km e 12km

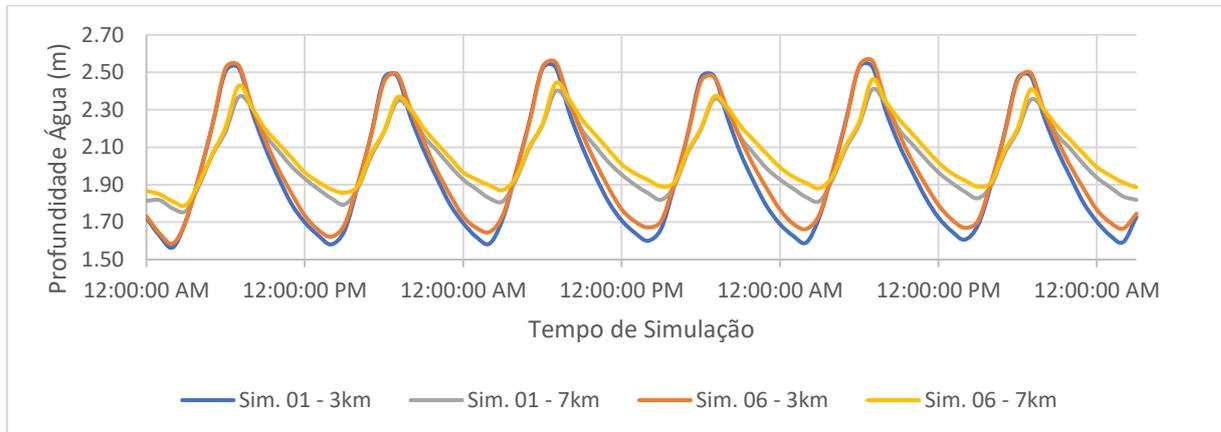


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 05– Simulação 01 x Simulação 06 – Coeficiente do vertedor

Tem como objetivo avaliar o impacto do aumento do coeficiente do vertedor da estrutura lateral nos resultados da simulação. Para simulação 01 o coeficiente adotado foi de 0,41, enquanto que para simulação 06 foi de 0,6. O Gráfico 17 apresenta os resultados para os pontos 01, 02 e 03. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,05m para o ponto 01 e 0,05m para o ponto 02.

Gráfico 17 - Simulação 1 x Simulação 6 – 3km, 7 km

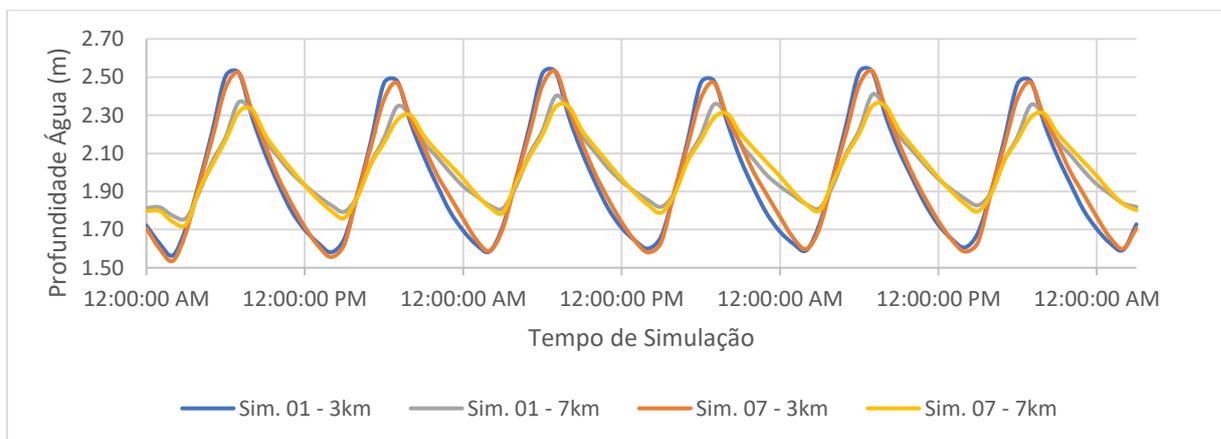


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 06– Simulação 01 x Simulação 07 – Coeficiente do vertedor

Tem como objetivo avaliar o impacto da diminuição do coeficiente do vertedor da estrutura lateral nos resultados da simulação. Para simulação 01 o coeficiente adotado foi de 0,41, enquanto que para simulação 06 foi de 0,2. O Gráfico 18 apresenta os resultados para os pontos 01, 02 e 03. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,04m para o ponto 01 e 0,03m para o ponto 02.

Gráfico 18 - Simulação 1 x Simulação 7 – 3km, 7 km

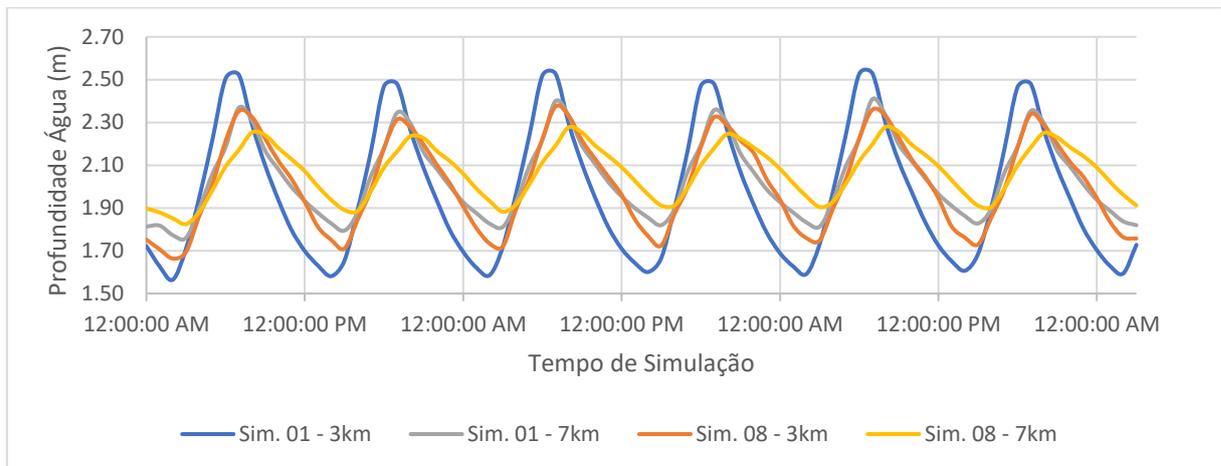


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 07– Simulação 01 x Simulação 08 – Tamanho da célula computacional

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de células computacionais maiores nos resultados. Para simulação 01 as células têm tamanho de 50mx50m, enquanto que para simulação 08 têm tamanho de 100mx100m. O Gráfico 19 apresenta os resultados para os pontos 01, 02 e 03. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,17m para o ponto 01 e 0,11m para o ponto 02.

Gráfico 19 - Simulação 1 x Simulação 8 – 3km, 7 km

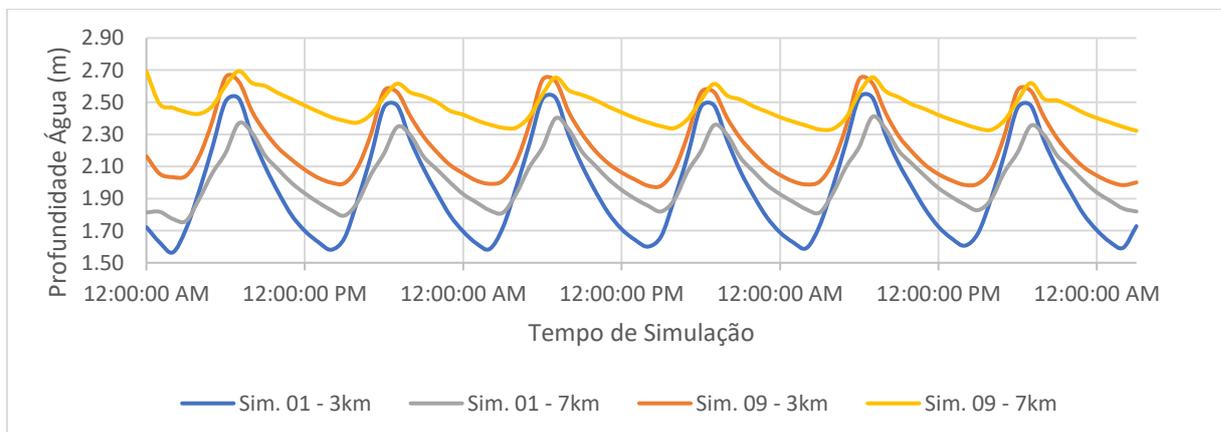


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 08– Simulação 01 x Simulação 09 – Intervalo computacional maior

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização do maior intervalo de tempo possível para o modelo sem que o mesmo cause problemas de instabilidade numérica. Para simulação 01 o Δt é igual a 1min, enquanto que para simulação 09 o Δt é igual a 5min. O Gráfico 20 apresenta os resultados para os pontos 01 e 02. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,27m para o ponto 01, 0,45m para o ponto 02 e 0,39m para o ponto 03.

Gráfico 20 - Simulação 1 x Simulação 9 – 3km, 7 km



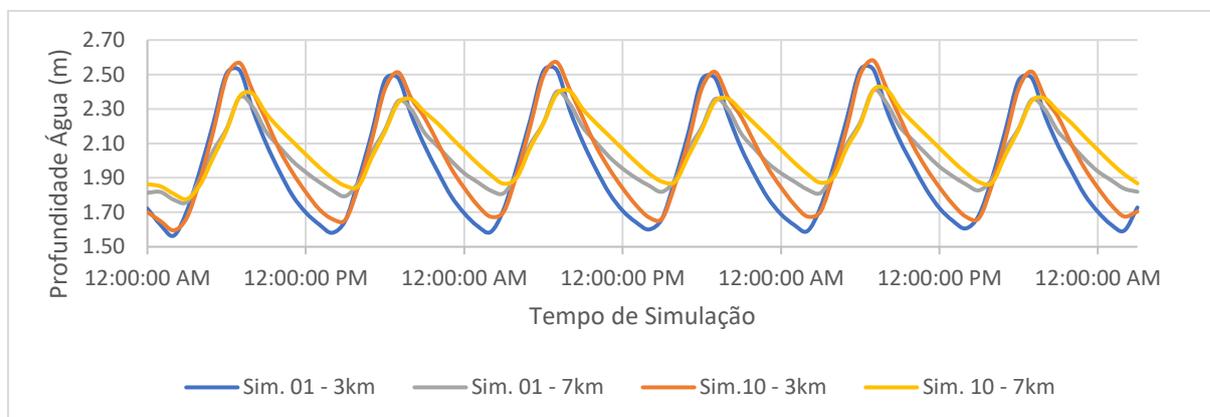
Fonte: elaborado pelo autor

Análise 09– Simulação 01 x Simulação 10 – Método de Hager's para estrutura lateral

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização do método de Hager's para o cálculo do coeficiente do vertedouro da estrutura lateral. Para simulação 01 foi utilizado a equação classifica, enquanto que para simulação 10foi utilizado o método de Hager's. O

Gráfico 21 apresenta os resultados para os pontos 01, 02 e 03. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,10m para o ponto 01 e 0,08m para o ponto 02.

Gráfico 21 - Simulação 1 x Simulação 10 – 3km, 7 km



Fonte: elaborado pelo autor

Tempos de simulação para os modelos

A Tabela 9 apresenta o resumo da duração de cada uma das simulações realizadas. Os parâmetros *Dur.* e *%E.V* representam, respectivamente, a duração total da simulação no HEC-RAS e a porcentagem de erro na conservação da massa no modelo.

Tabela 9 - Tempos de simulação

	Sim.1	Sim.2	Sim.3	Sim.4	Sim.5	Sim.6	Sim.7	Sim.8	Sim.9	Sim.10
Dur.	0:02:05	0:02:00	0:34:09	0:26:52	0:31:26	0:28:32	0:01:12	0:00:44	0:11:02	0:21:44
%E.V	7.738	5.871	4.13	8.3	0.27	14.00	2.515	17.19	21.96	3.238

6.4 Modelo 2D

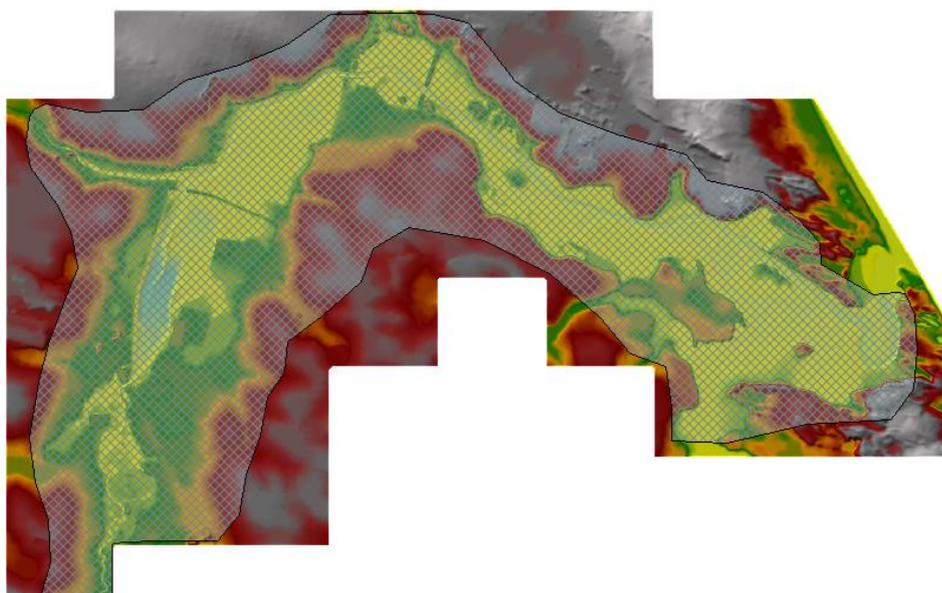
O modelo completo 2D é constituído por uma única área de fluxo 2D, sem qualquer elemento relativo a modelagem unidimensional (como seções transversais). Os parâmetros básicos para o modelo 2D são os seguintes:

- **Manning 2D:** definição do valor de Manning padrão para a área de fluxo 2D
- **Tamanho da célula computacional**
- **Modelo digital de terreno:** modelo que contém a topográfica do terreno completo (planície de inundação e da calha do rio)
- **Camada de cobrimento:** mapa com os valores de Manning variáveis que podem ser usados para redefinir o valor padrão

Na Figura 28 podemos visualizar tanto o modelo digital de terreno desenvolvido como também a área de fluxo 2D utilizada na modelagem.

Já na Figura 29 tem-se a camada de cobrimento utilizada para definir o coeficiente de Manning variável. O desenvolvimento desta camada se deu utilizando as ferramentas de classificação do ArcGIS, juntamente com o plug-in HEC-GeoRAS. A classificação foi realizada com base em uma imagem LANDSAT, na qual foi aplicado a ferramenta de classificação supervisionada. A imagem foi classificada nos seguintes grupos: água, vegetação e área urbana. No HEC-GeoRAS foi atribuído o coeficiente de Manning de 0,03 para região da água, e 0,1 para região de vegetação ou urbana.

Figura 28 - Modelo de terreno e área de fluxo 2D

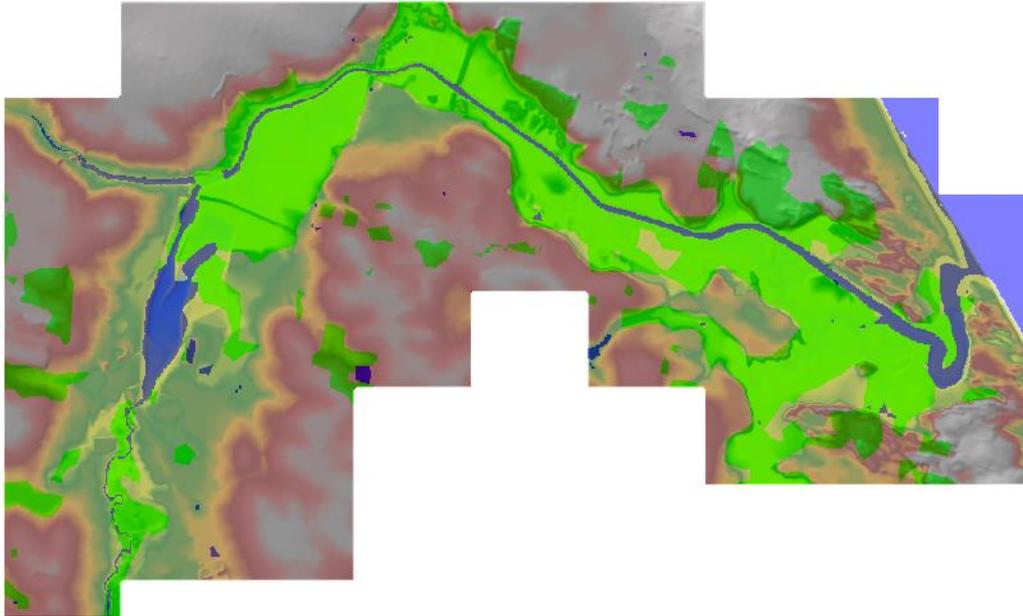


Fonte: elaborada pelo autor

O Gráfico 22 apresenta os perfis de água calculado para o modelo completo 2D. Veja que os perfis estão coerentes com os resultados anteriores, em que ocorre uma convergência para região do Lagamar. Contudo, neste modelo a convergência ocorre de maneira mais acentuada do que os anteriores.

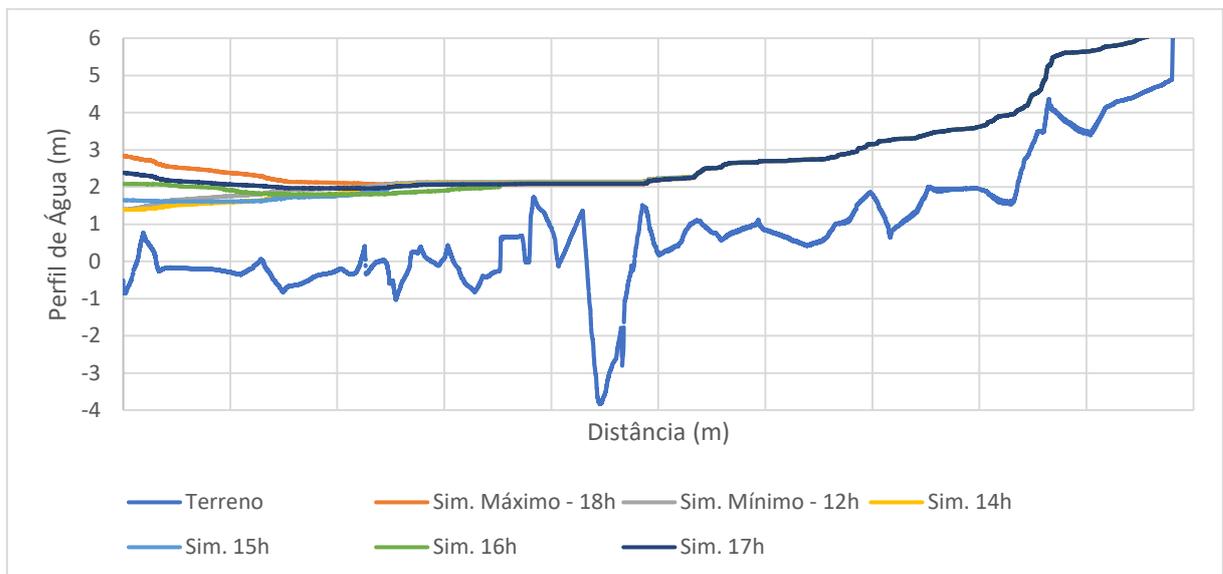
O Gráfico 23 apresenta o resultado para os perfis de velocidade para o modelo 2D. Embora o HEC-RAS não indique o sinal negativo diretamente na tabela de resultados, uma interpretação conjunto com as imagens de vetores de velocidade (Figura 30) permite identificar o sinal adequado. Percebe-se que os resultados para jusante e na região do Lagamar são similares aos obtidos pelo modelo não permanente e o modelo combinado 1D/2D. A montante do Lagamar a velocidade obtida pelo modelo 2D é menor que a obtida pelos modelos anteriores.

Figura 29 - Camada de cobrimento



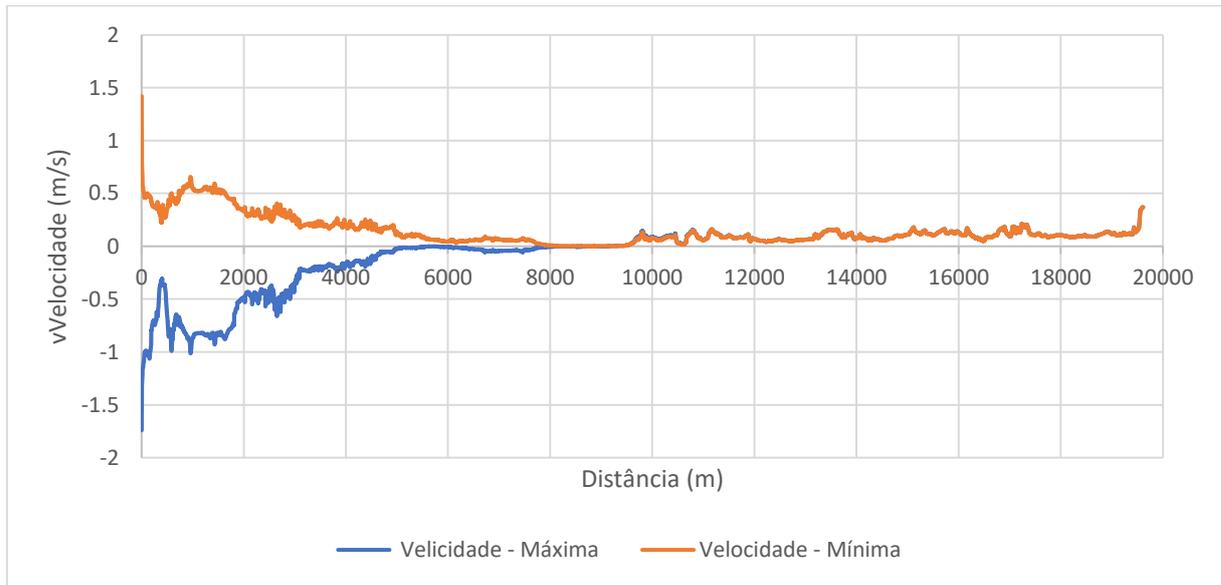
Fonte: elaborada pelo autor

Gráfico 22 - Perfis de água para o modelo 2D



Fonte: elaborado pelo autor

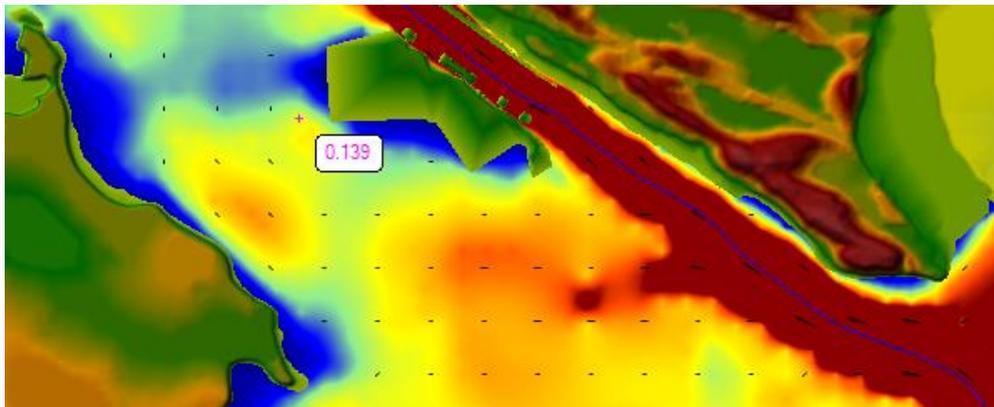
Gráfico 23 - Perfis de velocidade para cota máxima e mínima



Fonte: elaborado pelo auto

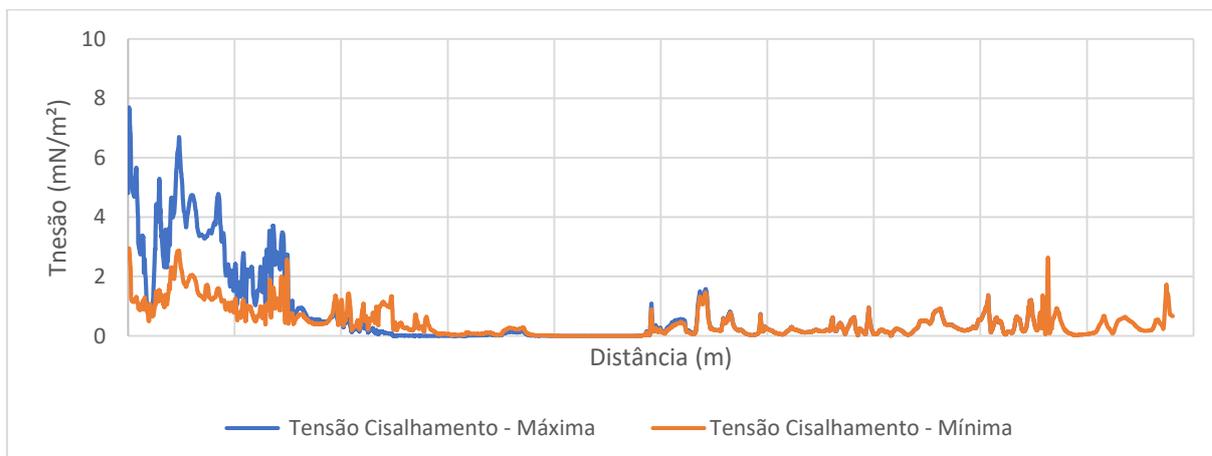
Por outro lado, o Gráfico 24 apresenta os resultados para tensão de cisalhamento para cota máxima de maré e para cota mínima de maré. Para região a montante do Lagamar, o modelo 2D deu tensões menores que os modelos anteriores e para região a jusante do Lagamar as tensões são maiores.

Figura 30 - Vetor de velocidades no modelo 2D



Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 24 - Tensão de Cisalhamento



Fonte: elaborado pelo autor

Análise 01 – Simulação 01 x Simulação 02 – Manning 2D para o Rio Principal

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de um coeficiente de Manning maior para região do Rio Cocó. Para simulação 01 o coeficiente de Manning é 0,03, enquanto que para simulação 02 é 0,06. O Gráfico 25 apresenta os resultados para os pontos 01, 02. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,11m para o ponto 01, 0,10m para o ponto 02.

Gráfico 25 - Resultados da simulação 2 para 3km e 7km



Fonte: elaborado pelo autor

Análise 02 – Simulação 01 x Simulação 03 – Manning 2D para a planície de inundação

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de um coeficiente de Manning maior para planície de inundação do Rio Cocó. Para simulação 01 o coeficiente de Manning é 0,1, enquanto que para simulação 02 é 0,2. O Gráfico 26 apresenta os resultados para os pontos 01, 02. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,02m para o ponto 01, 0,02m para o ponto 02.

Gráfico 26 - Resultados da simulação 3 para 3km e 7km

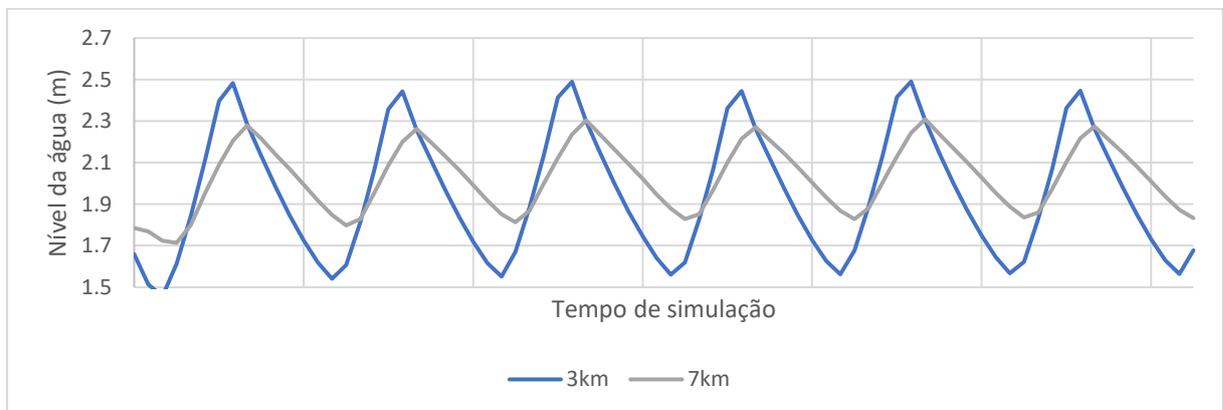


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 03 – Simulação 01 x Simulação 04 – Tamanho da célula computacional

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de uma célula computacional menor nos resultados. Para simulação 01 a célula é de 50mx50m, enquanto que para simulação 02 é 25mx25m. O Gráfico 27 apresenta os resultados para os pontos 01, 02. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,02m para o ponto 01, 0,02m para o ponto 02.

Gráfico 27 - Resultados da simulação 4 para 3km e 7km

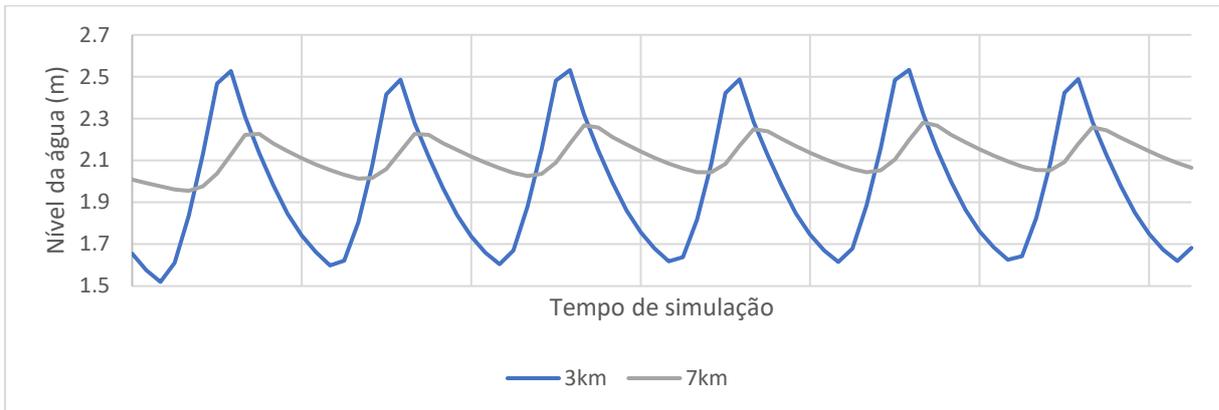


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 04 – Simulação 01 x Simulação 05 – Tamanho da célula computacional

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de uma célula computacional maior nos resultados. Para simulação 01 a célula é de 50mx50m, enquanto que para simulação 02 é 100mx100m. O Gráfico 28 apresenta os resultados para os pontos 01, 02. Percebe-se que o aumento no tamanho da malha causou um maior amortecimento para o ponto 02. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,02m para o ponto 01, 0,11m para o ponto 02.

Gráfico 28 - Resultados da simulação 5 para 3km e 7km

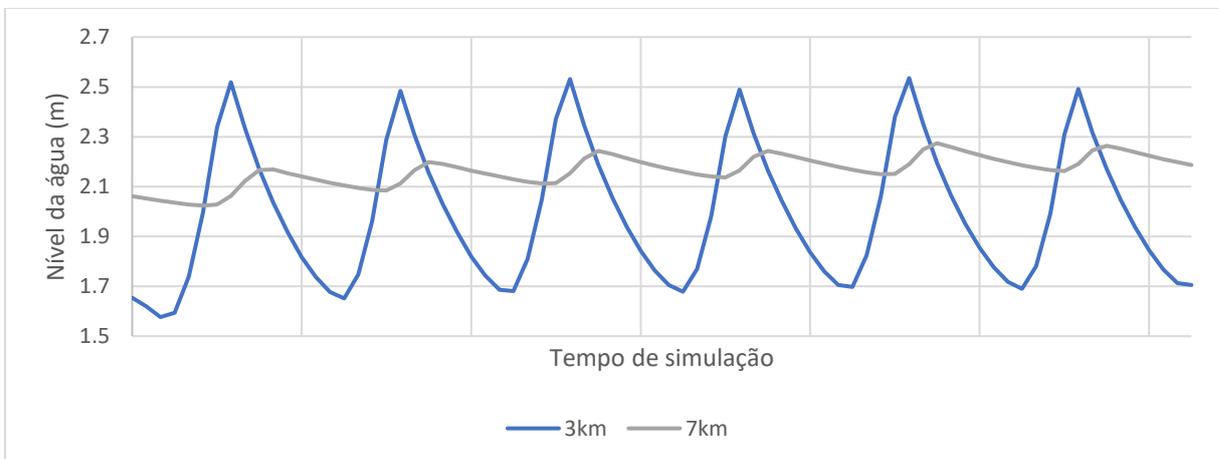


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 05 – Simulação 01 x Simulação 06 – Tamanho da célula computacional

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de uma célula computacional maior nos resultados. Para simulação 01 a célula é de 50mx50m, enquanto que para simulação 02 é 200mx200m. O Gráfico 29 apresenta os resultados para os pontos 01, 02. Percebe-se que o aumento no tamanho da malha causou um maior amortecimento para o ponto 02. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,14m para o ponto 01, 0,20m para o ponto 02.

Gráfico 29 - Resultados da simulação 6 para 3km e 7km



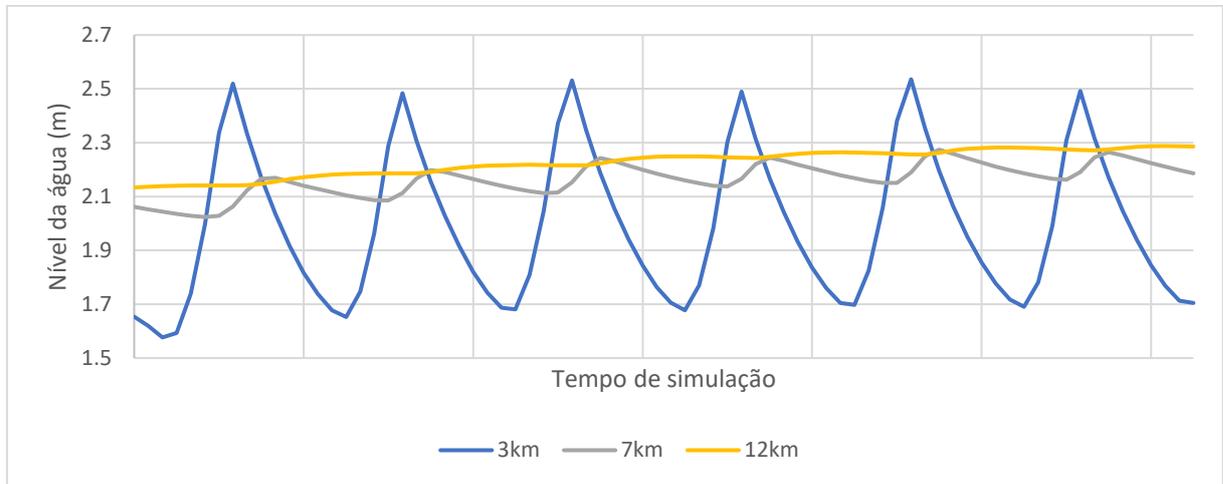
Fonte: elaborado pelo autor

Análise 06 – Simulação 01 x Simulação 07 – Tamanho da célula computacional

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de uma célula computacional maior nos resultados. Para simulação 01 a célula é de 50mx50m, enquanto que para simulação 02 é 300mx300m. O Gráfico 30 apresenta os resultados para os pontos 01, 02, 03. Percebe-se que o aumento no tamanho da malha causou um maior amortecimento para o ponto 02 e 03. A

diferença média segundo a medida RMSE é 0,06m para o ponto 01, 0,18m para o ponto 02 e 0,1m para o ponto 03.

Gráfico 30 - Resultados da simulação 7 para 3km, 7km e 12km

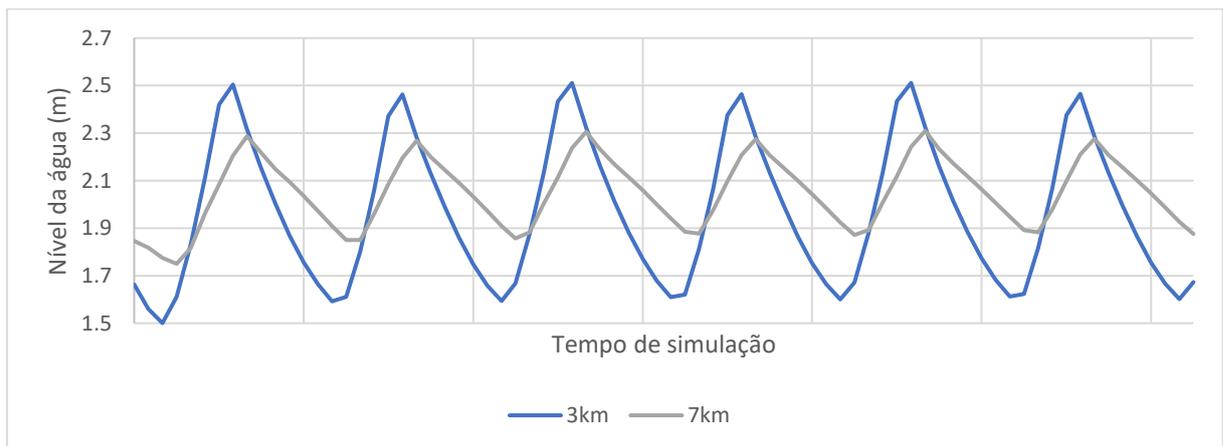


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 07 – Simulação 01 x Simulação 08 – Alinhamento das células

Tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de linhas de alinhamento (*break lines*) ao longo do rio para ajustar às faces das células computacionais como uma estrutural do modelo 1D/2D. Para simulação 01 não há este alinhamento, enquanto que para simulação 02 há esse alinhamento. O Gráfico 31 apresenta os resultados para os pontos 01, 02. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,04m para o ponto 01 e 0,015m para o ponto 02.

Gráfico 31 - Resultados da simulação 8 para 3km e 7km



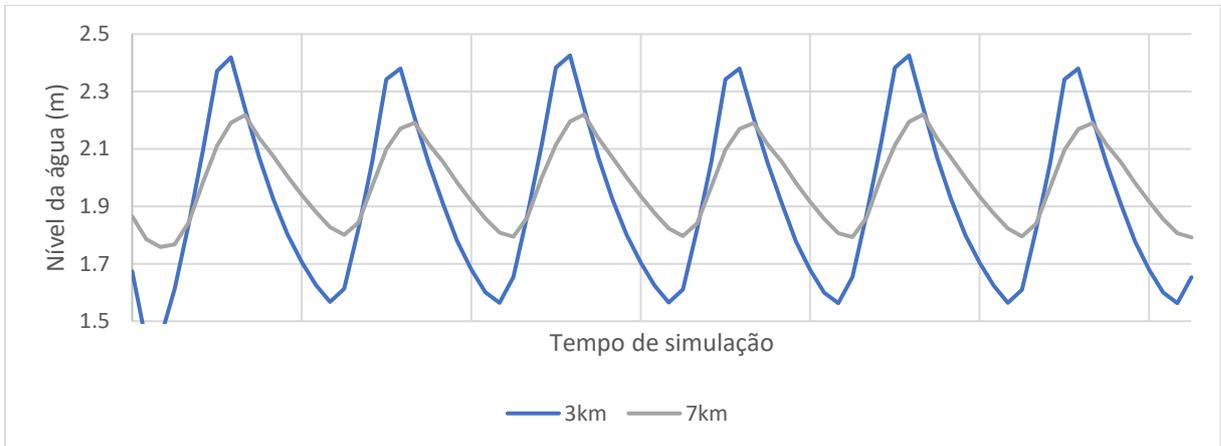
Fonte: elaborado pelo autor

Análise 08 – Simulação 01 x Simulação 09 – Intervalo de tempo computacional

Tem como objetivo avaliar o impacto da escolha do intervalo de tempo computacional nos resultados. Para simulação 01 o tempo computacional é de 1min, enquanto

que para a simulação 09 é de 30min. O Gráfico 32 apresenta os resultados para os pontos 01, 02. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,06m para o ponto 01 e 0,07m para o ponto 02.

Gráfico 32 - Resultados da simulação 9 para 3km e 7km

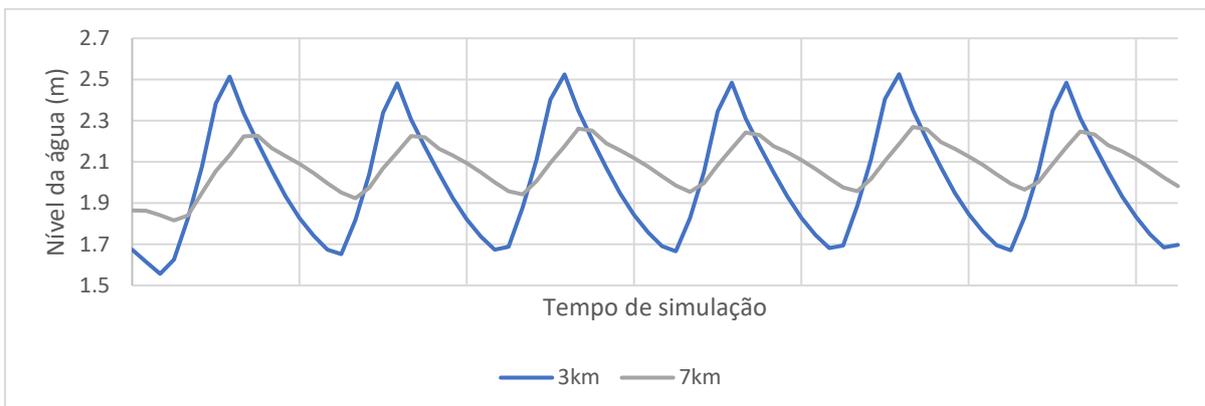


Fonte: elaborado pelo autor

Análise 09 – Simulação 01 x Simulação 10 – Modelo Completo de Águas Rasas

Tem como objetivo avaliar o impacto da escolha do modelo matemático utilizado nos resultados. Para simulação 01 o modelo utilizado é o de onda de difusão, enquanto que para a simulação 10 é o modelo completo de águas rasas. O Gráfico 33 apresenta os resultados para os pontos 01, 02. A diferença média segundo a medida RMSE é 0,04m para o ponto 01 e 0,07m para o ponto 02.

Gráfico 33 - Resultados da simulação 10 para 3km e 7km



Fonte: elaborado pelo autor

Tempos de simulação para os modelos

A Tabela 10 apresenta o resumo da duração de cada uma das simulações realizadas. Os parâmetros *Dur.* e *%E.V* representam, respectivamente, a duração total da simulação no HEC-RAS e a porcentagem de erro na conservação da massa no modelo.

Tabela 10 - Tempos de simulação

	Sim.1	Sim.2	Sim.3	Sim.4	Sim.5	Sim.6	Sim.7	Sim.8	Sim.9	Sim.10
Dur.	0:02:58	0:02:38	0:02:54	0:12:46	0:00:33	0:00:10	0:00:06	0:02:22	0:00:12	0:04:42
%E.V	1.2	1.2	0.05	1.5	1.3	1.0	0.8	1.2	3.0	1.2

Fonte: elaborada pelo autor

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados, podemos concluir que os seguintes pontos:

- Uma análise preliminar, utilizando o regime permanente, para um problema de condição de maré, consegue fornecer, de modo satisfatório, as envoltórias máximas e mínimas para as ondas de cheia. Contudo, o modelo permanente não capta de maneira satisfatório o efeito de amortecimento de cheia para a planície de inundação e para região do Lagamar. Além disso, não fornece valores satisfatórios para os perfis de velocidade e cisalhamento. Contudo, devido a sua fácil implementação, é recomendado para uma análise preliminar dos resultados.
- Subindo no nível hierárquico de modelagem, o modelo não permanente permite simular a condição de maré, obtendo-se o comportamento dinâmico do rio para diferentes passos de tempo. Os perfis obtidos ficaram entre as envoltórias de máximo e mínimo calculadas no regime permanente. Os perfis de velocidade obtidos pelo regime não permanente estão coerentes, com velocidades positivas na cota de maré mínima e velocidades negativas na cota de maré máxima. Da mesma forma, os perfis de tensão de cisalhamento também são coerentes. O principal parâmetro para incerteza nos resultados é o coeficiente de Manning. A desvantagem neste modelo é que não foi considerado o amortecimento na planície de inundação do rio.
- O modelo combinado 1D/2D é o que apresenta uma quantidade maior de parâmetros para modelagem e complexidade na construção da geometria. A inclusão das células computacionais (para áreas de fluxo 2D) e de uma estrutura lateral, causam um aumento na complexidade do modelo e na incerteza dos parâmetros envolvidos. O próprio desenvolvimento do modelo se torna mais demorado e aumenta o grau de instabilidade do mesmo. Pela análise de sensibilidade, os parâmetros que mostraram maior influência no resultado e na estabilidade do modelo foram o intervalo de tempo computacional e o tamanho da célula 2D. Os resultados mostraram que os erros na conservação total da massa são maiores que os obtidos pelo modelo 1D não permanente e pelo modelo 2D completo. Isso ocorreu principalmente pela inclusão da estrutural lateral. Para alguns modelos, cujo erro inicial na conservação da massa foi superior a 10%, a opção de incluir um processo iterativo na transferência de massa pela estrutura foi

utilizado. Isso implicou em um grande aumento no tempo de simulação. Ainda assim, os erros apresentados são maiores que os obtidos pelos demais modelos.

- O modelo puramente 2D, embora seja mais completo em termos de formulação matemática, é mais rápido e simples de desenvolver que o modelo combinado 1D/2D. Os resultados também foram consistentes com os obtidos pelos modelos anteriores. Como a quantidade de parâmetros é menor que a do modelo combinado, a incerteza envolvida também é menor. Os resultados do modelo 2D são mais atraentes do ponto de vista de visualização, podendo ajudar a transmitir informações aos tomadores de decisão ou na composição de um relatório técnico. A análise de sensibilidade mostrou que este modelo possui grande estabilidade e flexibilidade na definição do tamanho computacional da célula e do intervalo de tempo computacional, sendo superior neste quesito em relação ao modelo 1D/2D e o modelo unicamente 1D. A análise também mostrou que os tempos de simulações obtidos pelo modelo 2D são menores que os obtidos pelo modelo 1D/2D, e os resultados são melhores, tendo em vista que o erro na conservação da massa foi menor para todos os resultados. Além disso, devido a maior flexibilidade, esse modelo se mostra mais viável para utilização em um sistema de previsão em tempo real.

Através da análise do perfil de água, velocidade e de cisalhamento, obtido de forma coerente em todos os resultados dos modelos, revela que a região com tendência a assoreamento é a do Lagamar. Pela análise do perfil de água percebe-se que nesta região ocorre uma convergência e amortecimento das lâminas de água. A análise do perfil de velocidade revela que a montante do Lagamar se tem velocidades maiores, a jusante do Lagamar temos velocidades negativas (em parte do dia) e na região do Lagamar as velocidades são nulas. Sabe-se que que velocidades maiores causam uma maior tendência a deslocamento da partícula de solo, portanto, o solo tende a ser carregado para região do Lagamar onde se depositará devido as velocidades nulas. Paralelamente a isso os gráficos das tensões de cisalhamento fortalecem resultados similares aos da velocidade, fortalecendo essa conclusão.

Este trabalho realizou uma atualização no modelo hidráulico do Cocó desenvolvido anteriormente, incluindo as novas ferramentas e metodologias da versão do HEC-RAS 5.0.3. O modelo digital de elevação, pela análise dos resultados, se mostrou satisfatório e produziu resultados consistentes com o esperado na prática. O mapeamento da água se mostrou coerente

com o esperado do rio em seu regime de escoamento normal e condição de maré. Os resultados obtidos com diferentes modelos se mostraram coerentes com o que é esperado na prática.

Com base nisso faço as seguintes recomendações:

- Embora o estudo hidráulico apresente resultados coerentes e que podem ser usados para dar uma noção preliminar do transporte de sedimentos no rio, uma análise mais aprofundada pode ser realizada utilizando o programa. Um novo estudo pode ser realizado, aproveitando todos os resultados, modelos e dados desenvolvidos neste trabalho, mas com o foco na obtenção do comportamento do transporte de sedimentos no rio. Esse estudo visaria a responder, por exemplo, qual a quantidade de sedimento é depositada na região do Lagamar anualmente e qual periodicidade para realização de dragagem para remover tais sedimentos.
- No mesmo sentido, um estudo sobre a qualidade da água no rio pode ser desenvolvido no HEC-RAS. Esse estudo, juntamente com o estudo de transporte de sedimentos e o estudo hidráulico aqui realizado, poderia ser utilizado para compor um projeto de acompanhamento do Rio sob seus diversos aspectos.
- Adicionalmente aos estudos anteriores, um trabalho para automação desse monitoramento do Rio poderia ser desenvolvido utilizando a API do HEC-RAS Controller. Essa API permite que o usuário controle as funções do programa via programação, incluindo monitoramento em tempo real do Rio. Este estudo mostrou que o modelo 2D é o mais viável para o desenvolvimento de um trabalho de modelagem em tempo real, devido a sua flexibilidade e rapidez na simulação.

REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, C. T. **HEC-GeoRAS: GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS®**. 2009.
- BARKAU, R. L. **Simulation of the July 1981 Flood Along the Salt River**. Ft. Collins, 1982.
- BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; FEWTRELL, T. J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. **Journal of Hydrology**, v. 387, n. 1–2, p. 33–45, 2010. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>>.
- USACE. **Combined 1D and 2D Modeling with HEC-RAS**. Davis: USACE, 2014.
- USACE. **HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual**. Davis: USACE, 2016a.
- USACE. **HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User's Manual**. Davis: USACE, 2016b.
- USACE. **HEC-RAS River Analysis System: Applications Guide**. Davis: USACE, 2016.
- BUCALEM, M. L.; BATHE, K.-J. **The Mechanics of Solids and Structures – Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution**. Springer, 2011.
- CASULLI, V. A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, p. 391–408, 2008.
- CHOW, V. TE. **Open Channel Hydraulics**. Tokyo: McGraw-Hill, 1959.
- COOK, A. C. **Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping**, 2008. Purdue University.
- COUTINHO, M. M. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. , p. 260, 2015. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.
- DIERAUER, J.; PINTER, N.; REMO, J. W. F. Evaluation of levee setbacks for flood-loss reduction, Middle Mississippi River, USA. **Journal of Hydrology**, v. 450–451, p. 1–8, 2012. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.044>>.
- DIMITRIADIS, P.; TEGOS, A.; OIKONOMOU, A.; et al. Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 478–492, 2016. Elsevier B.V.
- DYHOUSE, G.; HATCHETT, J.; BENN, J. **Floodplain Modeling Using HEC-RAS**. Exton: Bentley Institute Press, 2003.

FAN, F. M.; RÓGENES, P.; PONTES, M.; CAUDURO, R.; PAIVA, D. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 137–147, 2014. Disponível em:

<http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/62916e6e8636ba97d7bc0e9bcc206902_c6c64dd835c38b26061ef63932035d3f.pdf>.

FERNANDEZ, P.; MOURATO, S.; MOREIRA, M. Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. **Revista Recursos Hídricos**, v. 34, n. 1, p. 63–73, 2013. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/rh/v34n1-5.html>>.

FREAD, D. L. **Numerical properties os implicit four-point finite difference equations of unsteady flow**. NOAA Technical Memorandum, 1974.

FREAD, D. L.; LEWIS, J. M. Selections of dx and dt computational steps in solution of four-point implicit nonlinear dynamic routing. Hydraulic Engineering Conference. **Anais...** . p.26–30, 1993. San Francisco: ASCE.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. New York: Macmillan Publishing, 1966.

HORRITT, M. S.; BALDASSARRE, G. DI; BATES, P. D.; BRATH, A. Comparing the performance of a 2-D finite element and a 2-D finite volume model of floodplain inundation using airborne SAR imagery. **Hydrol. Process**, p. 2745–2759, 2007.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**, v. 268, n. 1–4, p. 87–99, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216940200121X>>.

MACHADO, M. L.; NASCIMENTO, N.; BAPTISTA, M.; et al. Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 2, n. 1, p. 35–52, 2005.

MAVIGNIER, A. L. **Estudo físico, químico e bacteriológico do Rio Cocó**, 1992. Universidade Federal do Ceará.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. DE O.; UVO, C. B. Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone areas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 152–167, 2016.

NÓBREGA, M. T. **Simulação do comportamento dos transientes hidráulicos na calha do rio cocó**, 1998. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Departamento de Hidráulica e Saneamento Ambiental.

PATEL, D. P.; RAMIREZ, J. A.; SRIVASTAVA, P. K.; BRAY, M.; HAN, D. Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5. **Natural Hazards**, v. 89, n. 1, p. 93–130, 2017. Springer Netherlands.

PAULA, A. Avaliação de danos às edificações causados por inundações e obtenção dos custos

de recuperação. , p. 75–94, 2013.

REMO, J. W. F.; CARLSON, M.; PINTER, N. Hydraulic and flood-loss modeling of levee, floodplain, and river management strategies, **Middle Mississippi River, USA. Natural Hazards**, v. 61, n. 2, p. 551–575, 2012.

RIBEIRO, R. S. **Intercomparação de modelos hidrodinâmico e hidráulico no estudo de rio estuarino**, 2005. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Departamento de Hidráulica e Saneamento Ambiental.

SEMA. **Criação de unidades de conservação do rio cocó.** , 2016.

SILVA, O. E. **Projeto executivo de dragagem do rio cocó.** , 2004. Fortaleza.

SOUSA, M. M. **Comparação entre ferramentas de modelagem unidimensional e quasi-bidimensional, permanente e não-permanente, em planejamento e projetos de engenharia hidráulica**, 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

TACHINI, M.; KOBAYAMA, M.; LOESCH, C.; SEVERO, D. L.; SANTOS, H. **Avaliação de danos de inundações ocorridas em Blumenau/SC nos anos 1983, 1984, 1992 e 2001**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** . p.1–18, 2001.

TAYEFI, V.; LANE, S. N.; R.J.HARDY; YU, D. A comparison of one- and two-dimensional approaches to modelling flood inundation over complex upland floodplain. **Hydrol. Process**, p. 3190–3202, 2007.

VILLELA, S. **Estudo do transiente hidráulico do estuário do Rio Cocó**. 1988.

ZANELLA, M. E.; CLÉLIA, M.; COSTA, L.; DRA, P. Vulnerabilidade socioambiental do baixo curso da bacia hidrográfica do Rio Cocó, Fortaleza-CE. **Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 2, p. 317–331, 2013.

ANEXO – TRADUÇÃO PARCIAL DO MANUAL DO USUÁRIO DO HEC-RAS 2D

7.1 Introdução

HEC (Hydrologic Engineering Center) adicionou a habilidade de realizar modelagem hidrodinâmica bidimensional (2D) com fluxo não permanente. Usuários agora podem realizar modelagem unidimensional (1D) com fluxo não permanente, bidimensional com fluxo não permanente (equações de Saint-Venant ou equações de onda de difusão), assim como modelagem combinada 1D e 2D com fluxo não permanente. As áreas 2D no HEC-RAS podem ser utilizadas de diversas formas. A seguir são alguns exemplos de como as áreas para fluxo 2D podem ser utilizadas na modelagem no HEC-RAS:

- Modelagem 2D detalhada do canal
- Modelagem 2D detalhada do canal e da planície de inundação
- Combinação de canal 1D com áreas 2D para planície de inundação
- Combinação de canal e planície 1D com áreas 2D para locais após estrutura de contenção lateral (*levee*)
- Conexão direta de trechos de rios para dentro e fora de áreas 2D
- Conexão direta de uma área 2D para uma estrutura de armazenamento 1D
- Múltiplas áreas 2D na mesma geometria
- Conexão direta entre múltiplas áreas 2D com estruturas hidráulicas
- Modelagem de rompimento de barragens de modo simples e detalhado
- Modelagem de rompimento contenção lateral (*levee*) de modo simples e detalhado
- Modelagem de regimes mistos (subcrítico, crítico e supercrítico). A modelagem em 2D, assim como em 1D, permite lidar com diversos regimes, assim como a mudança entre os regimes subcrítico para supercrítico e supercrítico para subcrítico (ressalto hidráulico)

A modelagem em 2D é conseguida adicionando elementos de fluxo 2D dentro do modelo da mesma forma que se adiciona uma área de armazenamento. Essa área 2D é adicionada desenhando um polígono, desenvolvendo a malha computacional e ligando o modelo 2D com elementos 1D, e aplicando as condições de contorno.

Nota: Esse documento assumo que o usuário já sabe como utilizar o HEC-RAS para realizar simulação 1D em fluxo não permanente. Este documento foca em como usar as novas capacidades 2D e o novo HEC-RAS Mapper. Para assistência com modelagem 1D em fluxo não permanente, e como usar a interface, por favor, revise o manual do usuário do HEC-RAS.

7.1.1 Capacidades e vantagens do HEC-RAS 2D

As capacidades de modelagem 2D foram desenvolvidas para permitir não só a modelagem 2D, como também a modelagem combinada 1D/2D. A seguir são apresentadas as capacidades do modelo 2D do HEC-RAS:

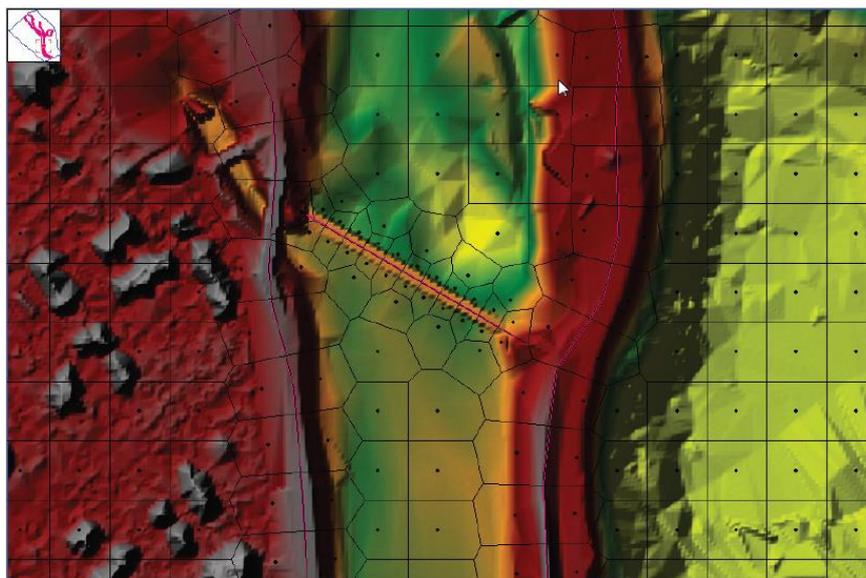
- **Consegue realizar a simulação 1D, 2D e combinação 1D e 2D.** A habilidade de realizar a modelagem 1D/2D no mesmo modelo irá permitir que os usuários trabalhem um sistema de rios grande, utilizando o modelo 1D onde é apropriado (na parte principal do rio) e 2D em áreas que requerem um maior detalhamento hidrodinâmico.
- **Resolve as equações de Saint-Venant ou de onda de difusão em 2D.** O programa resolve as equações 2D de Saint-Venant (com opções adicionais na conservação do momento para considerar efeitos de turbulência e Coriolis) ou as equações 2D de onda de difusão. De modo geral, as equações de onda de difusão permitem o programa rodar mais rapidamente ter uma maior estabilidade. Já as equações de Saint-Venant são aplicadas em uma gama maior de problemas. Contudo, ressalta-se que muitas situações podem ser modeladas com as equações de onda de difusão. Como o usuário pode facilmente alternar entre as equações, é possível rodar as duas equações e verificar se o uso das equações de Saint-Venant é melhor que o de Onda de Difusão.
- **Algoritmo de solução implícito utilizando o método de volumes finitos.** O algoritmo de solução das equações diferenciais utiliza o método dos volumes finitos. A solução implícita permite a escolha de tempos computacionais maiores que os dos métodos implícitos. O método dos volumes finitos proporciona um incremento na melhora da estabilidade e robustez em comparação com os métodos tradicionais de diferenças finitas e elementos finitos. O preenchimento e esvaziamento das células 2D são bastante robustos. Áreas 2D podem começar completamente secas e lidar com avanço rápido de água dentro da área. Adicionalmente, o algoritmo pode lidar com regimes subcrítico, supercrítico e mistos.
- **Acoplagem de solução em 1D e 2D.** O algoritmo de solução 1D e 2D são fortemente acoplados a cada intervalo de tempo, com a opção de iterar transferências de vazão entre

1D e 2D a cada intervalo de tempo. Isso permite um feedback direto a cada intervalo de tempo entre os elementos 1D e 2D. Por exemplo, considere um rio que é modelado como 1D com uma área, após uma estrutura lateral (*levee*), modelada 2D (conectada hidráulicamente com uma estrutura lateral). O fluxo sobre a estrutura lateral (*levee*) é computado com a carga hidráulica do rio 1D (*headwater*) e com a carga hidráulica da área 2D (*tailwater*) a qual é conectada. A equação de vertedouro é utilizada para calcular a vazão sobre a estrutura lateral (*levee*). A cada intervalo de tempo a equação de vertedor utiliza os resultados do 1D e 2D para computar a vazão, permitindo levar em consideração os efeitos de submersão do vertedor, a cada intervalo de tempo, conforme a área interior é preenchida. Adicionalmente, é permitido que o fluxo volte para área 1D, uma vez que o nível da água diminuir.

- **Malhas estruturadas e não estruturadas.** O programa foi projetado para usar malhas não estruturadas, contudo, consegue lidar com malhas estruturadas. A malha estruturada é tratada da mesma forma que a malha não estruturada, exceto que o sistema se aproveita do fato que as células são ortogonais (facilitando os cálculos computacionais). Isso significa que as células podem ser triângulos, quadrados, retângulos, ou até elementos com 6, 7 e no máximo 8 lados. A malha pode ser uma mistura de formas. O contorno da malha computacional é definido por um polígono. A malha computacional não precisa ser ortogonal, contudo, se a malha for ortogonal a discretização computacional é simplificada e mais eficiente.
- **Tabelas hidráulicas detalhadas para o cálculo de cada célula e face da célula.** No HEC-RAS, as células computacionais não precisam ter um fundo plano e as faces das células não precisam ser uma linha reta (com uma única elevação). Em vez disso, cada célula computacional e sua face é baseada nos detalhes do modelo digital de superfície utilizado. Esse tipo de modelo é frequentemente chamado na literatura de “modelo de alta resolução com submalha” (“*high resolution subgrid model*”). O termo “submalha” (*subgrid*) significa que utiliza os detalhes do modelo de terreno para desenvolver tabelas detalhadas para representar a geometria. HEC-RAS tem um pré-processador 2D que processa células e suas faces em tabelas detalhadas baseadas no modelo de terreno utilizado. Por exemplo, considere um modelo construído a partir de um modelo de terreno detalhado (0,6m x 0,6m) com uma célula computacional de 60m x 60m. O pré-processador 2D computa uma relação cota-volume baseado no modelo de terreno detalhado (0,6m de resolução), em cada célula computacional. Assim, uma célula pode

estar parcialmente molhada com um volume de água correto para uma dada cota de água (*WSEL*) com base nos dados do terreno 0,6m. Adicionalmente, cada face da célula é considerada como uma seção transversal é pré-processada em tabelas hidráulicas detalhadas (elevação-área, elevação-perímetro molhado, elevação-rugosidade, etc.). O fluxo entre as células é baseado no modelo detalhado. Isso permite que o usuário utilize grandes células computacionais, sem perder o detalhamento do terreno subjacente. Ademais, o posicionamento de faces ao longo de terreno/estruturas de controle (ruas, terreno alto, paredes, etc.) permite melhorar os cálculos hidráulicos utilizando menos células. O efeito disso é que células computacionais maiores requerem menos cálculos computacionais, rodando mais rapidamente. Um exemplo de malha computacional é apresentado na Figura 31.

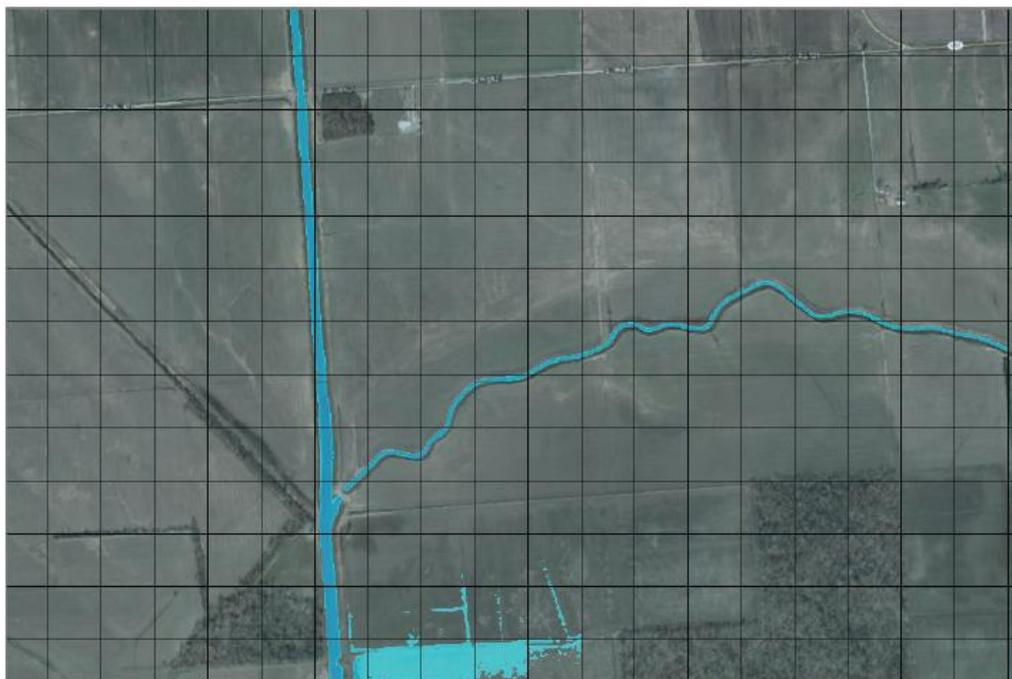
Figura 31 - Malha não-estruturada com dados detalhados da submalha do terreno



Essa Figura mostra um exemplo de malha computacional detalhada sobre um terreno colorido e sombreado. As células computacionais são representadas pelas linhas pretas e são os locais nos quais as elevações da água são calculadas. A relação elevação-volume para cada célula é baseada no terreno subjacente. Cada face da célula é considerada uma seção transversal, cuja geometria é representada pelo terreno subjacente a cada linha preta que compõe a célula. Esse processo permite que a água flua entre as células com base nos detalhes do terreno subjacente, representado pelas faces das células e pelo volume contido em cada célula. Dessa forma, um pequeno canal/rio que passa através da célula, ainda que menor que o tamanho da célula computacional, consegue ser representado adequadamente pela relação elevação-volume e tabelas de propriedades das faces. Um exemplo de tal situação é apresentado

na Figura 32. Nessa Figura, os canais são bem menores que a células computacional, contudo, a água flui através dos canais por causa das tabelas hidráulicas desenvolvidas. O fluxo fica contido no canal até que a elevação da água ultrapassa a cota da ribanceira/borda/margem (*overbank*) do canal. Após esse ponto, a água passa para planície de inundação.

Figura 32 - Benefícios de utilizado uma submalha com terreno detalhado para faces e tabelas de propriedades hidráulicas



- **Mapa de planícies de inundação e animações de inundações animados.** O mapeamento da área inundada, assim como animações das inundações podem se realizadas dentro do HEC-RAS utilizando os recursos do RAS Mapper. O mapeamento do terreno em 2D é baseado no detalhamento do terreno subjacente. Isso significa que a área molhada será baseada nos detalhes do modelo de terreno utilizado, e não no tamanho das células computacionais. Computacionalmente, as células podem estar parcialmente secas ou molhadas. Os mapeamentos dos resultados irão refletir esses detalhes.
- **Solução com computação paralela com base em múltiplos processadores.** O algoritmo de solução 2D foi programado para tirar proveito de computadores com múltiplos núcleos (paralelização), permitindo rodar mais rapidamente que um único processador.

- **Motores computacionais em 64 bits e 32 bits.** Utilização automática de acordo com o sistema computacional. O motor computacional 64 bits permite rodar mais rapidamente e lidar com conjunto de dados maiores.

7.1.2 Sumário de como realizar a modelagem de fluxo não permanente combinado em 1D/2D

Utilizar o HEC-RAS para realizar modelagem 2D ou modelagem combinada 1D/2D é bastante fácil e direto. A seguir são apresentados os passos básicos para realização de uma modelagem 2D (ou combinada 1D/2D) com o HEC-RAS:

1. Definir o sistema de coordenadas projetado que será utilizado no modelo, através do RAS Mapper. Isso normalmente é realizado selecionando um arquivo existente de projeção de um shapefile ESRI ou outros arquivos de mapeamento.
2. Desenvolver o modelo digital de terreno no RAS Mapper. O modelo de terreno é um pré-requisito para modelagem em 2D, já que é utilizado para estabelecer as propriedades geométricas e hidráulicas das células e faces. Tal modelo também é necessário para realizar qualquer mapa de inundação no RAS-Mapper.
3. Construir uma tabela de classificação do terreno com o objetivo de estabelecer os coeficientes de Manning para as áreas de fluxo em 2D. Adicionalmente, o HEC-RAS possui a opção do usuário desenhar polígonos que podem se sobrepor ao dados de classificação ou como zonas de calibração.
4. Adicionar outros mapas que ajudem na visualização da área, como fotos aéreas, locais de barramentos, rede de ruas, etc.
5. Através do editor geométrico, desenhar um polígono de contorno para cada área com fluxo bidimensional a ser modelada. Ou você pode importar as coordenadas X,Y de outras fontes.
6. Definir as “*linhas de quebra*” que interceptam a área 2D que possam ser uma barreira significativa para o fluxo: estruturas de contenção (levees), ruas, barreiras naturais (natural embankments), terreno alto que separa o canal da planície de inundação (ribanceira ou barranco do rio), estruturas hidráulicas, etc.
7. Utilizando o edital de Área 2D, criar uma malha computacional para cada Área de Fluxo 2D.

8. Editar a malha com o objetivo de melhorá-la, como: adicionar mais linhas de quebras, aumentar ou diminuir a densidade de células conforme necessário, adicionar, mover ou deletar o centro das células, conforme necessário.
9. Rodar pré-processador geométrico do RAS-Mapper para criar as tabelas de propriedades hidráulicas para as células e faces.
10. Conectar as Áreas de Fluxo 2D com os elementos hidráulica 1D (rios, estruturas laterais, área de armazenamento) conforme necessário.
11. Adicionar quaisquer estruturas hidráulica necessária dentro da área de fluxo 2D.
12. Adicionar quaisquer condições de contorno e condições iniciais necessárias através do editor de fluxo não permanente.
13. Através do editor de simulação não-permanente, aplicar qualquer opção computacional e configuração necessária para as Áreas de Fluxo 2D.
14. Rode a simulação em regime não-permanente
15. Revise os resultados 1D/2D no RAS Mapper, assim como os resultados para opção 1D

7.1.3 Limitações da modelagem 2D com o HEC-RAS

A lista é seguir resume as principais limitações do sistema computacional HEC-RAS 2D. Esses itens estão sendo ativamente desenvolvidos para melhorar o sistema, e estará disponível em versões futuras.

- Dificuldades para adicionar estruturas hidráulicas ao modelo 2D
- Não é possível simulação de transporte de sedimentos em 2D
- Não é possível simulação da qualidade de água em 2D
- Não é possível a conexão de bombas com áreas de células em 2D
- Não é possível a utilização da modelagem de pontes dentro de uma área 2D. Contudo, você pode desenvolver bueiros, vertedouros e ruptura utilizando a ferramenta de conexão *SA/2D Area Conn.*

7.2 Desenvolvimento de um modelo de terreno para uso em modelos 2D e resultados de mapeamento

É absolutamente essencial ter um modelo detalhado e preciso do terreno em ordem para criar um modelo hidráulico preciso e detalhado. A qualidade dos dados de terreno pode

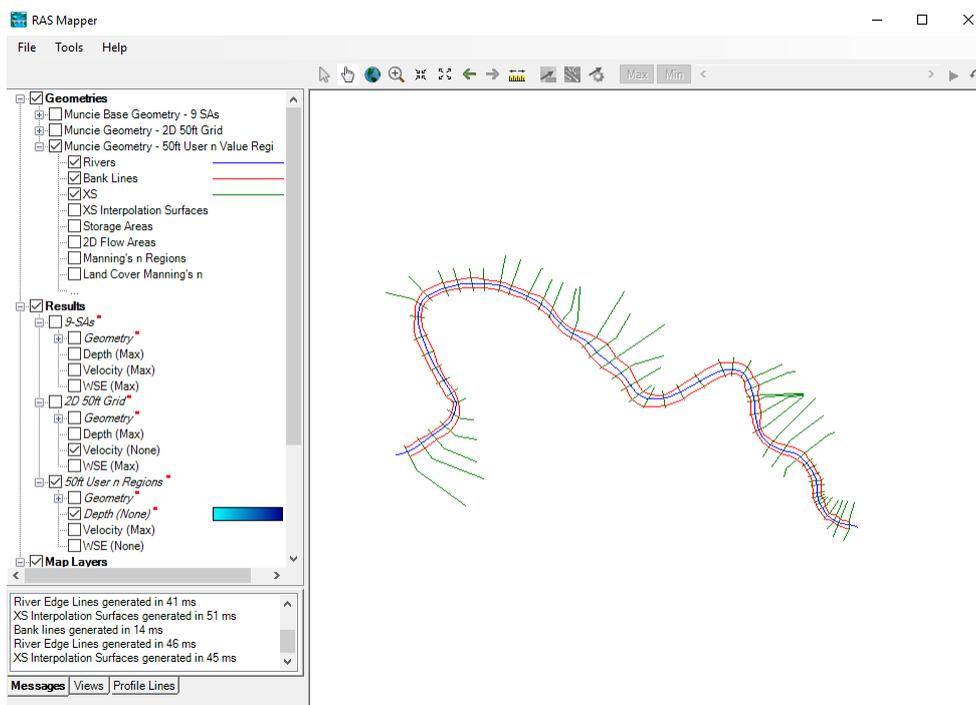
ser fator limitando na qualidade do hidráulico do modelo desenvolvido pelo usuário. Dados de terrenos vem de diferentes fontes, formatos e níveis de detalhamento. Atualmente, o HEC-RAS utiliza dados *Raster* para modelagem do terreno. Dependendo de o usuário juntar dados de diferentes fontes, criar um bom modelo hidráulico, converter e exportar para o formato *Raster* que pode ser lido no HEC-RAS.

É necessário criar um modelo de terreno no RAS Mapper antes do usuário realizar qualquer simulação que contenha área em 2D, ou antes que o usuário consiga visualizar qualquer resultado de mapeamento. Essa seção deste documento descreve como criar um modelo de terreno no RAS-Mapper. O usuário pode desenvolver um ou mais modelos de terreno, que podem estar associados com um arquivo específico de geometria, ou um arquivo de resultados. Para mais detalhes em como criar modelos de terrenos no RAS Mapper, por favor, revise o capítulo do RAS-Mapper no manual do usuário do HEC-RAS.

7.2.1 Abrir o RAS Mapper

O primeiro passo para criação de um terreno é abrir o RAS Mapper. Isso é realizado clicando-se em **GIS Tools** da janela principal do HEC-RAS e selecionando a opção **RAS Mapper**, ou clicando no botão do **RAS Mapper**  na janela principal. Quando isso é realizado, a janela mostrada na Figura 33 irá aparecer.

Figura 33 - RAS Mapper sem terreno ou outras camadas

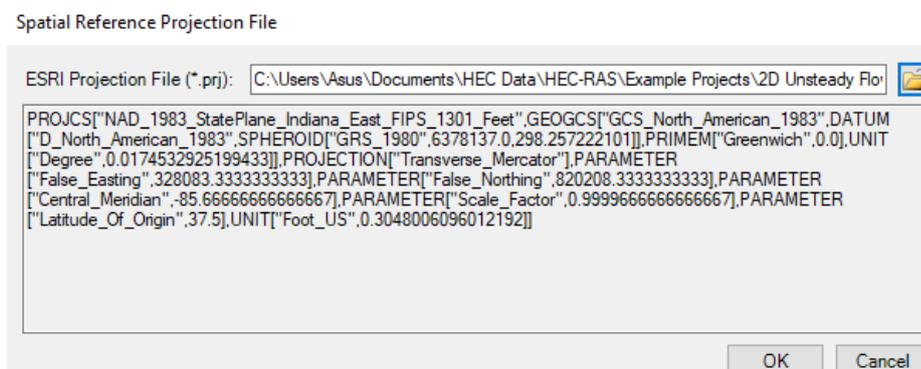


7.2.2 Definir sistema de coordenadas

Uma vez aberto o *RAS Mapper*, se os dados estiverem em um sistema específico de coordenadas projetado, tal projeção deve ser aplicada ao *RAS Mapper*. Isso não é obrigatório, mas fazê-lo tem muitas vantagens no HEC-RAS.

Para aplicar o sistema de coordenadas de referência para o projeto, selecione **Tools** → **Set Projection for Project** através da barra de menu do *RAS Mapper*. Em seguida, clique em **Browse** (Figura 34) e selecione um arquivo existente com os dados do sistema de coordenadas, como um arquivo “.prj” *ESRI* que contenha o sistema de coordenadas correto. Se o ArcGIS versão 10.0 ou anteriores está instalado no computador, o usuário pode ir ao diretório do ArcGIS que contém uma lista de todos os sistemas de coordenadas disponíveis e escolher o apropriado. Senão, procure um arquivo “.prj” do ArcGIS dentro de uma das pastas GIS (procure por um shapefile que tenha um sistema de coordenadas definido). Infelizmente o diretório do sistema de coordenadas foi removido para versões do ArcGIS superiores a 10.1. Dessa forma, os usuários terão que criar um arquivo de projeção ou procurar na internet por um arquivo do ArcGIS. Para este exemplo, foi selecionado o sistema de referência “NAD 1983 State Plane Indiana East.prj”.

Figura 34 - Editor para aplicar o sistema espacial de referência do RAS



7.2.3 Carregando os dados de terreno e criando o modelo de terreno

O próximo passo é carregar os dados de terreno que serão utilizados para criar o modelo de terreno. Para desenvolver um novo modelo de terreno, selecione **Tools** → **New Terrain** a partir do menu principal do RAS Mapper. A janela de criação de terreno irá aparecer (Figura 35). Essa janela permite que o usuário forneça o nome para a nova camada de terreno (o nome padrão é *Terrain*); selecionar o diretório para salvar o terreno



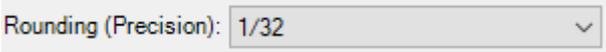
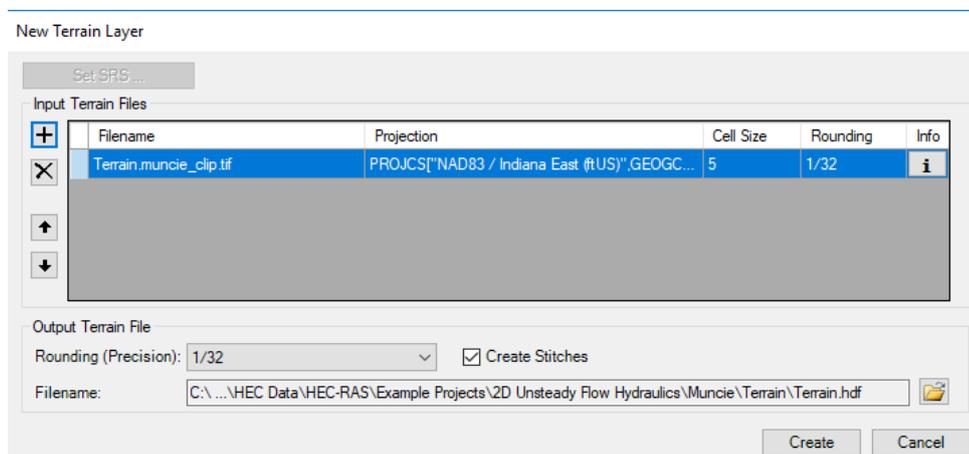
definir a precisão da elevação ; e selecionar arquivos para serem utilizados para construir o novo terreno ()

Figura 35 - Exemplo da criação de um novo terreno



Nesse momento, RAS Mapper consegue importar dados de terreno no formato “float point grid” (*.flt); GeoTIFF(*.tif); ESRI grid; e vários outros formatos. Uma lista de formatos suportados pelo RAS Mapper é encontrada no apêndix B deste manual. Nem todos os formatos foram testados, mas a biblioteca utilizada afirma que suporta tais formatos. Qualquer que seja o formato, os dados devem ser no formato *Gridded (Raster)*, para que seja possível utilizar para criar o modelo de terreno.

O formato *floating point grids* consiste em um arquivo principal *.flt, e também de um arquivo *.hdr e possivelmente de um arquivo *.prj que vai em conjunto. **Nota: se o arquivo *.flt não está na mesma projeção do RAS Mapper, então, o usuário tem que possuir um arquivo .prj que descreve a projeção do arquivo *.flt.** Os arquivo ESRI grid terão a extensão *.adf. **Note: existem vários arquivos *.adf que compõe o formato ESRI grid. Escolha qualquer um deles e o programa automaticamente irá processá-los conforme necessário.**

Use o botão de adicionar  para escolher o arquivo que será utilizado para construir o terreno. Mais de um arquivo pode ser utilizado para construir o modelo de terreno.

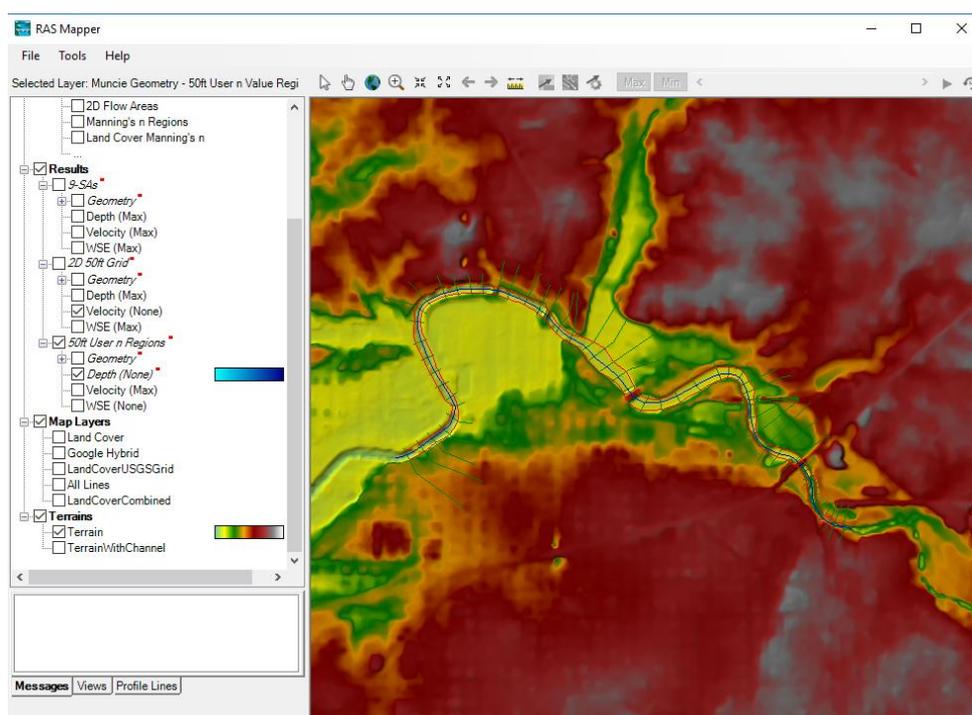
Se mais de um terreno for adicionado, use as setas para cima e para baixo ao lado da tabela para escolher a prioridade de cada terreno. Se um raster possui mais detalhes (melhor resolução) que outros, o usuário irá querer dar uma maior prioridade quando for criar o modelo de terreno.

Uma vez que os arquivo raster forem selecionados e colocados na prioridade adequada, clique no botão **Create** para criar uma nova camada de terreno. Um vez que esse

botão é pressionado, RAS Mapper irá converter os arquivos raster para o formato GeoTIFF (*.tif). Este formato permite estrutura de dados em mosaico e dados piramidais. Dados em mosaico usa menos área do terreno removendo os valores sem dados “NoData”, enquanto dados piramidais permitem armazenar múltiplas camadas com diferentes resoluções. Adicionalmente, os arquivos GeoTIFF são automaticamente armazenados no formato comprimido, tornando o tamanho do arquivo muito menor. De uma forma geral, o arquivo GeoTIFF será 2 a 20 vezes menor que o arquivo original FLT ou ESRI. Assim, o formato de arquivo GeoTIFF permite um arquivo de menor dimensão, cálculos computacionais mais rápidos (na geração de mapas de inundação), assim como mapas dinâmicos dos resultados (mapas de inundação são criados *on the fly* na memória).

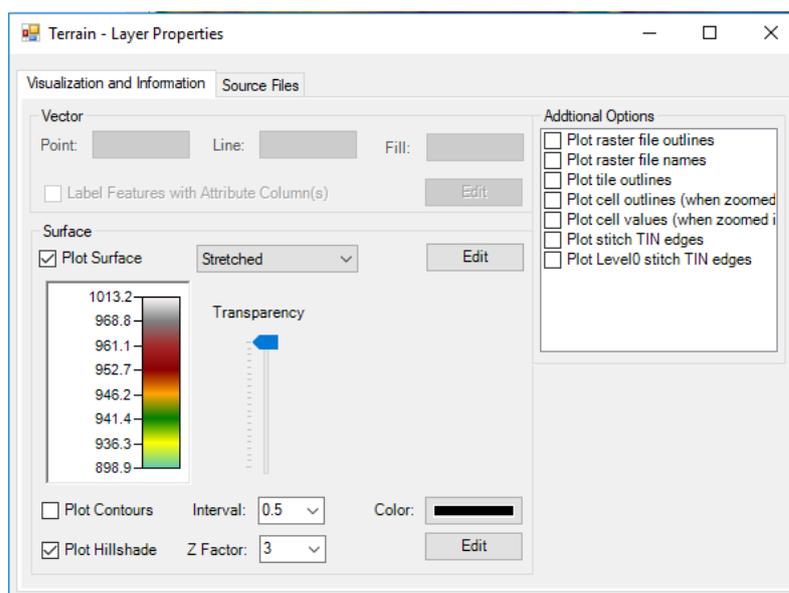
Um vez criados os arquivos GeoTIFF, RAS Mapper também cria um arquivo *.hdf e um arquivo*.vrt. O arquivo *.hdf (Formato de Dados Hierárquicos) contém informações de como os múltiplos arquivos *GeoTIFF* são unidos. O arquivo *.vrt (*Virtual Raster Translator*) é um arquivo XML que contém informações sobre todos os arquivos *Raster* (*.tif). O usuário pode arrastar e soltar o arquivo *.vrt no ArcGIS e ele irá saber todos os arquivos *Raster* que compõe a camada de terreno. Adicionalmente, eles irão ter a mesma escala e rampa de cores quando mostrados. Uma vez que o RAS Mapper tenha finalizado a conversão dos arquivos para GeoTIFF e criado os arquivos HDF e VRT, a nova camada de terreno estará visível na janela. Veja, por exemplo, a Figura 36.

Figura 36 - RAS Mapper com o modelo de terreno



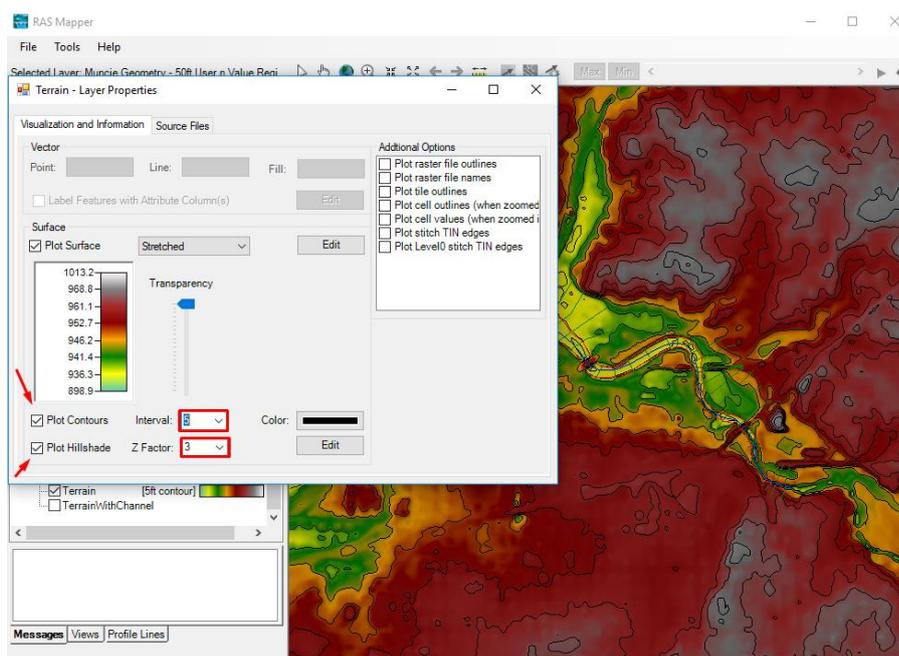
Uma vez criado o modelo de terreno, o usuário pode alterar sua aparência clicando com o botão direito em cima da camada e em seguida em “**Layer Properties**”. A janela de *Propriedades da Camada (Layer Properties)* (Figura 37) permite o usuário: selecionar e controlar a rampa de cores da superfície; transparência; criar e mostrar as curvas de nível; sombrear o terreno usando o algoritmo de sombreado (sombreamento de superfícies torna a visualização bem mais realística e semi-3D).

Figura 37 - Janela de propriedades para a camada do modelo de terreno



Um exemplo de dados de terreno com algumas propriedades de *layer* modificadas (com sombreado de superfícies e curvas de nível aplicadas) é mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Terreno com sombreado de superfície e curva de nível aplicados



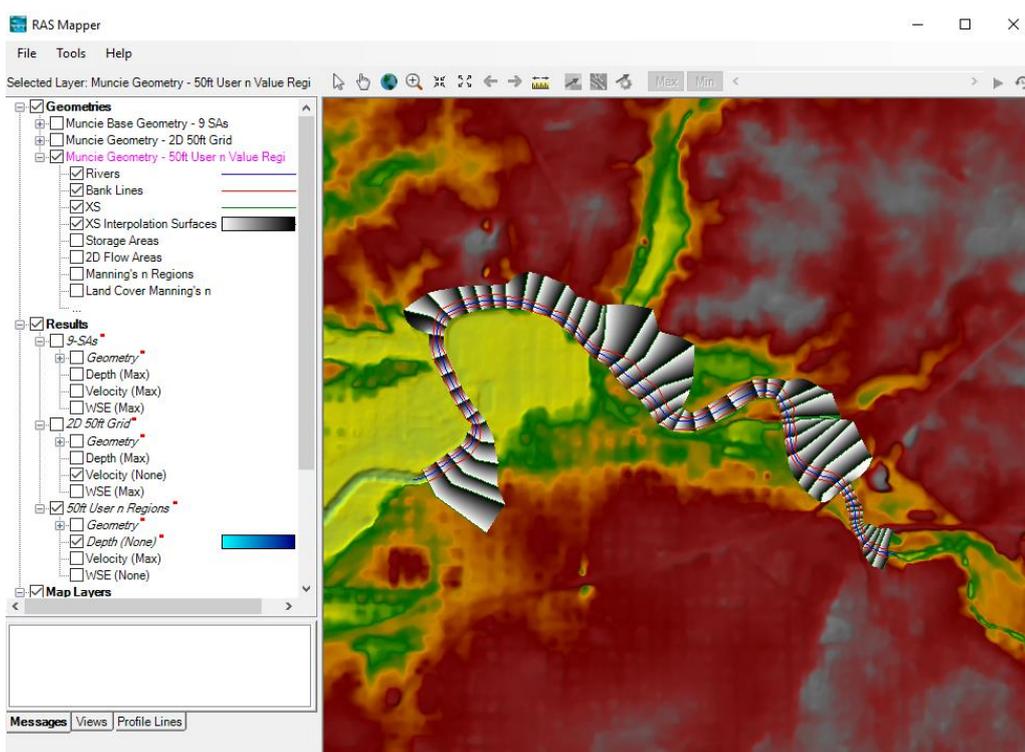
7.2.4 Utilizando as seções transversais para modificar e melhorar o modelo de Terreno

Um dos principais problemas na modelagem hidráulica é que os dados de terreno muitas vezes não incluem o terreno abaixo da superfície de água do canal na região. O *RAS Mapper* agora pode ser utilizado para criar um modelo de terreno para a região do canal através das seções transversais do *HEC-RAS* e da interpolação de superfície das seções transversais. Esse modelo de terreno do canal pode então ser combinado com o modelo geral de terreno (que não contém de modo preciso o modelo abaixo da superfície de água) para criar um novo modelo aperfeiçoado para modelagem hidráulica e mapeamento.

7.2.4.1 Criar um modelo de terreno do canal

A partir do *RAS Mapper*, marcar a *Camada de Geometria* para que os dados geométricos possam ser utilizados para criar o modelo do canal. Também marcar as seguintes subcamadas: *Rios (River – stream centerlinear)*, *Linha de Ribanceira/Barranco (Bank Lines)*, *Seções-transversais (XS-Cross sections)* e *Superfície de interpolação das seções transversais (XS-Interpolation Surface)* para garantir que estão corretas e o que o usuário espera para o novo modelo de terreno do canal. Essa informação, juntamente com o terreno, que será utilizada para criar uma geometria do canal. Vejo o exemplo na Figura 39 com as camadas e subcamadas marcadas.

Figura 39 - RAS Mapper com o terreno base e as camadas do terreno mostradas



Uma vez que as camadas geométricas estão completas, o modelo de terreno do canal é criado clicando-se com o botão direito em cima da camada e em seguida em *Criar Terreno GeoTIFF a partir de XS's (unicamente canal)* (**Create Terrain GeoTIFF from XS's (channel only)**). Alternativamente, o usuário pode criar um terreno para toda região da seção transversal (canal e planície de inundação) (**channel and overbank**), contudo, se o modelo de terreno base possui uma boa precisão para planície de inundação, o usuário não irá querer fazer isso. Uma vez que a opção *Exportar (Export)* é selecionada, uma janela será mostrada, na qual o usuário precisa informar o nome do modelo de terreno e escolher a pasta na qual irá salvar.

Uma vez escolhido o diretório e o nome do arquivo, clique em salvar para criar o modelo de terreno do canal. O programa vai, então, perguntar ao usuário a resolução da célula a ser usada para criar o arquivo *Raster* do canal. Por exemplo, se o usuário digitar “5.0”, então, o novo modelo de terreno do canal terá uma malha de 5 m x 5 m. O modelo de terreno é criado pegando os dados de elevação das seções transversais e usando a superfície interpolada para interpolar uma elevação para cada célula da malha entre duas seções transversais. Esse novo terreno é então cortado com base nas linhas de ribanceira/barranco (*main bank stations*) se o usuário selecionar a opção de unicamente o canal. Finalmente, um novo terreno, com base nessas interpolações, no formato GeoTIFF é criado.

Figura 40 - Exportar geometria do canal

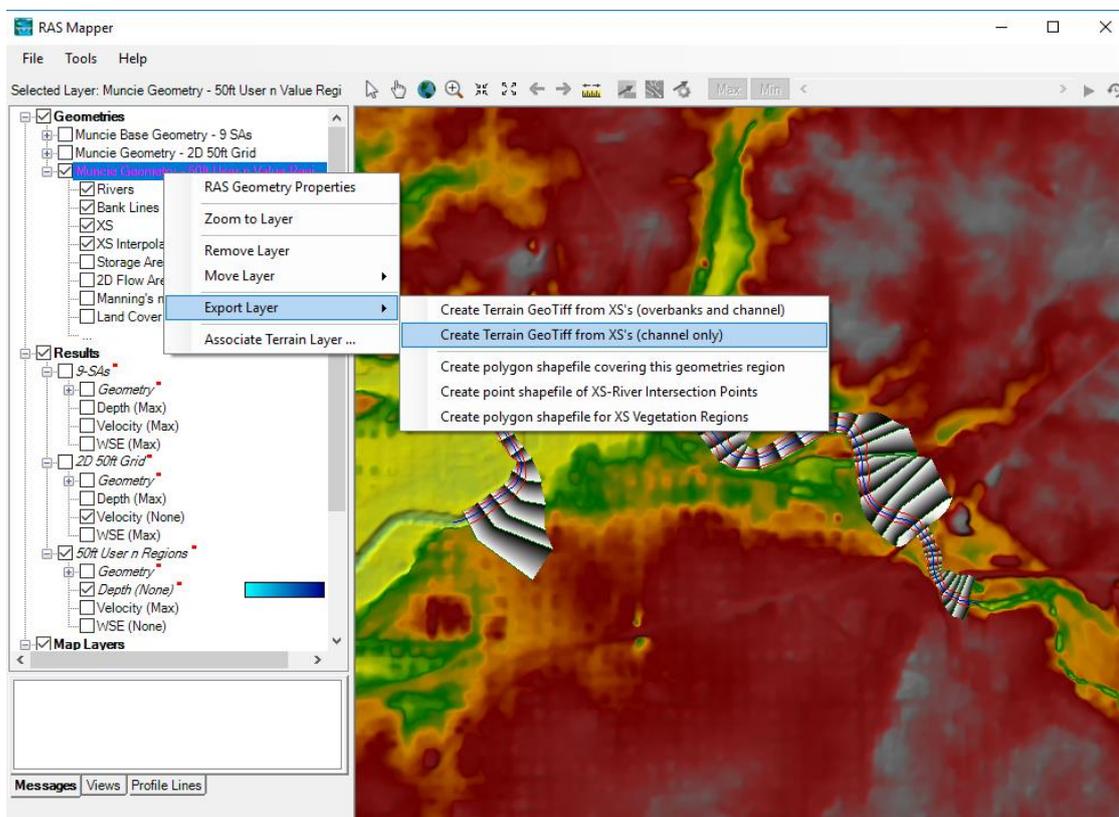
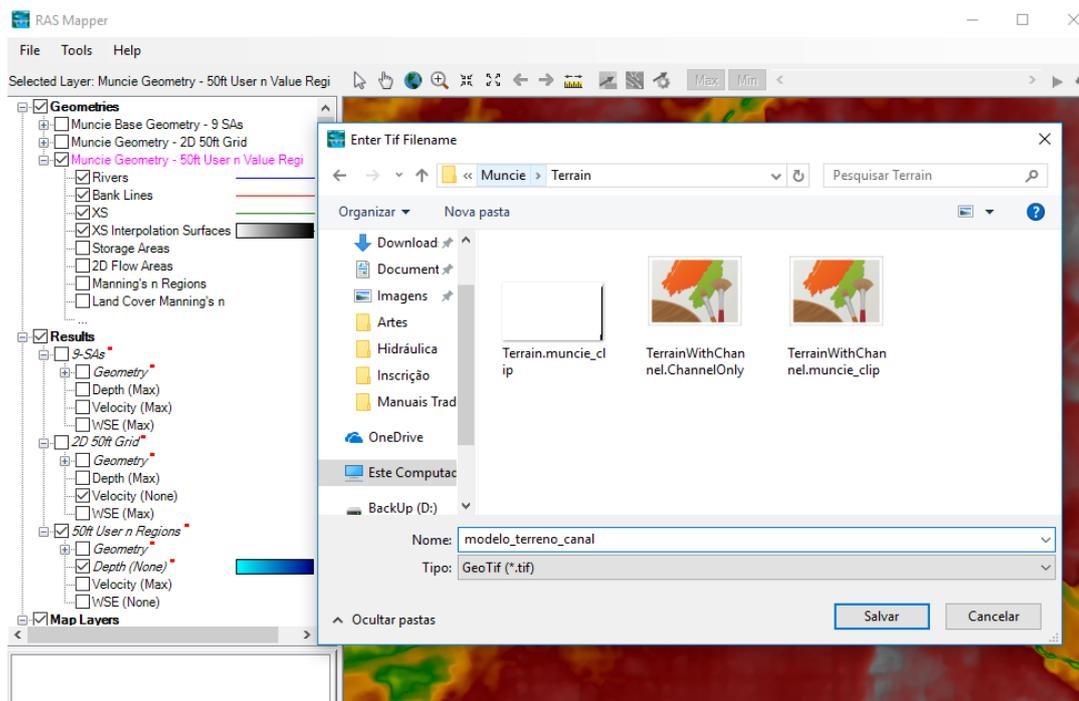


Figura 41 - Salvar o modelo de terreno do canal



Dica!!

O usuário talvez queira **realizar uma cópia** do modelo hidráulico 1D e então mover as linhas de ribanceira/barranco para dentro do canal, de tal maneira que a área entre essas linhas somente represente partes das seções transversais que são novas e não existentes no modelo de terreno base. Assim, quando o novo modelo de terreno for criado a partir das seções transversais, entre as linhas de ribanceira, irão **representar somente informações novas**, que não existem no modelo de terreno base e, portanto, **não vai apagar nenhuma informação boa** que já existe no

7.2.4.2 Criando um Modelo Combinado de Canal e Terreno Base

Uma vez que o usuário possui um modelo de terreno a partir dos dados do canal, um novo modelo combinado de terreno pode ser criado com base no modelo de terreno base e no novo modelo de terreno do canal. Para criar um novo modelo combinado de terreno, selecione no menu principal *Ferramentas* → *Novo Terreno...* (*Tools* → *New Terrain*). Esse procedimento é o mesmo realizado anteriormente para criar o terreno base no RAS Mapper, contudo, os arquivos usados para criar este modelo de terreno serão o arquivo GeoTIFF do

terreno base anteriormente criado e o arquivo GeoTIFF do novo terreno do canal. Uma vez que a opção *Novo Terreno (New Terrain)* é selecionada, a janela para criar um novo terreno irá aparecer. Escolha o novo Nome para o novo terreno (“TerrainiWithChannel” foi utilizado no exemplo do manual do HEC-RAS). Escolha a pasta na qual o arquivo será salvo. Selecione a precisão do novo modelo de terreno, lembrando que a precisão não deve ser melhor que a precisão dos arquivos utilizados para criar o novo modelo de terreno. Clique no sinal de *Mais (Plus)* **+** e selecione os arquivos GeoTIFF do terreno base e do arquivo do canal. Certifique-se que o arquivo o arquivo com o modelo de terreno do canal tenha prioridade maior que o modelo do terreno base (ou seja, que fica em primeiro na lista de terrenos adicionados). Em seguida, clique no botão *Criar (Create)* e um novo modelo combinado de terreno será criado e adicionado ao projeto do RAS Mapper. Veja o original (sem a inclusão das seções transversais) e o combinado (com a inclusão das seções transversais).

Figura 42-Terreno sem canal

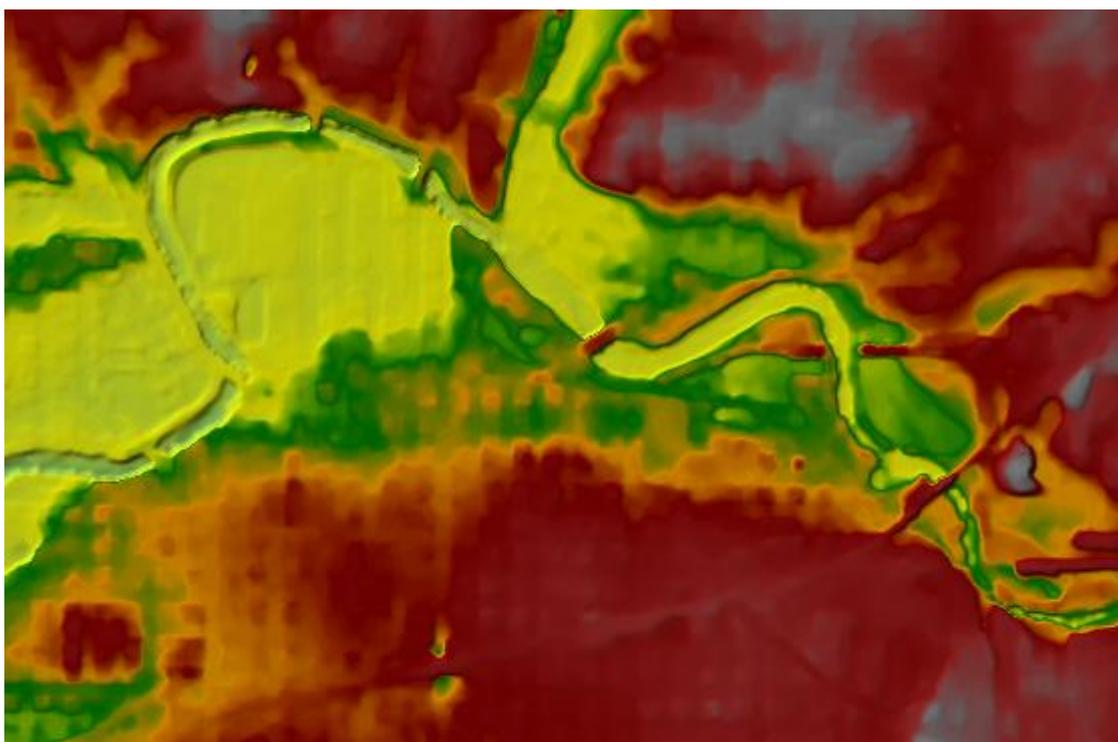
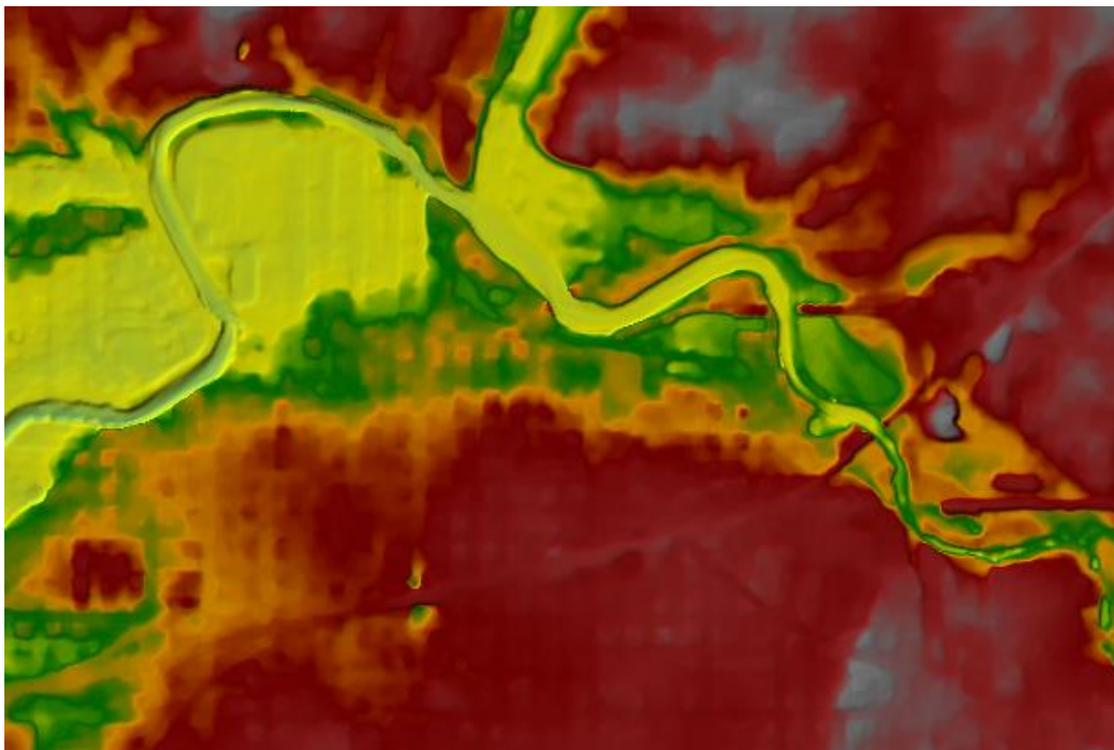


Figura 43 - Terreno com canal



7.3 Desenvolvimento de um modelo combinado 1D/2D

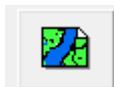
7.3.1 Desenvolvimento da Malha Computacional 2D

A modelagem no HEC-RAS utiliza o Método dos Volume Finitos para solução das equações diferenciais. Esse algoritmo foi desenvolvido para permitir a utilização de malhas estruturadas e não estruturadas. Isso significa que a malha pode ser uma mistura de células computacionais com 3 lados, 4 lados, 5-lados até 8 lados. Contudo, o usuário irá muito provavelmente selecionar a resolução espacial nominal da malha (por exemplo, 60m x 60m), e as ferramentas automáticas do HEC-RAS irão construir a malha computacional. Após a malha inicial ser construída, o usuário pode refinar a malha com o uso de *linhas de quebra (breaklines)* e as ferramentas de edição de malha. Uma malha computacional é desenvolvida no HEC-RAS fazendo os seguintes passos:

7.3.2 Desenhando um polígono de contorno para a área 2D

O usuário deve adicionar uma área de fluxo 2D (polígono) para representar o contorno no qual será realizado a modelagem 2D, utilizando as ferramentas de desenho do *Editor Geométrico (Geometric Editor)*, da mesma forma que um usuário iria criar uma área de armazenamento. Adicionalmente, o usuário talvez queira importar um arquivo *shapefile* que

representa a área protegida, caso estejam trabalhando um sistema de contenção lateral (*levee system*). As imagens de fundo irão ajudar o usuário a definir onde desenhar o contorno da área de fluxo 2D para permitir capturar o topo das contenções laterais (*levees, floodwalls*) ou qualquer terreno elevado que irá agir como barreira ao fluxo.



Use o botão de mapeamento de imagem de fundo, no *Editor Geométrico (Geometric Editor)*, para ativar a camada de terreno ou outras camadas, de modo a permitir visualizar onde o contorno da área de fluxo 2D deve ser desenhado. Se você criar uma camada de Terreno no RAS Mapper, e quiser mostrar no *Editor Geométrico (Geometric Editor)*, após ativar aquela camada, será necessário você ir no menu *Visualizar (View)*, em seguida, selecione *Definir Extensões de Desenho (Set Schematic Plot Extents)*. A partir dessa janela, selecione a opção chamada *Definir para Extensão Calculada (Set to Computed Extents)*. Essa opção irá redefinir a extensão da janela de visualização do *Editor Geométrico* para a extensão do modelo de terreno que você criou e associou aos dados geométricos.

Importante!!

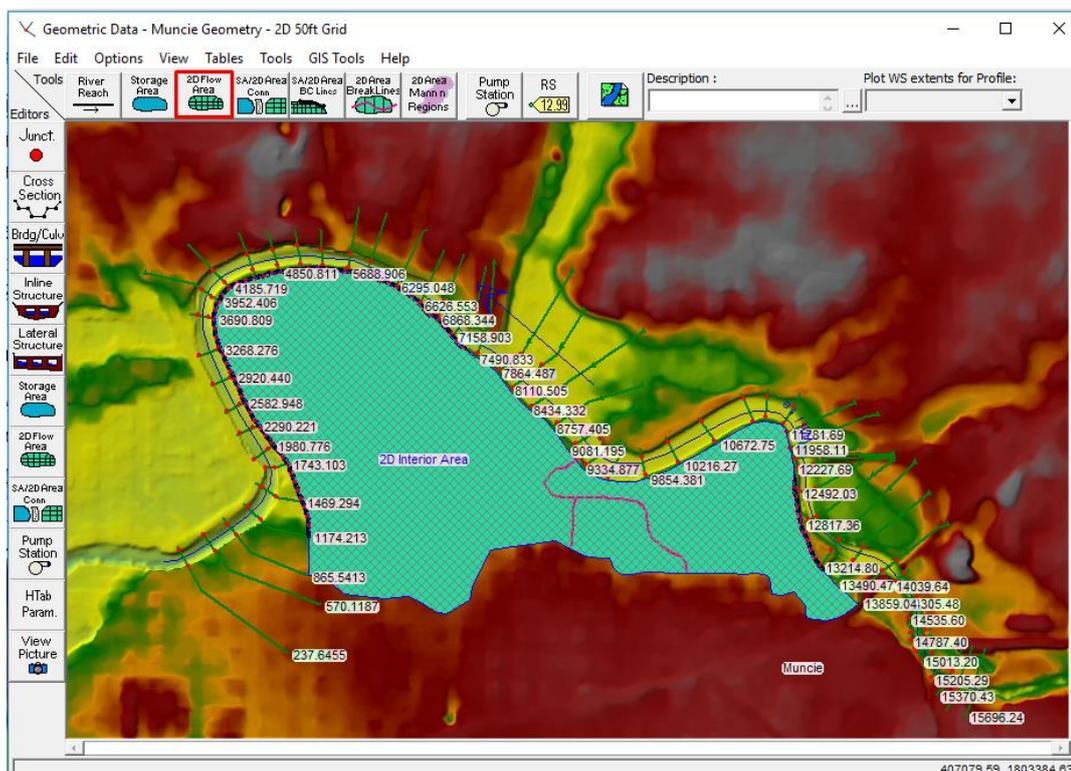
O contorno entre um trecho de rio 1D e uma área de fluxo 2D deve ser o terreno elevado que separa os dois. Para elementos de contenção (*levees*) e estradas/ruas seria a linha central do elemento de contenção ou da estrada/rua. Contudo, quando utilizando uma estrutura lateral para conectar o rio principal a planície de inundação (onde não há um elemento real de contenção), tente encontrar o terreno elevado que separa o rio principal da planície de inundação. Use esse terreno elevado como guia para desenhar o contorno 2D, assim como para definir os dados de *Posição-Elevação da Estrutural Lateral*.

Para criar uma área de fluxo 2D, utilize a ferramenta de *Área de Fluxo 2D (2D Flow Area)*, conforme Figura 44 do *Editor Geométrico*. Amplie até o momento que você consiga ver em grandes detalhes onde desenhar o contorno da área de fluxo 2D. Comece clicando com o botão esquerdo do mouse para adicionar o primeiro ponto do contorno. Em seguida, continue utilizando o botão esquerdo para adicionar novos pontos ao contorno. Quando o usuário ficar sem espaço na tela para adicionar novos pontos, ele pode clicar com o botão direito do mouse para centralizar a tela, dando mais área para continuar desenhando o contorno da área de fluxo 2D. Clique duas vezes com o botão esquerdo para finalizar de criar o polígono. Uma vez que a área 2D for finalizada, a interface irá perguntar o nome para identificá-la. A Figura 44 é um

exemplo de área de fluxo 2D que é protegida por um sistema de contenção lateral (*levee*). O nome dado a essa área foi “2D Interior Area”.

Nota: Uma área de fluxo 2D deve ser desenhada dentro dos limites da área do modelo de terreno utilizado no estudo.

Figura 44 - Exemplo de polígono 2D



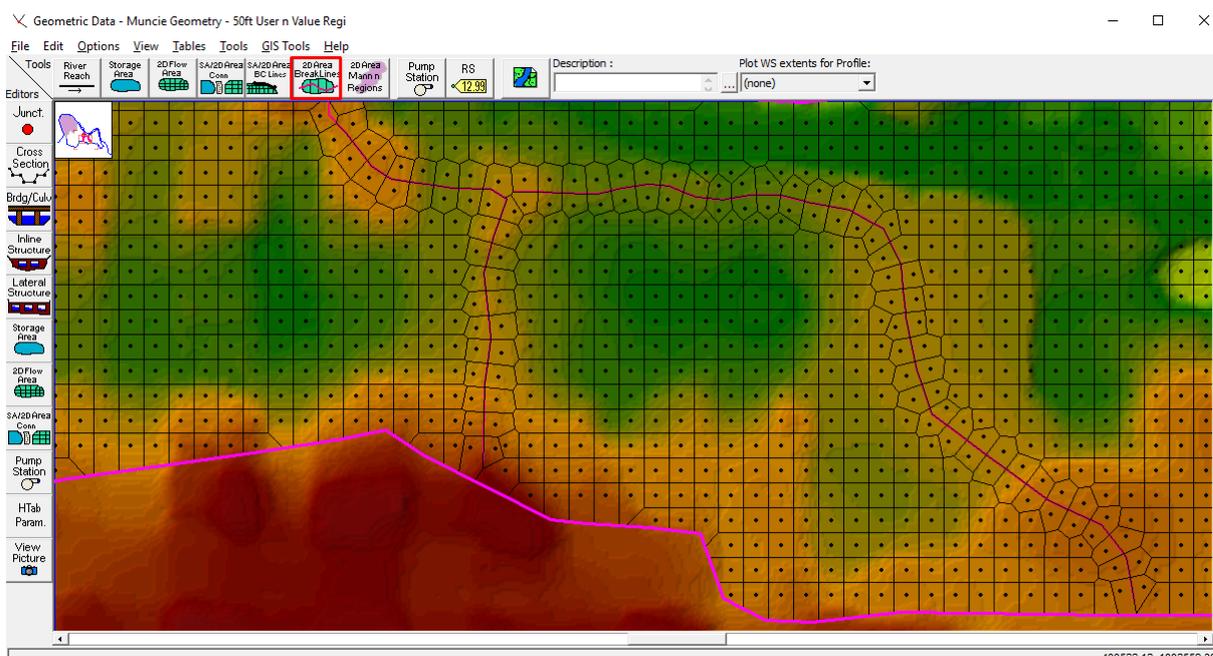
7.3.3 Adicionando linhas de quebra em uma área de fluxo 2D

Antes de criar a malha computacional, o usuário talvez queira adicionar *Linhas de Quebra (Linhas de Quebra)* para forçar as ferramentas de geração de malha alinharem as faces ao longo das linhas de quebra. Essas linhas também podem ser adicionadas após a malha computacional ser criada, e a malha pode ser gerada novamente somente ao longo das linhas de quebra. De maneira geral, linhas de quebra devem ser adicionadas em qualquer local que serve como barreira ao fluxo ou controla o fluxo/direção.

As *Linhas de Quebra* podem ser importadas a partir de arquivos *Shapefile (GIS Tools → Breaklines Import from Shapefile)*, desenhadas manualmente, ou as coordenadas podem ser copiadas para tabela (*GIS Tools → Breaklines Coordinates Table*). Para adicionar as linhas de quebra manualmente em uma área de fluxo 2D, selecione a ferramenta *Linha de Quebra para Área 2D (2D Area Breakline Tool)* (em destaque na Figura 45), em seguida clique com o botão esquerdo na janela de geometria para começar a desenhar a linha de quebra. Enquanto desenhando-a, você pode utilizar o botão direito para recentralizar a tela de modo a

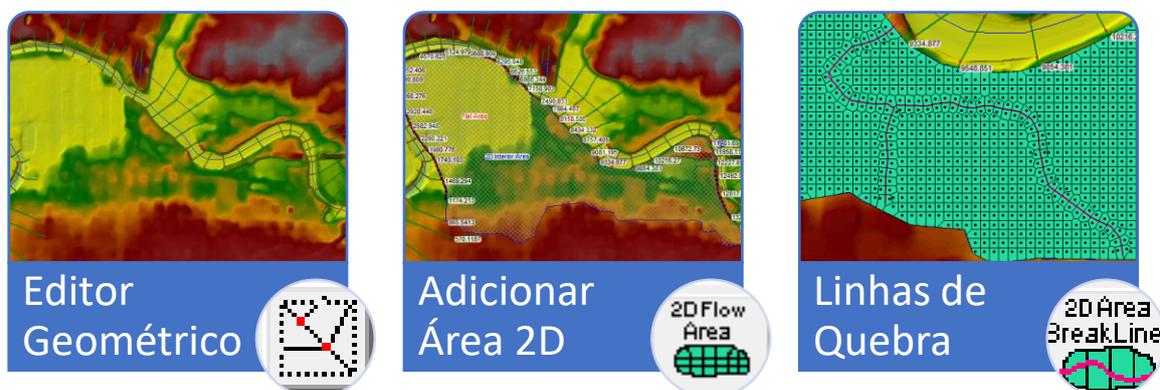
ter mais área para desenhar. Adicione linhas de quebra ao longo de barramentos, estradas, e qualquer terreno alto que você deseje alinhar as faces da malha. As linhas de quebra também podem ser posicionadas ao longo das margens dos rios, em ordem a manter o fluxo dentro do canal principal até que o nível da água atinja uma elevação suficiente para ultrapassar as margens do rio ao longo do canal principal. Um exemplo de utilização das *Linhas de Quebra* é mostrado na Figura 45.

Figura 45 - Linhas de Quebra



Após todas as *Linhas de Quebra* serem adicionadas, a malha computacional pode ser gerada. Tenha em mente que o usuário também pode adicionar *Linhas de Quebra* após a malha computacional ter sido gerada, e a malha computacional pode ser aprimorada ao redor da *Linha de Quebra* a qualquer tempo. Isso será discutido em mais detalhes na seção “Editando/Modificando a Malha Computacional”.

Figura 46 - Comandos Básicos



7.3.4 Criando a Malha Computacional 2D

A metodologia no HEC-RAS para desenvolver a *Malha Computacional 2D* começa com a definição da *Área De Fluxo 2D*. Esta define a contorno no qual os cálculos do modelo 2D irão ocorrer. A *Malha Computacional 2D* é criada dentro de uma *Área de Fluxo 2D*. Cada célula na *Malha Computacional* tem as seguintes três propriedades (Figura 48):

1. **Centro da Célula:** O centro computacional da célula. Esse é o local no qual a elevação da água é computada para célula. Este centro não corresponde necessariamente ao centroide da célula.
2. **Faces da Célula:** Esses são os contornos das células. As *Faces das Células* normalmente são linhas retas, mas elas também podem ser formadas por múltiplas linhas, como no contorno exterior da *Área De Fluxo 2D*.
3. **Pontos das Faces:** Os *Pontos das Faces* (PF) são os pontos finais das faces das células. Os *Números dos Pontos das Faces* do contorno exterior de uma *Área de Fluxo 2D* são utilizados para conectá-la aos elementos 1D e condições de contorno.

Figura 47 - Propriedades da Malha Computacional

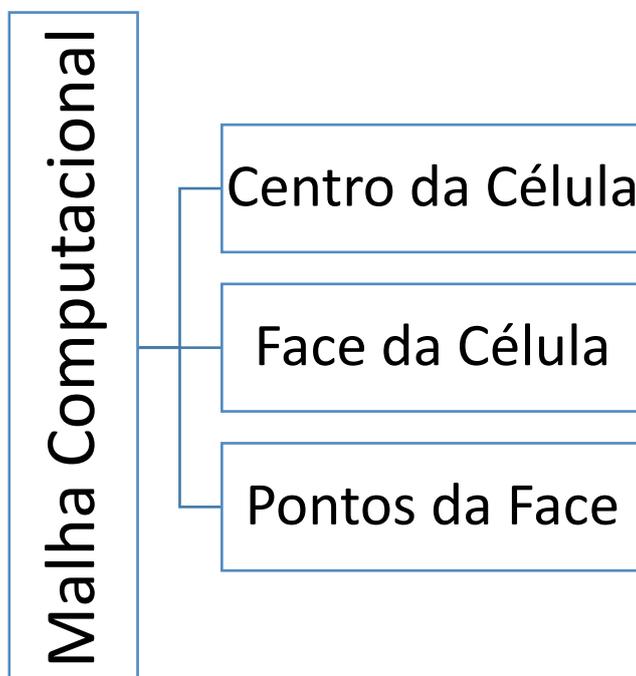
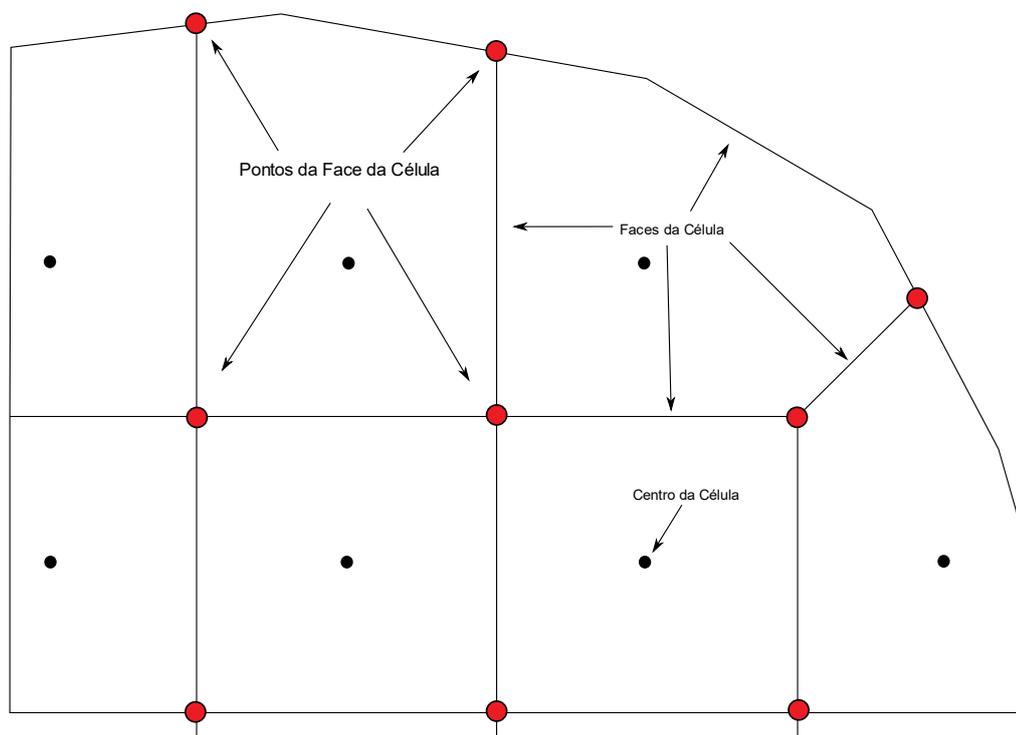


Figura 48 - Terminologia para modelagem computacional da malha no HEC-RAS 2D



Para criar uma malha computacional 2D, selecione o botão *Área de Fluxo 2D (2D Flow Area)* na barra de ferramentas esquerda do *Editor Geométrico de Dados* para mostrar a janela de edição (Figura 49).

O editor da *Área de Fluxo 2D* permite que o usuário selecione um tamanho nominal para geração da malha computacional inicial. Para usar este editor, primeiramente selecione o botão denominado *Gerar Pontos Computacionais em Intervalo Regular (Generate Computational Points on Regular Interval...)*. Isso irá mostrar uma janela “*popup*” que irá permitir o usuário entrar com o tamanho nominal da célula. O editor requer que o usuário especifique os *Espaçamentos Computacionais entre Pontos* em termos de DX e DY (Figura 50). Isso define o espaçamento os centros das células computacionais. Por exemplo, se o usuário entrar com $DX=50$ e $DY=50$, terá uma malha computacional espaçada 50×50 em todos os locais, exceto ao redor das *Linhas de Quebra* e o contorno externo. As células criadas no contorno externo terão tamanho próximo do nominal, mas terão uma forma irregular.

Esse editor (Figura 50) possui uma opção denominada *Shift Generated Points*, que pode ser utilizada para mudar a posição da origem para o cálculo das coordenadas do centro de cada célula. Por padrão é utilizado como origem o canto esquerdo superior do contorno do

polígono que representa a *Área de Fluxo 2D*. O uso dessa opção permite o usuário deslocar a origem da malha, e, portanto, a localização do centro das células.

Figura 49 - Editor para geração da malha computacional

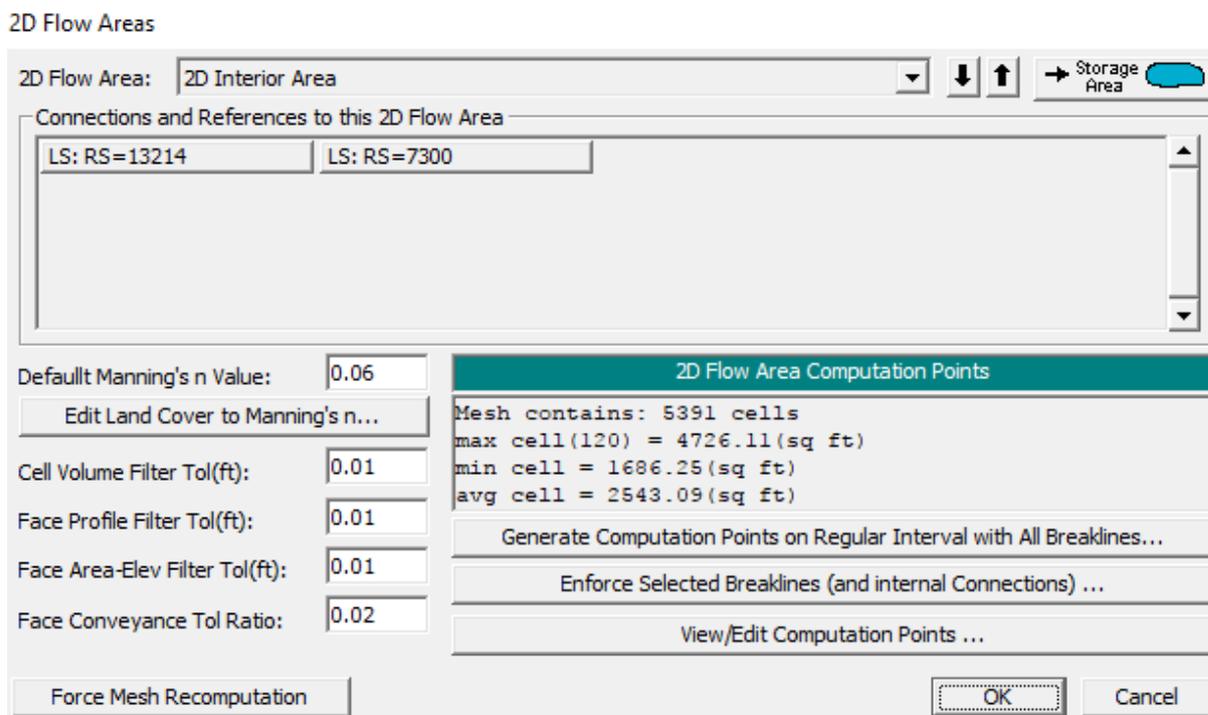
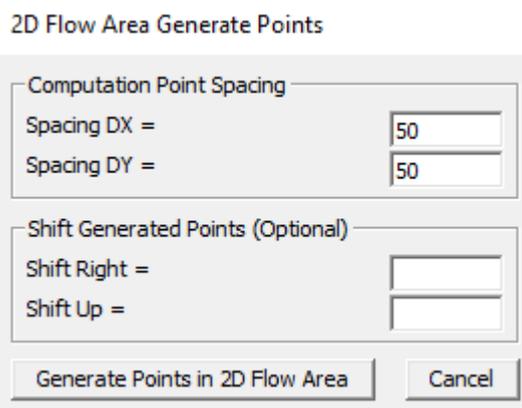


Figura 50 - Espaçamento Computacional



Como o usuário pode adicionar *Linhas de Quebra*, as ferramentas de geração de malha irão automaticamente tentar “alinhar” as *Faces das Células* com as *Linhas de Quebra*. Estas faces, formadas ao redor das *Linhas de Quebra*, nem sempre estarão perfeitamente alinhadas. Uma opção adicional disponível para realizar essa tarefa é **Forçar Linhas de Quebra Seleccionadas (Enforce Selected Breakines)**. Esta opção irá criar células alinhadas com as *Linhas de Quebra*, o que ajuda a garantir que o fluxo não passar entre as faces das células até que a superfície da água fique maior que o terreno ao longo da linha de quebra. Quando se utiliza essa funcionalidade, o programa irá criar células espaçadas ao longo da *Linha de Quebra*

de tamanho nominal igual ao escolhido pelo usuário. Contudo, o usuário pode indicar um tamanho diferente para ser utilizado ao longo da *Linha de Quebra*. Isso é realizado selecionando **GIS Tools/Breaklines Cell Spacing Table**, e, então, fornecendo o tamanho desejado para a célula no espaçamento.

Após o *Espaçamento Computacional* (DX e DY) ter sido escolhido, pressiona-se o botão **Gerar Pontos na Área de Fluxo 2D** (*Generate Points in 2D Flow Area*). Isso irá fazer com que o programa calcule uma série de pontos coordenados (X e Y) para os centros das células. O usuário pode visualizar esses pontos clicando no botão **Ver/Editar Pontos Computacionais** (*View/Edit Computational Point's*), mostrando os pontos em uma tabela. O usuário pode copiar e colar esses pontos em uma planilha ou editá-los diretamente se desejado.



Cuidado!!

Se já existir uma malha computacional e a opção **Gerar Pontos na Área de Fluxo 2D** é utilizada, todos os pontos existentes na malha atual serão substituídos com pelos novos pontos gerados. Os dados anteriores e suas alterações serão perdidos.

Existem cinco campos adicionais no *Editor de Área de Fluxo 2D* (Figura 49) que são utilizados durante o pré-processamento 2D. Os campos são os seguintes:

Coefficiente de Manning Padrão (Default Manning's Value): Esse campo é utilizado para entrar com o valor padrão dos coeficientes de Manning que serão utilizados nas faces das células da malha. Os usuários têm a opção de adicionar uma classificação em tabela com variação espacial de Terreno vs Coeficientes de Manning (e uma camada corresponde no RAS Mapper), que pode ser utilizada para sobrepor os valores padrões. Para regiões que não são cobertas por essa camada, o valor padrão será utilizado. Também há um botão denominado **Editar Classificação de Terreno para Manning's** (*Edit Land Classification to Manning's*). Esse botão traz uma tabela para que o usuário possa relacionar os campos da *Camada de Terreno* com os respectivos valores de Manning. Essa tabela também pode ser acessada através do menu **Tabelas (Tables)** e selecionando **Valores de Manning por Classificação de Terreno** (*Manning's n by Land Classification*).

Filtro de Tolerância para Volume de Célula (Cell Volume Filter Tol): Essa tolerância é utilizada para reduzir o número de pontos nas *Curvas Volume vs Elevação* que são desenvolvidas no pré-processador geométrico. Poucos pontos nas curvas irão aumentar os

cálculos computacionais, mas irão reduzir a precisão dessa relação. O valor padrão para filtragem dos pontos é 0,01.

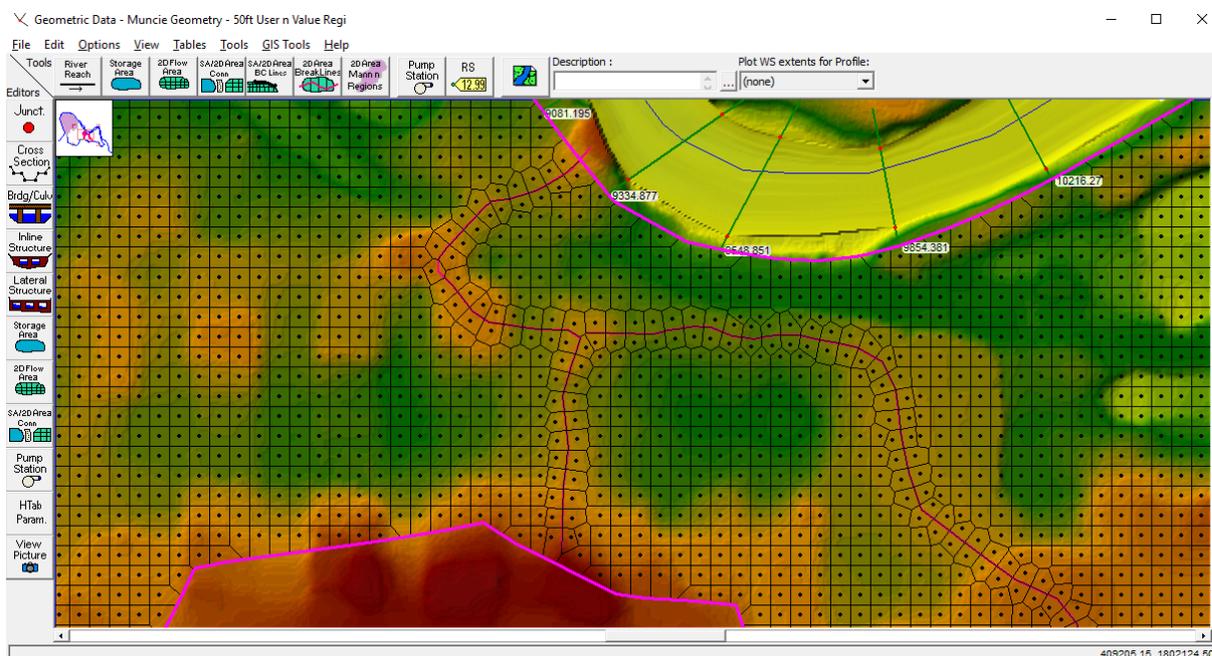
Filtro de Tolerância para Perfil de Face (Face Profile Filter Tol): Esse filtro é utilizado para reduzir o número de pontos que são extraídos do *Modelo Detalhado de Terreno* para cada face da célula 2D. O valor padrão é 0,01.

Filtro de Tolerância da Relação Área-Elevação (Face Area-Elev Filter Tol): Esse filtro é utilizado para reduzir o número de pontos nas tabelas de propriedades hidráulicas das faces. O valor padrão é 0.01.

Filtro de Tolerância da Relação de Transporte na Face (Face Conveyance Filter Tol): Esse filtro é utilizado para determinar se será necessário mais ou menos pontos no ponto baixo final das *Tabelas de Propriedades da Faces*.

Uma vez entrado com o tamanho das células, as *Linhas de Quebra*, o valor de Manning e as tolerâncias, o usuário pode pressionar o botão **OK** para aceitar os dados e fechar o editor. Quando clicado, o programa automaticamente cria uma malha computacional e mostra na janela do *Editor Geométrico*

Figura 51 - Malha Computacional Criada, com Linhas de Quebra



Como mencionado anteriormente, células ao redor das *Linhas Quebra* e no contorno da *Área de Fluxo 2D* serão tipicamente de formato irregular, de modo a se ajustar o formato das mesmas. Contudo, as ferramentas de geração de malha desenvolvem essa malha irregular de modo garantir que a área das células irregulares no contorno não seja menor que o adotado pelo tamanho nominal do usuário.

7.3.4.1 Editando e Modificando a Malha Computacional

A malha computacional irá controlar o movimento da água através da *Área de Fluxo 2D*. Especificamente, uma elevação de água é calculada para cada célula da malha computacional em cada intervalo de tempo. As faces das células computacionais controle o fluxo entre as células. No HEC-RAS, o terreno subjacente e a malha computacional são pré-processados de modo a desenvolver relações detalhadas *Elevação vs Volume* para cada célula, assim como *Curvas Hidráulicas* detalhadas para cada face das células (*Elevação vs Perímetro Molhado, Área e Rugosidade*). Criando essas tabelas a partir do *Modelo Detalhado de Terreno Subjacente*, temos as propriedades do mesmo como *Capacidade de Armazenamento e Transporte* são levados em consideração, independentemente do tamanho da célula computacional adotada. Contudo, ainda assim, há limite para qual o tamanho da célula a se utilizar, como também estudar importantes considerações para locais em que malhas mais detalhadas são necessárias ou mais grosseiras podem ser utilizadas.

De forma geral, o tamanho da célula deve ser baseado na inclinação da superfície da água em uma dada área, assim como barreiras existentes no terreno. Locais que a inclinação da superfície da água é plana e pouco variável, malhas mais grosseiras podem ser apropriadas. Já em locais com inclinações mais acentuadas ou com mudanças bruscas na superfície da água requerem uma malha detalhada. Como o movimento da água é controlado pela faces da células, para definir mudanças bruscas e mudanças rápidas no fluxo pode ser necessário células menores.

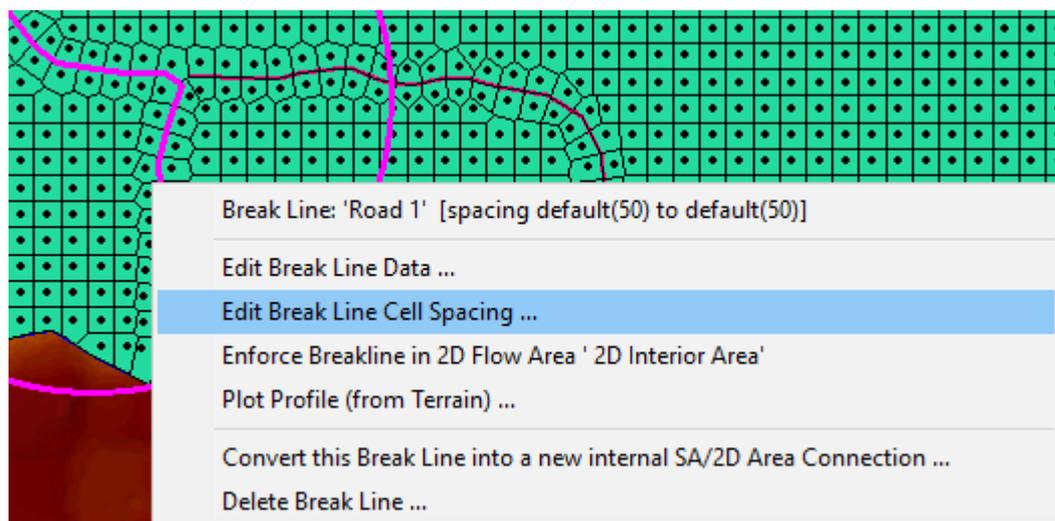
A malha computacional pode ser editada/modificada com as seguintes ferramentas: *Linhas de Quebra, Movendo Pontos, Adicionando Pontos e Removendo Pontos*.

7.3.4.2 Linhas de Quebra

O usuário pode adicionar *Linhas de Quebra* a qualquer momento. HEC-RAS permite adicionar essas Linhas sobre uma malha já existente e regenerar a malha ao redor dela, sem mudar a malha em outros locais. O usuário pode desenhar uma nova *Linha de Quebra*, clicar com botão esquerdo em cima dela e selecionar a opção ***Forçar Alinhamento à Linha de Quebra (Enforce Break Line in 2D Flow Area)***. Uma vez que essa opção é selecionada, novas células são geradas ao redor da *Linha de Quebra* com as faces alinhadas ao longo da mesma.

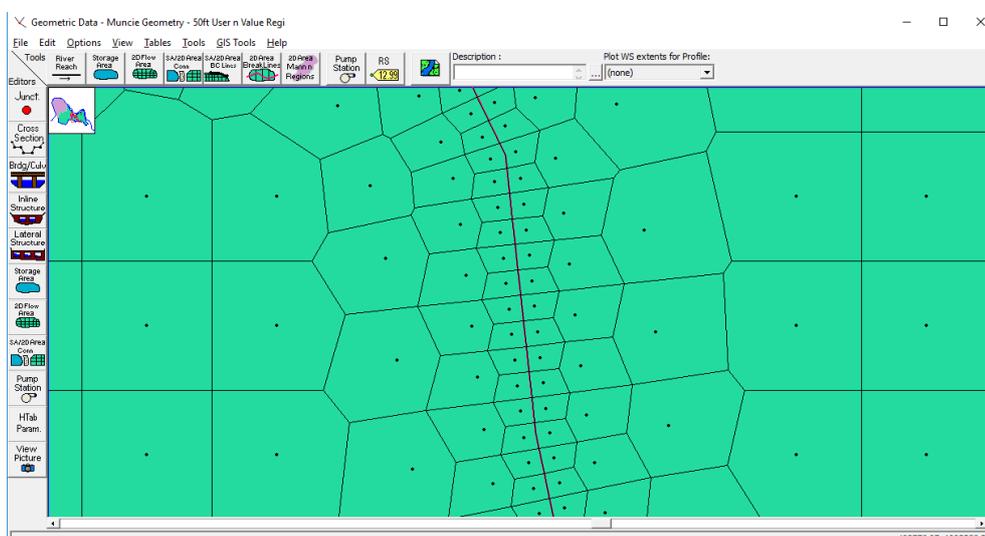
Adicionalmente, o usuário pode controlar o tamanho/espaçamento ao longo da *Linha de Quebra*. Para controlar o espaçamento, clica-se com botão esquerdo e seleciona-se a opção ***Editar Espaçamento da Célula na Linha de Quebra (Edit Break Line Cell Spacing)***, conforme Figura 52.

Figura 52 - Editar Espaçamento das Células na Linha de Quebra



Irá aparecer uma janela para que o usuário entre com o espaçamento mínimo e máximo a ser utilizado na regeneração da malha. O valor mínimo será utilizado, mas células em contato com a *Linha de Quebra*, que serão gradualmente aumentadas até ficar do tamanho da malha nominal, conforme Figura 53. O usuário tem a opção de escolher um valor máximo para a transição. Após isso, é necessário utilizar a opção **Forçar Alinhamento à Linha de Quebra** para que a nova malha seja gerada. O usuário também tem a opção de mostrar a tabela com todas as *Linhas de Quebra* e os espaçamentos respectivos escolhidos pelo usuário. Para essa tabela, clique em **Ferramentas GIS (GIS Tools) → Tabela de Espaçamento de Células nas Linhas de Quebra (Break Lines Cell Spacing Table)**. Uma vez aberta esta tabela, o usuário pode modificar os espaçamentos através da mesma. Após modificações, será necessária realizar a regeneração da malha.

Figura 53 - Transição gradual para células na Linha de Quebra





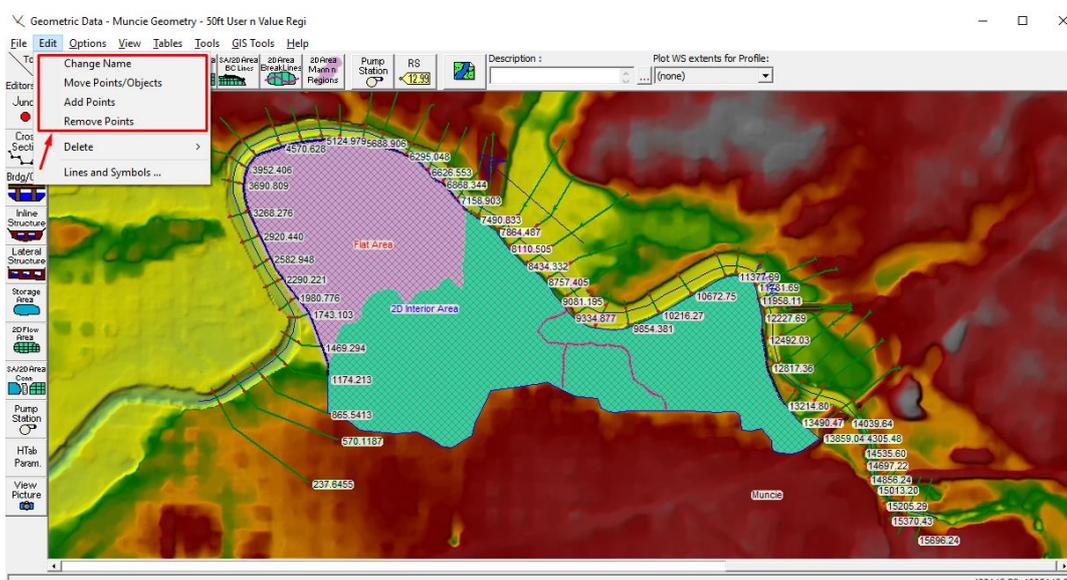
Entendendo Melhor

Ao criar-se uma malha ao redor de uma *Linha de Quebra* recomenda-se a utilização de células menores próximas a Linha com a transição para o tamanho nominal conforme se afasta da mesma. Contudo, uma transição brusca de células pequenas para células grandes normalmente não produz bons resultados. Por isso, é necessário realizar uma transição gradual.

7.3.4.3 Ferramentas Manuais de Edição

As ferramentas manuais de edição estão disponíveis através do menu **Editar (Edit)** do *Editor Geométrico do HEC-RAS*, conforme Figura 54. Se o usuário selecionar **Editar(Edit)** → **Mover Pontos/Objetos (Move Points/Objects)**, poderá selecionar e mover qualquer ponto central das células ou pontos do contorno do polígono. Se um centro de célula é movido, todas células no seu entorno serão também alteradas. Se o usuário selecionar **Editar(Edit)** → **Adicionar Pontos (Add Points)**, quando clicar com botão esquerdo dentro de uma *Área de Fluxo 2D*, um novo ponto central de célula é adicionado, e os elementos de seu entorno serão alterados (quando a malha for atualizada). O programa cria uma malha local (área visível na tela, mais uma zona *buffer*), de tal forma que quando ocorrer uma edição, somente a malha local será atualizada. A malha completa somente atualiza quando o usuário desabilitar a ferramenta de edição (esse procedimento salva tempo computacional). Se o usuário selecionar **Editar(Edit)** → **Remover Pontos (Remove Points)**, quando clicar próximo a qualquer a um centro de célula irá remover

Figura 54 - Ferramentas de Edição Manual



O Usuário pode utilizar isso para adicionar ou mover pontos em regiões em que mais detalhes são necessários, assim como remover nas quais menos detalhamento é necessário.

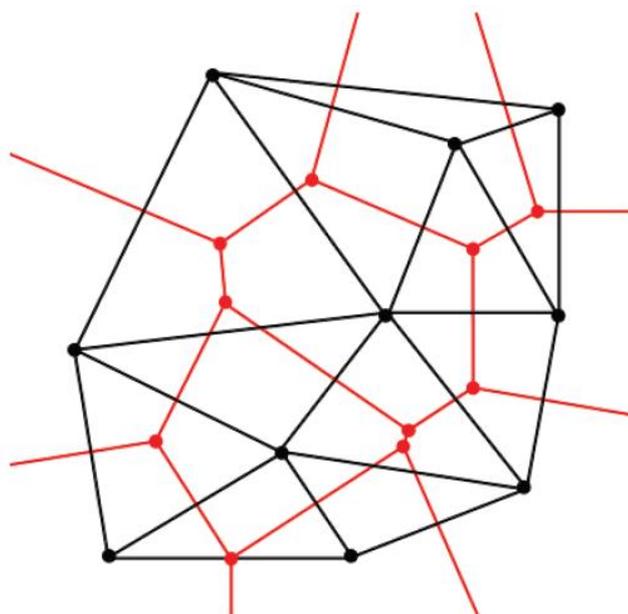


Entendendo Melhor

De forma geral, deve ser possível a utilização no HEC-RAS de células maiores que nos modelos que não pré-processam as células e suas faces em tabelas utilizando o *Terreno Subjacente*. Muitos modelos 2D utilizam uma única elevação plana para toda célula, e a uma única elevação para cada face da célula. Esses tipos de modelos normalmente requerem células computacionais menores de modo a capturar os detalhes do modelo de terreno.

O HEC-RAS cria sua malha computacional utilizando o Método de Triangularização de Delaunay e construindo os respectivos Diagramas de Voronoi (veja Figura 55). Os triângulos em preto são formados utilizando o *Método de Triangularização de Delaunay*, enquanto que as células em vermelho são formadas bissecando todas as arestas dos triângulos e prolongando até a interseção (*Diagrama de Voronoi*). É um método similar ao de *Thiessen* para cálculo da chuva média em uma bacia.

Figura 55 – Método de Delaunay-Voronoi



7.3.5 Problemas potenciais na geração da malha

As ferramentas automáticas de geração de malha do HEC-RAS funcionam bem, contudo, nem tudo é perfeito. Ocasionalmente uma célula ruim será criada devido a uma combinação de condições de contorno geométricas e tamanho da célula computacional, ou

quando o usuário está modificando manualmente uma malha. Após a criação da malha, o programa automaticamente a avalia para identificar possíveis problemas nas células. Caso um problema seja identificado, a célula ficará em destaque com a cor vermelha, e uma mensagem em vermelho irá aparecer no canto inferior esquerdo da janela do editor geométrico. A seguir apresenta-se uma lista de possíveis problemas e como resolvê-los:

- Problemas no Contorno Geométrico da Malha:** Quando o usuário desenha uma *Área de Fluxo 2D* com um contorno muito agudo e côncavo, dependendo do tamanho da célula, o algoritmo de geração da malha pode não conseguir formar a malha corretamente neste trecho (Figura 56 e Figura 57). Para resolver esses problemas, o usuário pode suavizar o contorno (Figura 58) ou pode adicionar mais centro de células ao redor da região côncava aguda (Figura 59).

Figura 56 - Erro no contorno da malha

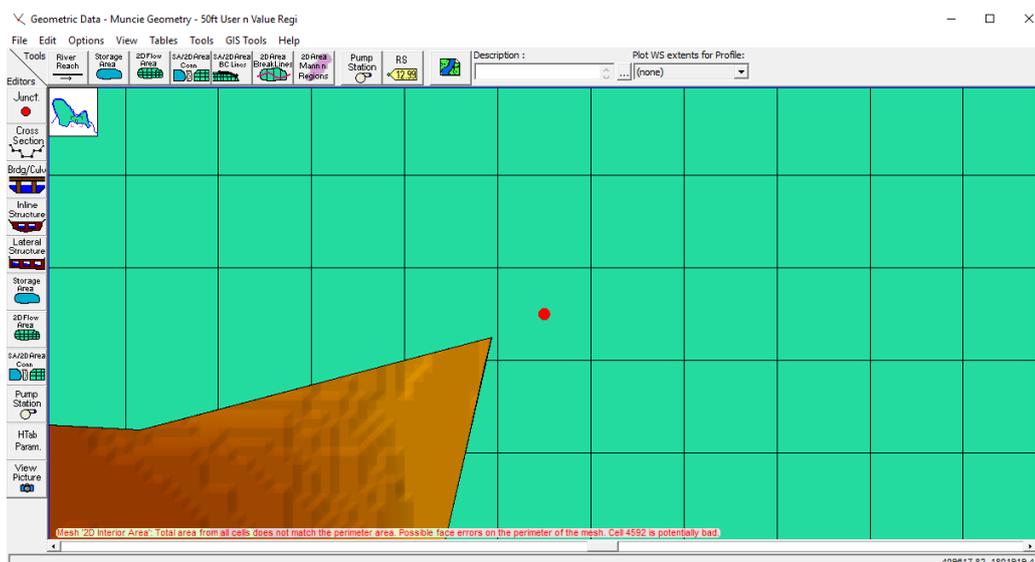


Figura 57 - Erro no contorno da malha

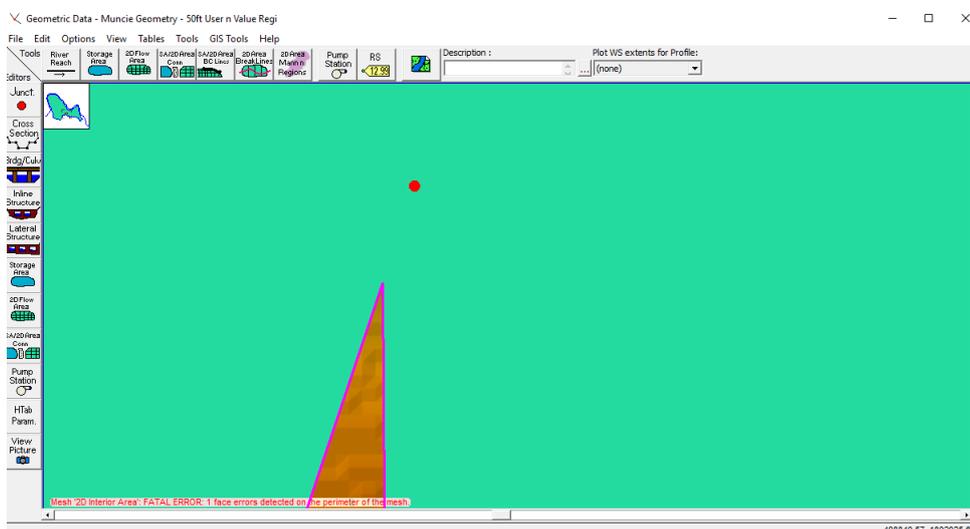


Figura 58 - Correção com a suavização

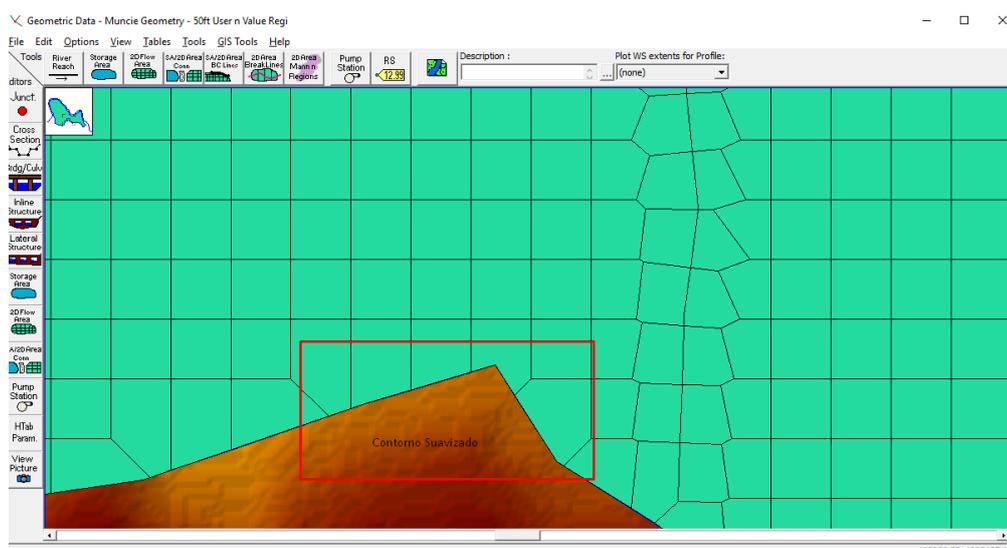
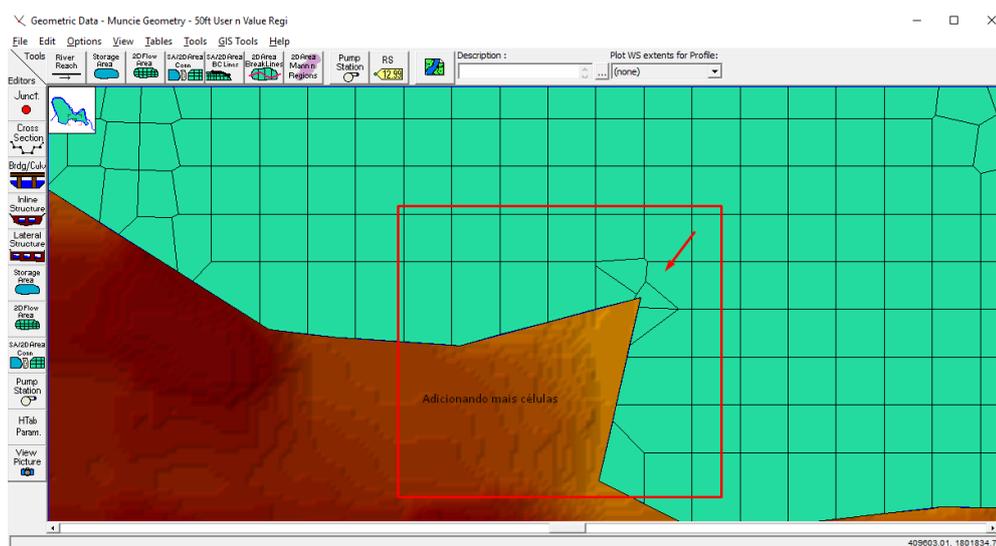


Figura 59 - Correção adicionando mais células



- Muitas faces nas células:** Cada célula é limitada a ter no máximo oito faces (lados). A rotina do HEC-RAS avalia as células com mais que 8 lados. Da mesma forma, estas células serão destacadas em vermelho e uma mensagem irá aparecer no canto inferior esquerdo do editor geométrico. Um exemplo de célula com mais que 8 lados é mostrado na Figura 60. Para corrigir esse erro será necessário editar esta célula ou as células ao seu redor. Para isso, usa-se as ferramentas manuais de edição do menu **Edit (Editar)**. O problema apresentado foi resolvido adicionando novas células ao redor da mesma até que seu tamanho ficou reduzido e o número de lados dentro do limite.

Figura 60 - Erro devido a células com mais de 8 lados

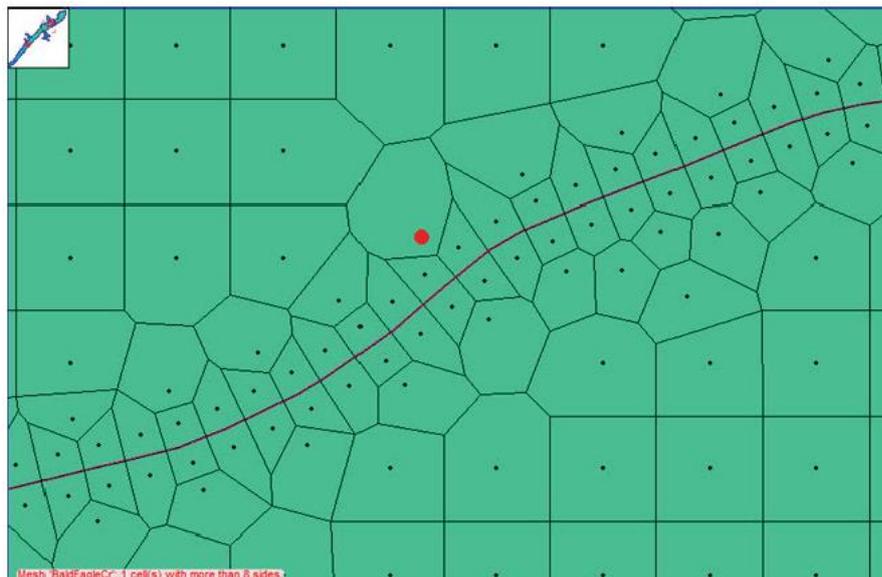
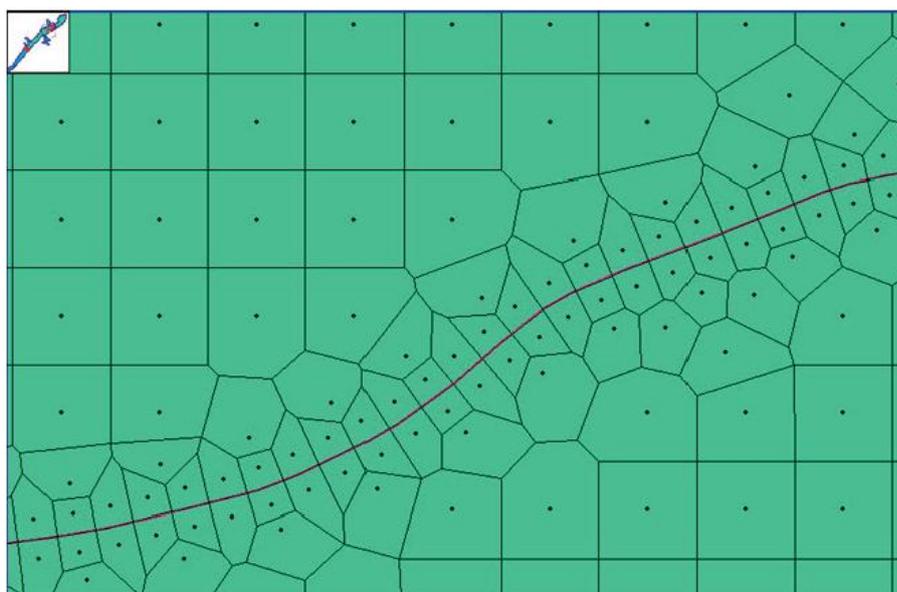


Figura 61 - Correção do número de lados



- **Centro de Células Duplicados:** Se o usuário acidentalmente coloca um ponto em cima ou muito próximo de um já existente, isso irá causar problemas na malha. As ferramentas automáticas buscam e identificam esse problema. A solução para o problema é remover um dos pontos.
- **Centro de Células fora da Área de Fluxo 2D:** Se o usuário acidentalmente coloca um ponto fora da *Área de Fluxo 2D* ou move o contorno geométrico do polígono de tal forma que o ponto fique fora do mesmo, isso irá gerar problemas na malha. As ferramentas automáticas buscam e identificam esse problema. A solução para o problema é remover o ponto.

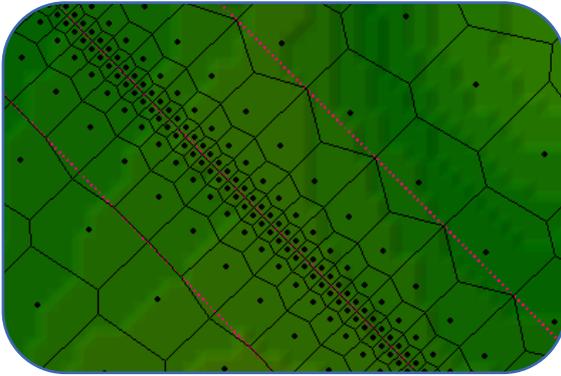
- **Células com Faces Colineares:** Células computacionais utilizadas no HEC-RAS não podem ter duas faces colineares (isto é, não podem formar uma linha reta). No ponto de encontro formado entre células, o ângulo formado pelas faces tem que ser maior que 180° . Em termos matemáticos, isso é chamado de *Estritamente Convexo*. Significa que todas as células têm que ser estritamente convexas e, portanto, duas faces de uma mesma célula não podem ser colineares (formar uma reta). Se isso ocorrer, o programa irá rodar, mas os resultados ao longo dessas células não estarão corretos.

Esse problema normalmente é ocasionado quando se coloca duas ou mais *Linhas de Quebra* próximas entre si ou paralelas, de tal forma que a criação de células ao longo de uma *Linha de Quebra* pode ocasionar problemas na outra. Células são criadas ao longo das *Linhas de Quebra* uma de cada vez. Adicionalmente, o usuário pode especificar o tamanho mínimo e máximo para ser usado ao longo da *Linha de Quebra*. O valor mínimo é utilizado nas células em contato com a *Linha de Quebra*, e muda para o valor máximo dobrando seu tamanho conforme se afasta. Se não for colocado o valor máximo, essa mudança irá ocorrer até o tamanho nominal da célula escolhido no *Editor da Área de Fluxo 2D*.

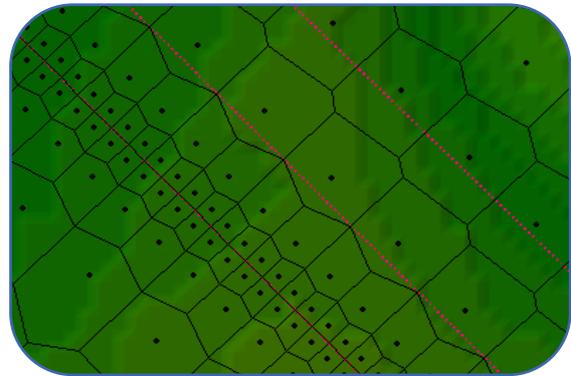
Se as *Linhas de Quebra* estiverem próximas entre si, a transição de uma pode sobrepor a malha gerada na outra (Figura 63-a, Figura 63-b e Figura 63-c). Isso pode fazer com que as células não sigam a orientação da *Linha de Quebra* sobreposta, ou pior, as células formadas podem não ser consistentes com o esquema de solução do HEC-RAS 2D (Figura 63-c e Figura 63-d). Nesses exemplos a *Linha de Quebra Central* foi forçada o alinhamento primeiramente, em seguida as *Linhas de Quebra Laterais*. Veja como ocorreu uma superposição da malha inicial, gerando erros.

Para resolver esse problema, você entrar com um valor máximo de célula para prevenir que as células sobreponhas as células próximas a outras linhas de quebra, ou você pode controlar a ordem em que é forçado o alinhamento manualmente, controlando a ordem em que as células são formadas. Os problemas apresentados foram resolvidos alterando a ordem em que são geradas as células (central por último) e também mudando o valor máximo para transição (Figura 62-a e Figura 62-b).

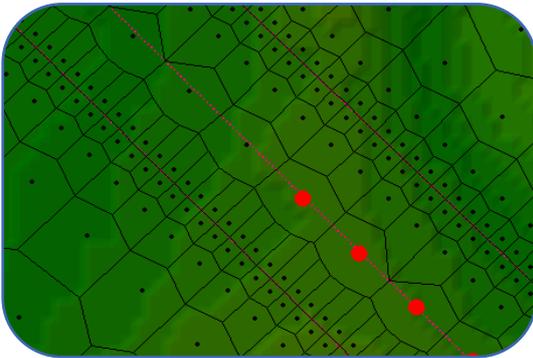
Figura 62 - Correção para erros relacionados a Linhas de Quebra próximas



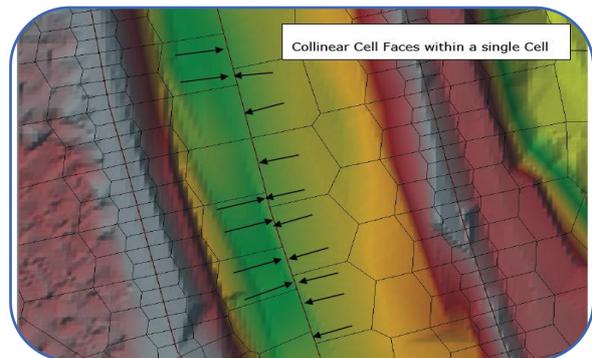
(a) Malha original alinhada com a linha central



(b) Malha original sobreposta

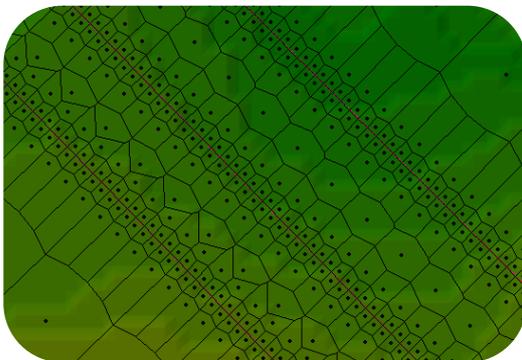


(c) Malha original sobreposta com erro

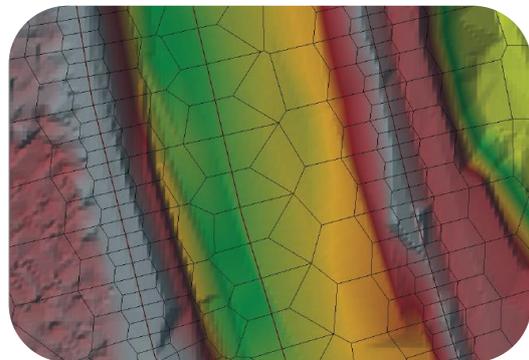


(d) Células Colineares

Figura 63 – Erros da geração de malha com Linhas de Quebra próximas



(a) Alterando o tamanho máximo da transição



(b) Alterando a ordem de geração

7.3.6 Criando uma Camada com Coeficiente de Manning Espacialmente Variado

Uma camada com dados do terreno espacialmente variados pode ser criada no **RAS Mapper** e, então, associada com dados geométricos. Uma vez que os dados de terreno são associados com os dados geométricos, o usuário pode definir valores de Manning para serem usados para cada tipo de terreno. Adicionalmente, o usuário pode criar a própria *Área de Manning 2D* (definida pelos polígonos desenhados), que podem sobrepor os valores de Manning a partir dos dados de terreno. Essas *Áreas de Manning 2D* podem ser utilizadas para ajudar na calibração do modelo para regiões específicas da *Área de Fluxo 2D*.



Observação

O usuário precisa ter dados dos tipos de terreno para poder utilizar valores de Manning variáveis espacialmente em *Área de Fluxo 2D*, assim como para utilizar a ferramenta das *Regiões de Manning Definidas pelo Usuário*.

Na versão atual (5.0.3) do HEC-RAS, os usuários podem importar informações de terreno no formato vetorial (*shapefile*) e raster (*gridded*). Camadas vetoriais *Shapefile* podem ser criadas fora do HEC-RAS (por exemplo, ArcGIS) e importadas para o **RAS Mapper**. O **RAS Mapper** permite o usuário utilizar múltiplos arquivos de terreno (com diferentes formatos) para criar uma única camada para ser usada no HEC-RAS. O Usuário pode utilizar, por exemplo, um arquivo mais grosseiro como terreno base. Em seguida, pode utilizar ou gerar um polígono (*shapefile*) que é mais preciso para determinadas área de estudo na região. Para isso, coloca-se estes dados com uma prioridade maior que o mapa base, de modo que nas regiões de encontro entre os dados, aquele com maior prioridade irá sobrepor o de menor prioridade. O **RAS Mapper**.



Observação

Os dois exemplos de modelos 2D que vêm junto com o HEC-RAS (Muncie.prj e BaldEagle.prj) contém informações de terreno para definir os valores de Manning. Por favor, abra um desses projetos e use como guia ao longo da discussão deste manual.

Para utilizar um coeficiente de Manning espacialmente variado no **HEC-RAS**, abra o **RAS Mapper**, em seguida no Menu *Tools(Ferramentas)*, selecione *New Land Cover (Nova Cobertura de Terreno)* ou clique com botão direito em *Map Layers (Camadas do Mapa)* e

selecione *Add New Land Cover Layers (Adicionar Nova Cobertura de Terreno)*. Isso irá a *Janela para Criação de Cobertura de Terreno*, Figura 64. Essa janela é dividida em três seções: arquivos de entrada, identificadores de cobertura de terreno e arquivo de saída. A seção de arquivos de entrada para adicionar os arquivos que serão utilizados para criação da camada de cobertura, assim como selecionar a prioridade. A seção de identificadores é utilizada para mostrar os identificadores para cada campo dentro da camada selecionada. A seção do arquivo de saída é utilizada para mostrar o que o HEC-RAS irá utilizar como identificadores da cobertura de terreno, os seus IDs e opcionalmente o valor de Manning associado àquele campo.

Figura 64 - Janela para criação de cobertura de terreno

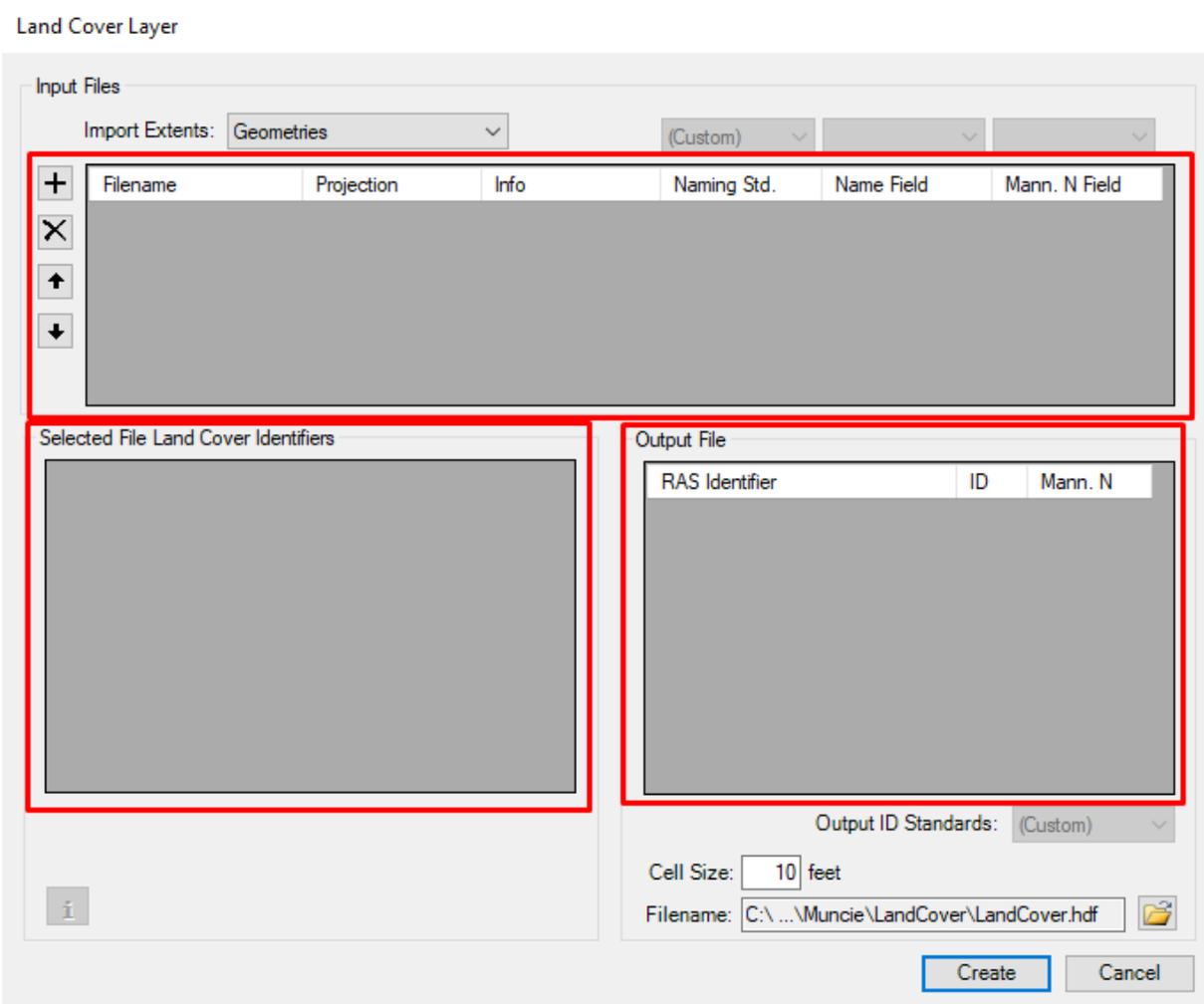


Figura 65 - Janela para criação de cobertura de terreno preenchida

Land Cover Layer

Input Files

Import Extents: Geometries (Custom) Land_Class (Custom)

Filename	Projection	Info	Naming Std.	Name Field	Mann. N Field
Land_Classification.shp	(Same as Project)	20 of 20 Polygon...	(Custom)	Land_Class	(Custom)
LandCover.tif	PROJCS["NAD8...	Cell Size: 5 US su...	(Custom)	N/A	N/A
LandCoverUSGSGGrid.tif	PROJCS["NAD8...	Cell Size: 5 US su...	(Custom)	N/A	N/A

Selected File Land Cover Identifiers

Name Field	RAS Identifier
Medium Density Residential	Medium Density Residential
Park	Park
Trees	Trees
Open Space	Open Space
Building	Building
Urban	Urban

Output File

RAS Identifier	ID	Mann. N
NoData	0	
1	7	
10	8	
11	16	
12	17	
13	18	
14	19	

Output ID Standards: (Custom)

Cell Size: 10 feet Output Size: <1 MB

Filename: C:\...\Muncie\LandCover\LandCover.hdf

Create Cancel

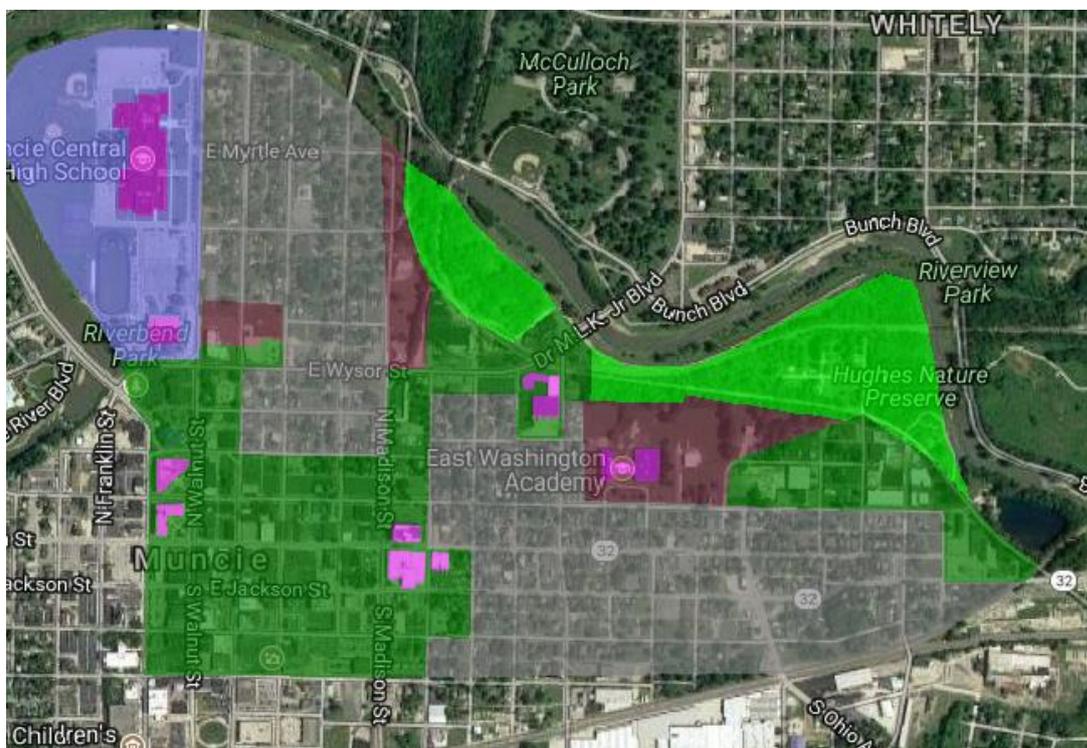
A janela da Figura 65 permite o usuário selecionar um ou mais arquivos de cobertura de terreno de formatos diferentes. Para realizar isso, o usuário, na seção de arquivos de entrada, clica no botão **+**. Em seguida, uma nova janela é aberta na qual o Usuário pode selecionar os arquivos desejados. Para aplicar a prioridade, pode-se utilizar as setas **↑** **↓**, de modo que o arquivo no topo tem maior prioridade do que o de baixo. Porque o HEC-RAS aceita vários arquivos e com diferentes formatos, o Usuário deverá entrar com uma conveção de nomes para cada tipo de cobertura de terreno.

Na *Seção de Arquivos de Entrada* do editor, se o usuário selecionar um shapefile, os *Name Fields (Nome do Campo)* e *Mann. N Field (Campo do Coef. Mann.)* estarão disponíveis, e o usuário pode selecionar a coluna da tabela de atributos do shapefile para ser utilizada em cada opção. Por outro lado, caso o Usuário selecione um arquivo raster, então somente o campo *Naming Std. (Convenção de Nome)* estará disponível para identificar os dados do arquivo.

O nome do arquivo e o diretório de saída para a camada de saída é mostrado no canto direito inferior da janela. O usuário deve selecionar o diretório de saída para a camada a ser utilizada no HEC-RAS e também especificar o nome da mesma. RAS Mapper processa todos os arquivos de entrada e criar um único arquivo de saída para classificação do terreno – no formato **.tif*. O último passo, antes de criar o arquivo de *Classificação de Terreno*, é especificar o tamanho da célula a ser utilizado na discretização – deve ser relacionado com o tamanho o tamanho da célula computacional que será utilizada e com precisão suficiente para classificação do terreno (e seus coeficientes de rugosidade). Após a entrada de todos os dados, clica-se no botão **Create (Criar)**, RAS Mapper vai ler todos as camadas de entrada e converter em um único arquivo *GeoTIFF*, salvando no diretório especificado. Uma janela irá aparecer indicando o progresso para o usuário e quando for finalizada a criação do arquivo. Quando o usuário clicar no botão **OK**, ambas janelas irão fechar.

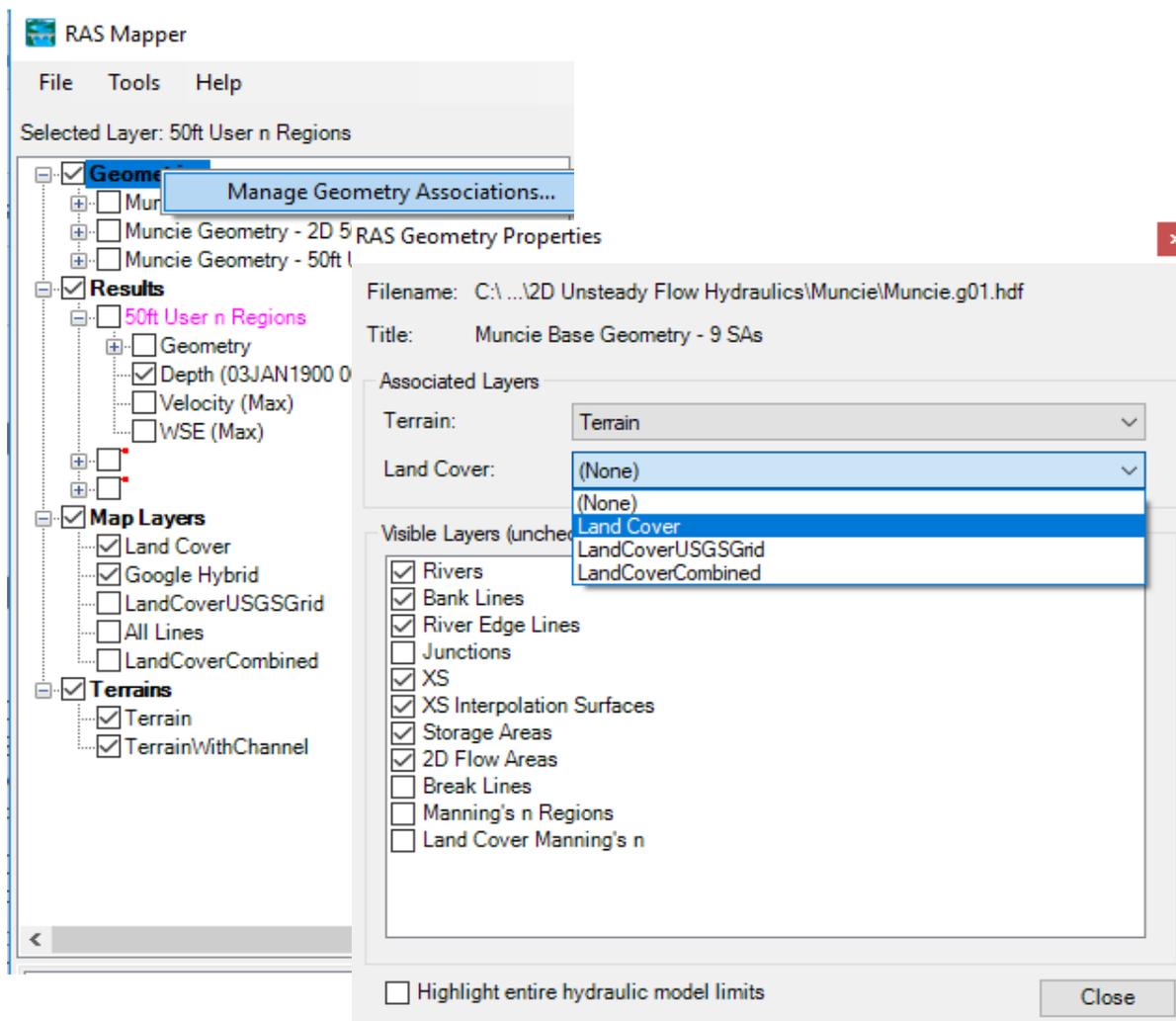
A Figura 66 mostra um exemplo de *Camada de Classificação de Terreno* no **RAS Mapper**. O Usuário pode controlar a cor de cada categoria, dentro da *Classificação*, assim como a transparência utilizada para mostrar os polígonos. Essas propriedades podem ser acessadas clicando-se com o botão direito em cima da camada e **Image display properties**. Isso irá trazer uma janela, permitindo o usuário controlar as cores e transparências dos polígonos.

Figura 66 - Mapa de classificação de terreno



Uma vez que o usuário tenha criado uma camada de *Classificação de Terreno* com o *.tiff, é necessário associar essa camada com o(s) arquivo(s) de geometria correspondente(s). Para isso, clica-se com o botão direito na camada desejada, selecionando **RAS Geometry Properties**. Isso irá mostrar uma janela que permite escolher a associação com o *Modelo de Terreno* e com a *Classificação de Terreno*, Figura 67.

Figura 67 - Associação com a geometria



Alternativamente, o Usuário também pode escolher realizar múltiplas associações ao mesmo tempo. Para isso, clica-se com botão direito em **Geometries** → **Manage Geometry Associations**, escolhendo para cada geometria sua respectiva associação com o *Modelo de Terreno* e *Classificação de Terreno*.

Uma vez que a cama de *Classificação de Terreno* esteja associada com o arquivo de geometria, o Usuário pode construir uma tabela que relaciona *Categoria vs Manning*, que pode ser utilizada para definir os valores de rugosidade em *Áreas de Fluxo 2D*. Essa tabela é construída através do **Editor Geométrico**, sendo específico para cada arquivo de geometria.

Para isso, clica-se em **RAS Geometry Editor** e abre-se a geometria de interesse. Em seguida, acessa-se a janela de criação através do menu **Tables** → **Manning's by Land Cover**. Isso irá mostrar a tabela com as respectivas categorias da *Camada de Classificação do Terreno*. O editor possui 3 ou mais colunas. As duas primeiras colunas são referentes as *Categorias* e seus respectivos valores padrões de Manning. A terceira coluna pode ser utilizada para substituir esses valores padrões de Manning. A quarta e demais colunas referem-se às **2D Area Manning's n Regions (Regiões de Manning da Área 2D)**, Figura 68.

A coluna com os *Nomes da Classificação de Terreno* contém os identificadores únicos pertencentes a camada. Cada tipo é listado uma única vez na tabela, embora haja muitos polígonos ou células com aquele tipo de categoria. O Usuário deve entrar com o valor de Manning para cada tipo na tabela (inclusive a linha com **nodata**). Podendo alterar quaisquer valores padrões para aquele específico arquivo de geometria.

Figura 68 - Tabela relacionando Manning com as categorias

Land Cover to Manning's n (2D Flow Areas Only)

Set Manning's n to Override Default Land Cover Values

Selected Area Edit Options

Add Constant ... Multiply Factor ... Set Values ... Replace ...

Land Cover Layer		Geometry Overrides (Blank for Default Values)		
	Name	Default Mann n	Base Mann n (blank for default)	Flat Area
1	building	10	100	100
2	medium density residential	0.08	0.08	0.072
3	open space	0.04	0.04	0.036
4	park	0.06	0.06	0.054
5	trees	0.12	0.12	0.108
6	urban	0.1	0.1	0.09

Associated Layer: C:\...\HEC Data\HEC-RAS\Example Projects\2D Unsteady Flow Hydraulics\Muncie\LandCover\LandCoverUserShapefile.tif

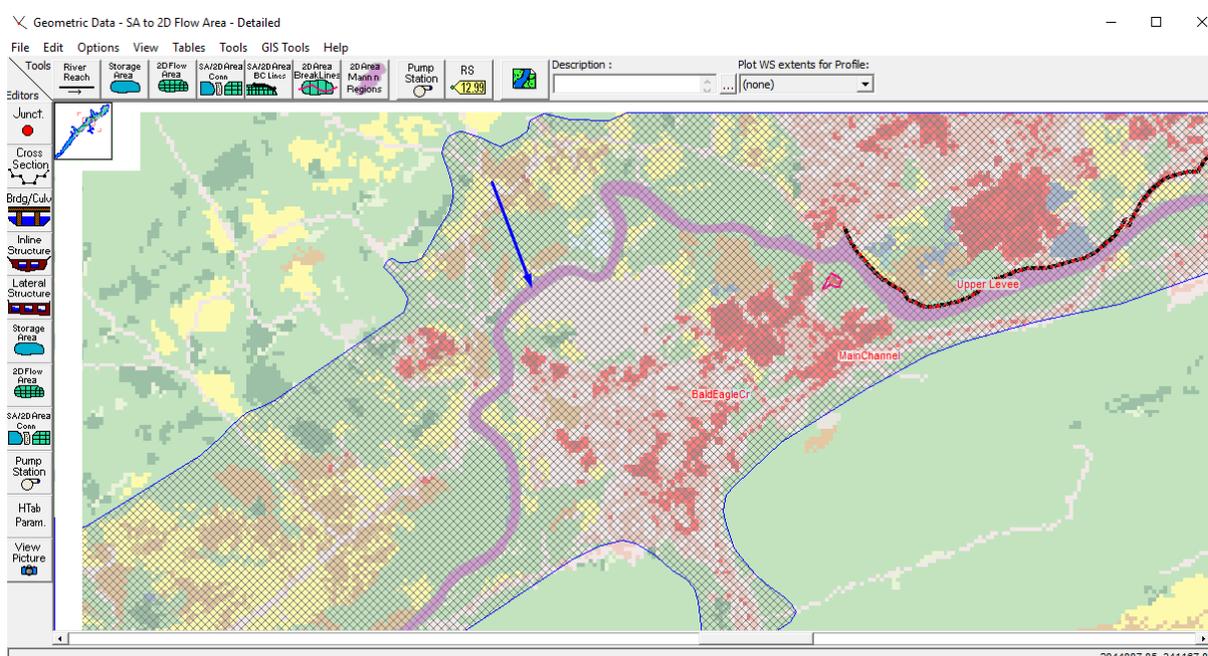
OK Cancel

Adicionalmente, o Usuário tem a opção de criar as próprias **Áreas 2D de Manning**. Essas regiões definidas por polígonos desenhados pelos Usuário, podem ser utilizadas para substituir os valores padrões de Manning para aquela região. Também podem ser usada para calibrar o modelo. Essas áreas são definidas pelo **Editor Geométrico**, aplicando-se somente ao arquivo geométrico no qual é desenvolvida. Para criar **Áreas 2D de Manning**, clica-se no botão **2D Area Mann n Regions** do *Editor Geométrico*. Após isso, o cursor irá mudar para lápis de desenho e o Usuário pode desenhar o polígono esquemático para região que deseja. Clica-se uma vez para iniciais, uma vez para adicionar novos vértices e duas vezes para finalizar o desenho. Uma vez finalizado, abrirá uma janela para que seja escolhido o nome da região. Cada *Região de Manning* deve possuir apenas um único nome, contudo, o Usuário pode criar quantas

regiões forem necessárias. Uma vez finalizado, acessa-se **Tables** → **Manning's n by Land Cover**. A tabela relacional será mostrada, na qual será adicionada uma coluna para cada *Área 2D de Manning*. O Usuário pode entrar com novos valores de Manning para as regiões poligonais.

As *Áreas 2D de Manning* podem ser usadas tanto para definir um coeficiente de Manning ou podem ser usadas para ajustar múltiplos valores de Manning de modo a calibrar o modelo. Os valores dessas áreas irão substituir qualquer valor naquela região. A Figura 69 mostra uma *Área 2D de Manning* para o rio principal sobre uma camada de *Classificação de Terreno* para toda a região.

Figura 69 - Área de Manning 2D para o rio



A *Tabela Relacional de Manning* será utilizada durante a fase de pré-processamento da *Área de Fluxo 2D* (isso é, durante a fase em que o programa cria as *Tabelas de Propriedades Hidráulicas*). Quando as faces das células são processadas, o valor de Manning selecionado terá como base o centro da face da célula e seu respectivo coeficiente. Caso não exista uma camada de *Classificação de Terreno* definida para a célula, será utilizado o valor padrão de Manning escolhido no *Editor da Área de Fluxo 2D*.

Para a versão atual do HEC-RAS (5.0), o programa somente seleciona um único coeficiente de Manning para toda a face da célula. Versões futuras irão permitir múltiplos coeficientes ao longo da face.

7.3.7 Criando Tabelas de Propriedades Hidráulicas para as Células 2D e Faces

Como mencionado anteriormente, a *Malha Computacional 2D* é pré-processada em curvas relacionais (elevação-volume para cada célula e uma série de curvas para as faces – elevação-perímetro molhado, elevação-área, elevação-rugosidade). Isso é realizado no RAS Mapper. Essas tabelas são derivadas do *Modelo Detalhado de Terreno Subjacente*, assim como as *Áreas de Manning 2D* e *Camada de Classificação de Terreno*. Desta forma, obviamente, um *Modelo de Terreno 2D* é obrigatório para utilizar a modelagem 2D. O mesmo também é requerido para a realização de *Mapas de Inundação*, tanto para 1D como para 2D.

Uma vez criado o *Modelo de Terreno*, e opcionalmente a *Tabela de Classificação de Terreno de Manning*, então, os passos a seguir são requeridos para criar a *Tabela de Propriedades Hidráulicas* para *Células 2D* e suas *Faces*.

7.3.7.1 Associar uma Camada de Terreno com um Arquivo Geométrico

Após adicionar uma nova camada de terreno, o usuário deve associá-la com qualquer um ou todos arquivos geométricos do projeto. Isso é realizado no **RAS Mapper** clicando-se com o botão direito na camada **Geometries** e selecionado-se **Manage Geometry Associations** no menu *popup*. Em seguida, o Usuário pode estabelecer as associações para cada arquivo geométrico.



Atenção!!

O **RAS Mapper** irá tentar associar a Camada de Terreno a um Arquivo Geométrico, no momento em que é criado. Contudo, o Usuário deve sempre verificar se a associação está correta. Também será requerido do usuário associar o Terreno com a Geometria, caso haja

Após todas as associações serem realizadas, clica-se no botão **Close**, garantindo que as alterações serão salvas.

7.3.7.2 Pré-processador Geométrico – Células 2D e Faces

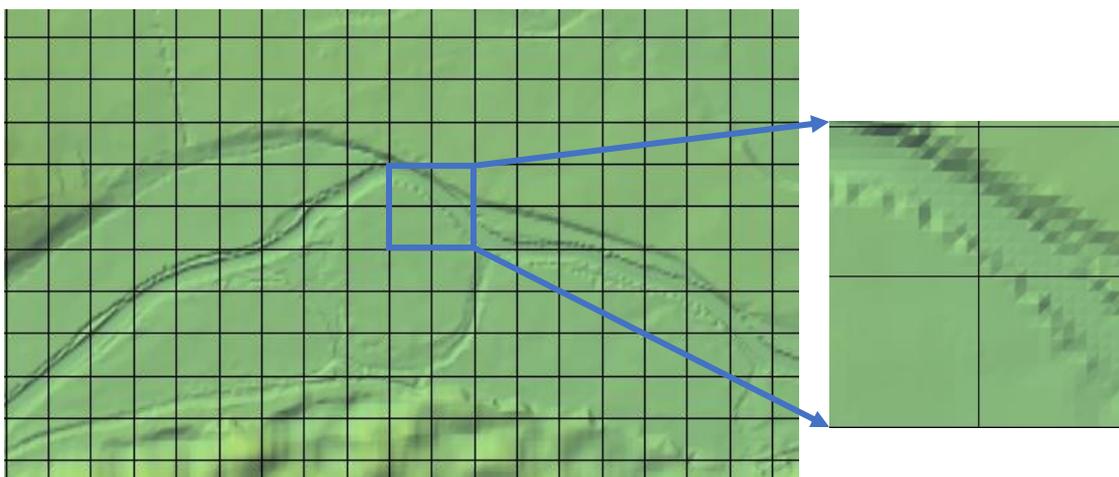
7.3.7.2.1 Sumário das propriedades das Células e Faces

Cada *Célula* e sua respectiva *Face* da *Malha Computacional* são pré-processados de modo a desenvolver *Tabelas de Propriedades Hidráulicas Detalhadas* com base no *Terreno Subjacente* usado na modelagem. O pré-processador da malha 2D computa relação detalhadas elevação-volume para cada célula. Cada célula da malha computacional é pré-processada em tabelas de propriedades hidráulicas detalhadas (elevação-perímetro molhada, elevação-área,

elevação-rugosidade, etc.). Isso permite que o usuário utilize uma malha computacional com células maiores, significando menor número de cálculos computacionais, maior rapidez. Adicionalmente **HEC-RAS** irá produzir resultados mais detalhados para um dado tamanho de *Célula* do que outros modelos que utilizam uma única elevação para cada *Célula* e *Face*.

Um exemplo de como o **HEC-RAS** pré-processa *Células* e *Faces* em tabelas hidráulicas detalhadas é mostrado nas Figura 70 - Figura 73. Na Figura 70 são mostrados os detalhes do *Terreno Subjacente* em uma determinada *Célula Computacional*.

Figura 70 - Detalhamento do modelo de terreno



Quando o pré-processador geométrico 2D roda, uma relação detalhada entre elevação e volume é desenvolvida para cada *Célula*, conforme Figura 71. Além disso, as *Faces* são pré-processadas em tabelas elevação vs área, perímetro molhado e rugosidade (Figura 72).

Figura 71 - Elevação-Volume par uma célula

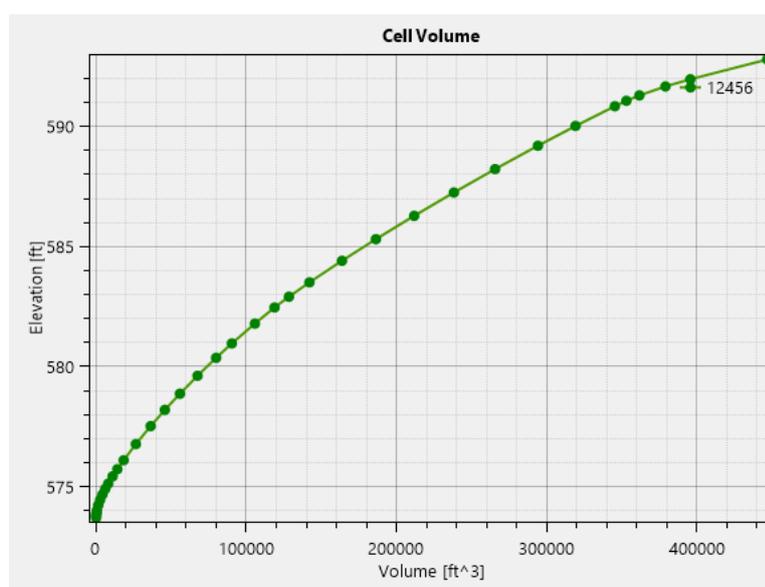
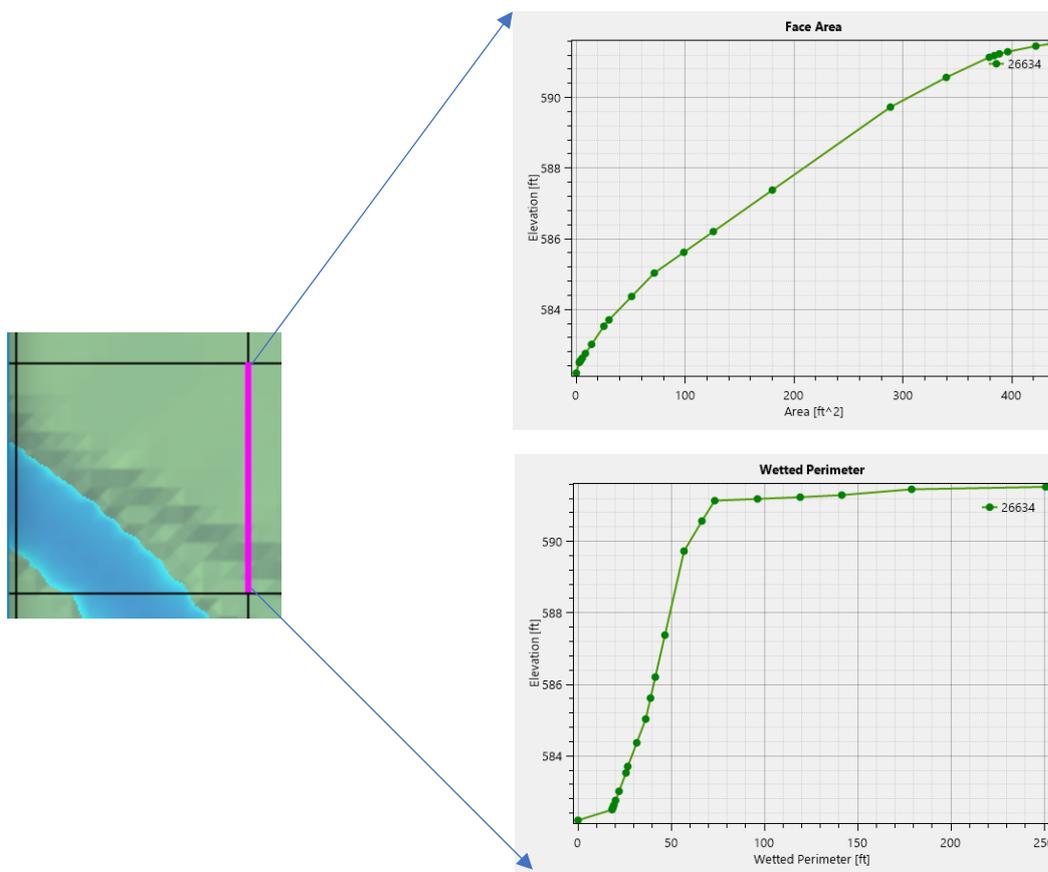
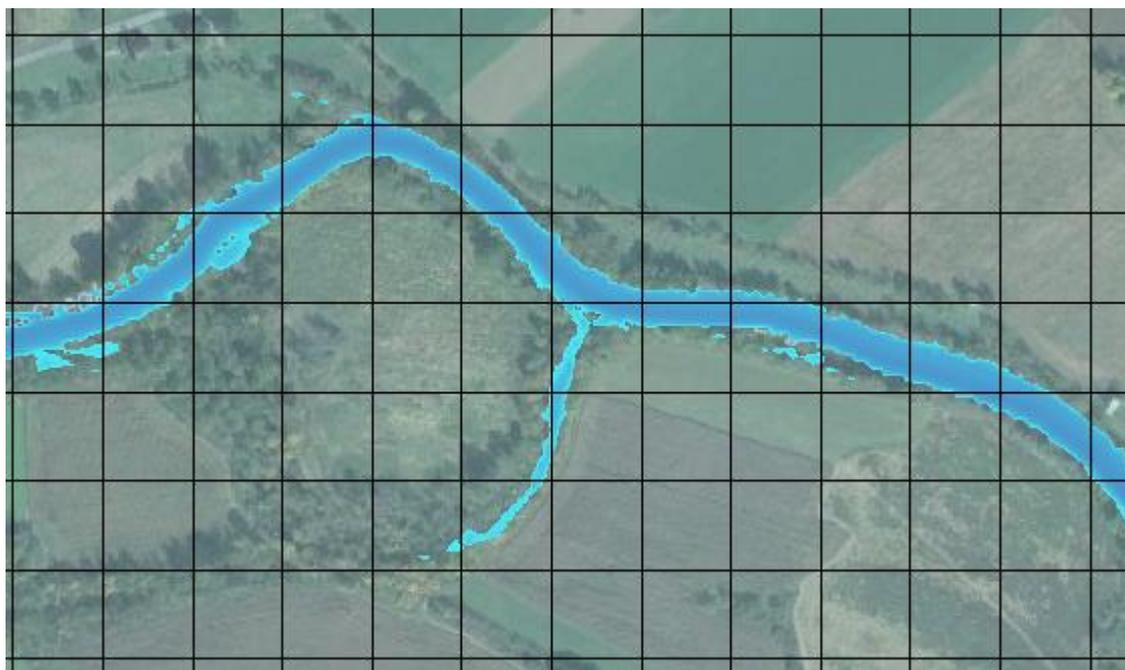


Figura 72 - Tabelas das Propriedades Hidráulicas para Face



Como apresentado na Figura 72, cada *Face da Célula* é como uma seção transversal. Dessa forma, o fluxo de água para dentro, através ou para fora da *Célula* é controlado pelos detalhes das *Faces* e da relação elevação-volume para a *Célula*. O benefício dessa formulação é o grande ganho de detalhamento hidráulico a nível de *Célula* em comparação com modelos que usam uma única elevação para cada *Célula* e *Face*. No **HEC-RAS** os Usuário podem ter *Células Computacionais* maiores e, ainda assim, manter grande detalhamento a nível de *Célula*. Além disso, as *Células* podem estar parcialmente molhadas (isto é, a água não precisa cobrir totalmente a *Célula*, e pode mover-se através da mesma). Um exemplo disso é apresentado na Figura 73.

Figura 73 - Água contida no canal com células computacionais maiores



Percebe-se que a água pode mover-se somente ao longo do canal, embora este seja menor que o tamanho da célula computacional adotado. Nesse exemplo, as *Células* têm tamanho de 500 x 500 ft e o terreno subjacente 2 x 2 ft. Isso ocorre porque os detalhes das seções transversais estão contidos nas *Faces das Células*. Ademais, os detalhes da curva elevação-volume do canal estão contidos nas tabelas hidráulicas das *Células*. Nesse tipo de exemplo, a água poderia fluir em um canal com modelo 1D, enquanto que o fluxo na planície de inundação seria modelado como 2D. Se o usuário quer mais detalhamento no canal, como velocidades de fluxo 2D e variações na superfície da água, então, o tamanho da célula da *Célula* deve ser diminuído. Um tamanho menor da *Célula* vai permitir que o modelo capture os efeitos bidimensionais no canal. Contudo, se o usuário somente precisa capturar esses efeitos na planície de inundação, a abordagem da Figura 73.

As capacidades de fluxo 2D no HEC-RAS podem ser usadas de diversas formas. O usuário pode desenvolver uma malha com células pequenas que podem ser usadas para modelar canais e planícies em grandes detalhes. Ou o Usuário pode utilizar *Células* maiores que iram resultar em menos detalhes no canal, mas, ainda assim, permitirão modelar a planície de inundação em 2D. O nível de detalhes que o Usuário escolhe depende daquilo que está sendo modelado, e o propósito do estudo. HEC-RAS fornece ao Usuário o máximo de flexibilidade para modelagem dos detalhes do canal e planície em 2D. O pré-processando das *Células* e *Faces* em *Tabelas Hidráulicas Detalhadas* é uma vantagem sobre os modelos 2D que usam uma única elevação para cada *Célula* (célula plana) e para *Face* (plana ou linearmente variável).

7.3.7.2.2 Rodando o pré-processados geométrico 2D

Após associar os arquivos geométricos com uma *Camada de Terreno*, o usuário pode rodar o pré-processador geométrico 2D do **RAS Mapper**. Os passos não precisam ser realizados no RAS Mapper. Se o Usuário não rodar o pré-processador geométrico 2D no **RAS Mapper**, ele será automaticamente feito como processo separado durante a simulação.

No grupo do **RAS Mapper Geometria** há uma subcamada chamada de *Áreas de Fluxo 2D (2D Flow Areas)*, conforme a Figura 74. Marcando essa opção irá mostrar todas as malhas 2D para aquela geometria. Após isso, clique com o botão direito em cima da opção e em seguida em *Computar Tabelas Hidráulica para Área de Fluxo 2D (Compute 2D Flow Area Hydraulics Tables)*, conforme Figura 75. Essa opção irá calcular as tabelas hidráulicas baseadas nos detalhes do *Terreno Subjacente*.

Figura 74 - Mostrar as Áreas de Fluxo 2D

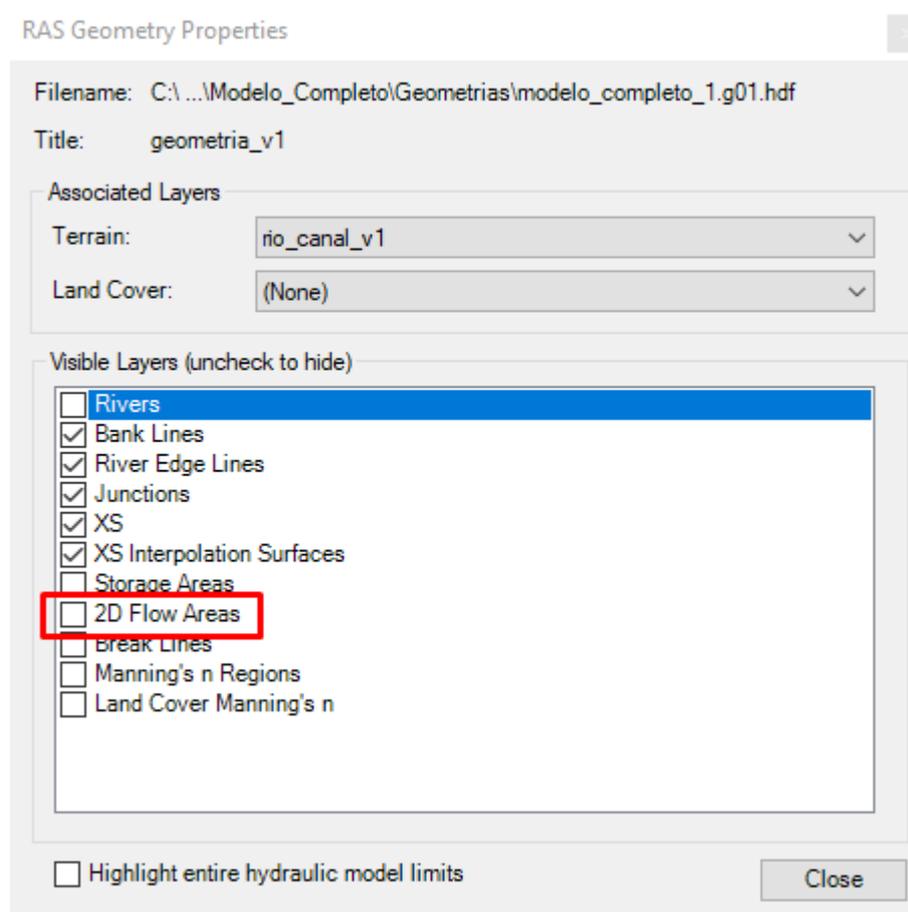
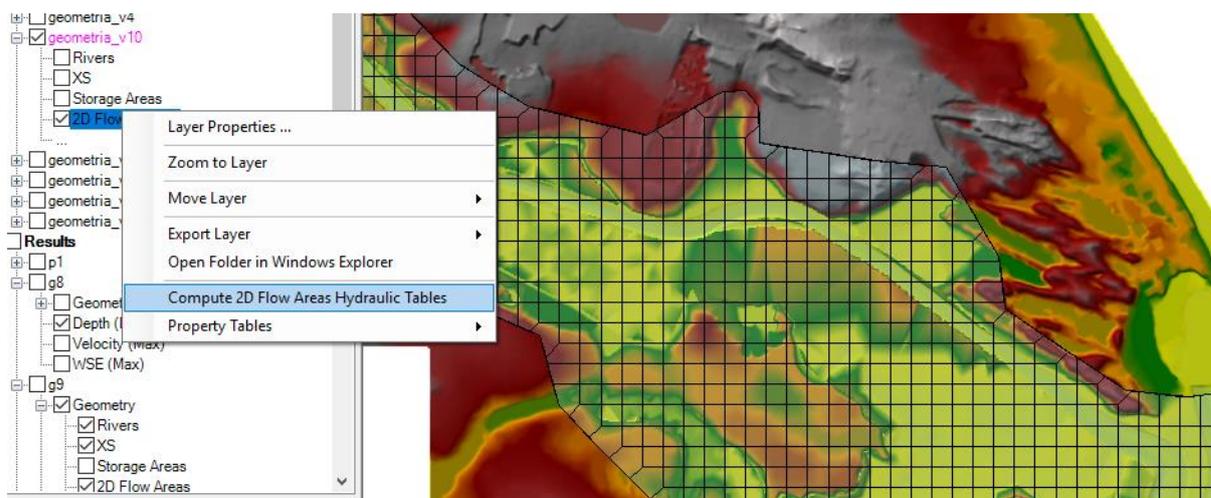


Figura 75 - Computar as Áreas de Fluxo 2D



Caso o Usuário não realize esses passos, o programa irá automaticamente fazê-los durante o início da simulação. Da mesma forma, caso o Usuário mude alguma coisa sobre a área 2D, o programa irá rodar novamente o pré-processamento durante o processo de simulação.

7.3.8 Conectando áreas de fluxo 2D nos elementos hidráulicos 1D

As áreas de fluxo 2D podem ser conectadas com elementos 1D de diferentes formas: diretamente ao final do rio (a montante ou a jusante); lateralmente através de uma estrutura hidráulica lateral; e/ou diretamente para outra área de fluxo 2D ou área de armazenamento usando a conexão *SA/2D*. O processo de conectar a área de fluxo 2D a outros elementos hidráulicos é conseguida através do **Editor Geométrico** (*Geometric Editor*) do HEC-RAS.

7.3.8.1 Conectando uma área de fluxo 2D a um trecho de rio 1D com uma estrutura lateral

Área de fluxo 2D podem ser usadas para modelar as planícies protegidas por uma estrutura de contenção lateral (*levee*) ou planície de inundação ligada a um trecho de rio 1D através de uma estrutura lateral (Figura 76). Para esse exemplo, ampliando na parte final a montante do rio (do lado direito), você poderá ver uma estrutura lateral que representa uma contenção lateral na região. Quando uma estrutura lateral é adicionada a um trecho de rio 1D, o usuário pode selecionar a opção de conectar a outro rio 1D, área de armazenamento e área de fluxo 2D. Se o usuário selecionar para conectar a uma área de fluxo 2D, os pontos de da estrutura lateral serão conectados aos pontos da face da área de fluxo 2D automaticamente. A conexão realizada pode ser vista na Figura 77.

Figura 76 - Editor Geométrico com os pontos da face da área de fluxo 2D mostrados

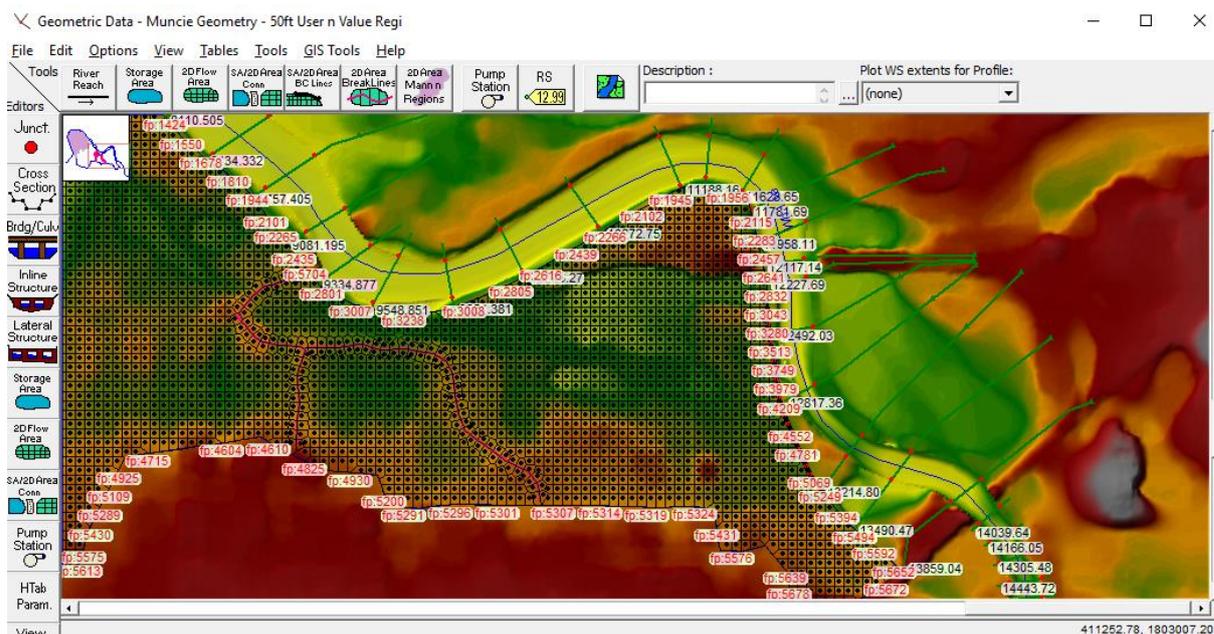
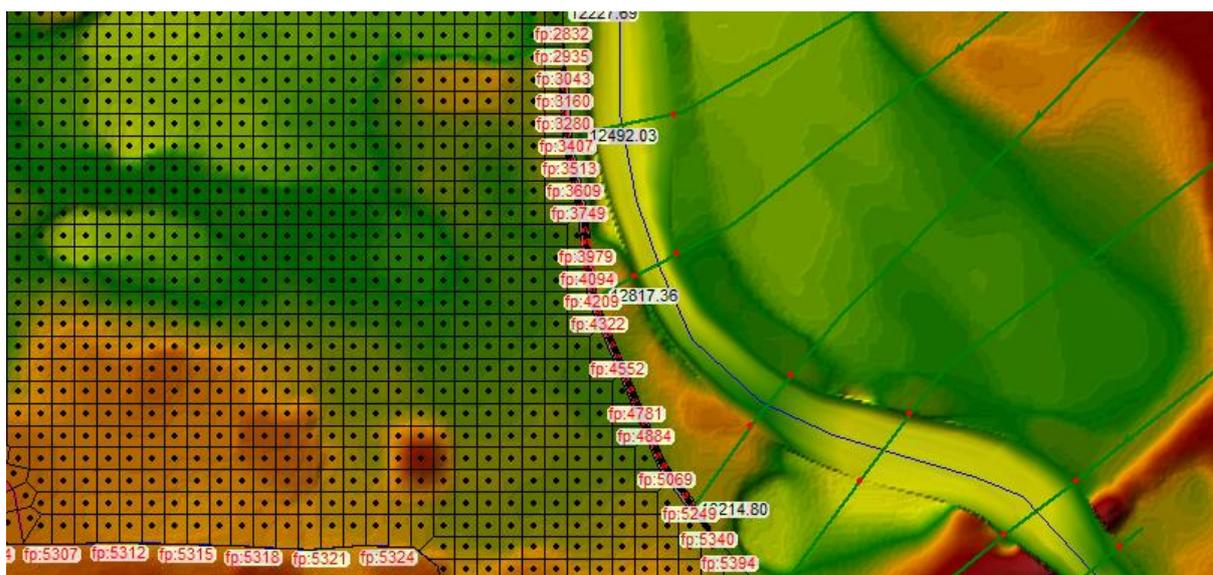


Figura 77 - Conexão entre rio 1D e estrutura lateral



Nesse exemplo, a estrutura lateral será utilizada para modelar o fluxo passando sobre a estrutura, assim como o rompimento da proteção lateral (*levee*).

HEC-RAS agora tem a opção de ter estruturas laterais georreferenciadas. No item do menu denominado GIS Tools (Ferramentas GIS), tem agora a opção chamada de *Lateral Structure Centerlines Table* (Tabela das Linha Principal da Estrutura Lateral). O usuário pode usar a ferramenta de medir para desenhar a linha que representaria a estrutura lateral no plano cartesiano de coordenadas X,Y e colar essas coordenadas na Tabela. Se o usuário inserir coordenadas georreferenciadas para a estrutura, não só será desenhada corretamente, mas

também o HEC-RAS irá determinar como os elementos (seções transversais 1D e os pontos das faces 2D) são conectados na estrutura lateral baseado na posição espacial.

Nota: se você colocar uma estrutura lateral georreferenciada, o comprimento total da estrutura deve estar dentro de 0,5% do comprimento total da linha central inserida (isto é, eles precisam estar consistentes em termos de comprimento total).

O Usuário pode usar a ferramenta de medição do Editor Geométrico para desenhar a linha que irá representar a estrutura lateral ou pode importar uma informação geoespacial de um arquivo ESRI.