

ESTUDO DE ALTERNATIVAS E PROJETOS PARA MINIMIZAÇÃO DO EFEITO DAS CHEIAS NA BACIA DO RIO DOS SINOS

Contrato nº 003/2015



ETAPA - ESTUDO BÁSICO

PRODUTO Nº 11- RELATÓRIO da SIMULAÇÃO HIDRÁULICA
e
MAPAS de INUNDAÇÃO



CONTRATO N.º: 003/2015		ESTUDO DE ALTERNATIVAS E PROJETOS PARA MINIMIZAÇÃO DO EFEITO DE CHEIAS NA BACIA DO RIO DOS SINOS			
DOCUMENTO N.º: RT-EB-01-2018-HCA-001-01		PRODUTO 11 RELATÓRIO SIMULAÇÃO HIDRÁULICA e MAPAS de INUNDAÇÃO			
Revisão	Data	Descrição	Elaborado p/	Aprovado p/	Status
R00	15/09/2017	Emissão inicial	Consórcio Sinos	METROPLAN	Parecer
R01	15/01/2018	Atendendo Parecer	Consórcio Sinos	METROPLAN	Para aprovação
Elaboração		Cliente		Responsáveis Técnico	
CONSÓRCIO SINOS		METROPLAN		Engº ORGEL CARVALHO FILHO CREA RS 087284 Engº LUCIANO BEZERRA CREA RS 055454 Engº WELLINGTON COIMBRA LOU CREA RJ 22414-D	

EQUIPE TÉCNICA

Equipe Principal:

- Eng. Orgel de Oliveira Carvalho Filho;
- Eng. Ricardo de Magalhães Santiago;
- Eng. Luciano Bezerra da Silva;
- Eng. José Carlos Leite Diehl;
- Eng. Wellington Coimbra Lou;
- Eng. José Augusto Jordão Castro;
- Arq. Clarice Debiagi;
- Soc. Roseli Kepeler

Equipe Complementar:

- Eng. Lawson Beltrame
- Eng. Alexandre Augusto Mees Alves;
- Eng. Thiago Araldi;
- Eng. Luiz Costa Borges;
- Eng. Carlos Wagner da Motta Meirelles;

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	7
2	INTRODUÇÃO	9
3	OBJETIVOS DO RELATÓRIO	10
3.1	Metodologia	10
4	MODELO HIDRODINÂMICO: BASE TEÓRICA	13
4.1	Características do Modelo	13
4.1.1	Base teórica do modelo HEC-RAS 1D (regime não permanente)	14
4.1.2	Base teórica do modelo HEC-RAS 2D (regime não permanente)	17
5	ELABORAÇÃO DOS MAPAS DE INUNDAÇÃO	20
5.1	Base de Dados	20
5.2	Construção do Modelo.....	20
5.3	Construção da Malha Computacional	23
5.4	Parâmetros	25
5.5	Escopo	30
5.6	Condições Iniciais e de Contorno	30
5.7	Calibração.....	32
5.8	Combinação dos Efeitos.....	33
5.9	Secionamento do Modelo	34
5.10	Resumo dos Parâmetros Hidráulicos e Computacionais	35
5.11	Fluxo de Trabalho.....	37
6	RESULTADOS	38
7	REFERÊNCIAS	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Potencial ocupação urbana de acordo com o risco associado.	11
Figura 2 - Limite da modelagem hidrodinâmica.....	12
Figura 3 - Volume de controle para derivação da equação da continuidade e momento	14
Figura 4 - Dados topográficos utilizados.....	21
Figura 5 - Comparação da superfície construída com e sem pontos complementares.	23
Figura 6 - Elementos principais de elevação para reconstituição da superfície.....	23
Figura 7 - Exemplo de malha computacional gerada.	24
Figura 8 - Exemplo de variação de rugosidade em uma mesma seção hidráulica.....	25
Figura 9 - Coeficiente de Rugosidade de Manning.	27
Figura 10 - Seções hidráulicas para representação de uma ponte no HEC-RAS.....	28
Figura 11 - Calibração dos Parâmetros Hidráulicos para a seção Estação São Leopoldo.....	33
Figura 12 - Análise combinada das manchas de inundação	35
Figura 13 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 5 anos – situação geral.....	38
Figura 14 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 10 anos – situação geral.....	38
Figura 15 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 25 anos – situação geral.....	38
Figura 16 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 50 anos – situação geral.....	38
Figura 17 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 100 anos – situação geral.....	38
Figura 18 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 5 anos – situação geral	38
Figura 19 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 10 anos – situação geral	38
Figura 20 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 25 anos – situação geral	38
Figura 21 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 50 anos – situação geral	38
Figura 22 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 100 anos – situação geral	38
Figura 23 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 5 anos – situação geral	38
Figura 24 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 10 anos – situação geral	38
Figura 25 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 25 anos – situação geral	38
Figura 26 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 50 anos – situação geral	38
Figura 27 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 100 anos – situação geral	38
Figura 28 - Riozinho - Tempo de Retorno 5 anos – situação geral	38
Figura 29 - Riozinho - Tempo de Retorno 10 anos – situação geral	38
Figura 30 - Riozinho - Tempo de Retorno 25 anos – situação geral	38
Figura 31 - Riozinho - Tempo de Retorno 50 anos – situação geral	38
Figura 32 - Riozinho - Tempo de Retorno 100 anos – situação geral	38
Figura 33 - Nascentes - Tempo de retorno 5 anos – situação geral	38
Figura 34 - Nascentes - Tempo de retorno 10 anos – situação geral	38
Figura 35 - Nascentes - Tempo de retorno 25 anos – situação geral	38
Figura 36 - Nascentes - Tempo de retorno 50 anos – situação geral	38
Figura 37 - Nascentes - Tempo de retorno 100 anos – situação geral	38
Figura 38 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 1.....	38

Figura 39 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 2.....	38
Figura 40 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 3.....	38
Figura 41 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 4.....	38
Figura 42 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 5.....	38
Figura 43 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 6.....	38
Figura 44 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 7.....	38
Figura 45 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 8.....	38
Figura 46 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 9.....	38
Figura 47 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 10.....	38
Figura 48 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 11.....	39
Figura 49 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 12.....	39
Figura 50 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 13.....	39
Figura 51 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 14.....	39
Figura 52 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 15.....	39
Figura 53 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 16.....	39
Figura 54 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 17.....	39
Figura 55 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 18.....	39
Figura 56 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 19.....	39
Figura 57 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 20.....	39
Figura 58 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 21.....	39
Figura 59 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 22.....	39
Figura 60 - Mancha de Inundação _ Detalhe Área 23.....	39
Figura 61 - Mancha de inundação – Detalhe Área 24	39
Figura 62 - Articulação	39

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Dados do Contratante.....	7
Quadro 2 - Dados do Consórcio	8
Quadro 3 - Dados do Contrato.....	8
Quadro 4 - Produtos previstos no contrato e status de execução.....	9
Quadro 5 - Coeficientes de rugosidade propostos	26
Quadro 6 - Coeficientes de perda de energia para contração e expansão.....	29
Quadro 7 - Níveis do Guaíba considerados.....	31
Quadro 8 - Análise combinatória de efeitos (Sinos x Guaíba).....	34
Quadro 9 - Parâmetros Hidráulicos e Computacionais	36

1 APRESENTAÇÃO

Este documento é parte integrante dos “Estudo de Alternativas e Projetos para Minimização do Efeito das Cheias na Bacia do Rio dos Sinos” e trata do do “PRODUTO 11 – RELATÓRIO da SIMULAÇÃO HIDRÁULICA e MAPA de INUNDAÇÃO ”, referente a Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos,, conforme descrito no Edital CELIC-RS nº 008/14 na modalidade de Regime de Contratação Diferenciada (RDC).

O contrato supracitado é financiado através do Orçamento Geral da União, operacionalizado pelo Ministério das Cidades, no âmbito do Plano de Aceleração do Crescimento-2 (PAC 2) e está inserido no Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais (PNGR), atendendo aos municípios da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos, na Região Metropolitana de Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul.

Quadro 1 - Dados do Contratante

DADOS DA CONTRATANTE	
Nome	Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional - METROPLAN (citada daqui em diante como FISCALIZAÇÃO)
Endereço	Av. Borges de Medeiros, 1501 – 4º andar – Centro – Porto Alegre
Responsável pela Instituição	
Nome	Pedro Bisch Neto
Cargo	Diretor-Superintendente
Fiscal do Contrato	
Nome	Eng. ^a Paula Branco Pinto
Telefone	(51) 3288-6000
E-mail	paula-pinto@metroplan.rs.gov.br

(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

Quadro 2 - Dados do Consórcio

DADOS DO CONSÓRCIO	
Nome Fantasia	Consórcio Metroplan Bacia Rio dos Sinos
Empresas Componentes	
Razão social	Cohidro Consultoria, Estudos E Projetos Ltda.
Endereço	Rua 96, 585, loja comercial 7, Saquarema/RJ
Responsável	Eng.º Wellington Coimbra Lou
Telefone	(21) 2288-5462
E-mail	cohidro@cohidro.com.br

Razão social	Encop Engenharia Ltda.
Endereço	Av. Coronel Aparício Borges, nº 965 - salas 201, 202 e 203, Porto Alegre/RS
Responsável	Eng.º Luciano Bezerra
	Eng.º Thiago Araldi
Telefone	(51) 3028 4799
E-mail	luciano@encop.com
	thiago@encop.com

Razão social	M.J Engenharia Sis Ltda.
Endereço	Rua Dr. Vale, 60, sala 501, Porto Alegre/RS
Responsável	Eng.º Orgel Carvalho Filho
	Eng.º Ricardo Santiago
Telefone	(51) 3013 5793
E-mail	orgel.filho@mjenharia.com
	ricardo.santiago@mjenharia.com

(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

Quadro 3 - Dados do Contrato

DADOS DO CONTRATO	
Termo de Compromisso do Estado do RS com União	0402.532-34/2012-RS
Edital CELIC	RDC 008/14
Número do contrato com a METROPLAN	003/2015
Objeto	Elaboração de estudos e projetos necessários para a gestão de inundações na bacia hidrográfica do Rio dos Sinos
Ordem de início	16 de junho de 2015
Prazo	540 dias (término estimado em 07/12/16)
Prazo Prorrogado Cfe. 1º Aditivo Contratual, assinado em 08 de junho de 2016. FPE Nº 023001/2014 Exp. Administrativo 686-22.64/14-5	12 meses a contar de 07 de dezembro de 2016 (término estimado em 07/12/17)
Prazo Prorrogado Cfe. 2º Aditivo Contratual, assinado em 08 de junho de 2016. FPE Nº 023001/2014 Exp. Administrativo 000686-22.64/14-5	120 dias a contar de 8 de dezembro de 2017 (término estimado em 07 de abril de 2018)

(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

2 INTRODUÇÃO

O presente relatório descreve as atividades desenvolvidas e os produtos resultantes, bem como a metodologia empregada nos serviços de elaboração do “PRODUTO 11 – RELATÓRIO da SIMULAÇÃO HIDRÁULICA e MAPA de INUNDAÇÃO”, referente a Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, localizada no estado do Rio Grande do Sul, conforme solicitado no Termo de Referência:

Este item tem por objetivo a avaliação da propagação das vazões máximas (e hidrogramas) do Rio dos Sinos e cálculo da linha d'água, levando-se em conta obstruções ao escoamento, geometria da calha principal, extravasamentos para a planície de inundação e efeitos de jusante. As simulações deverão contemplar o Rio dos Sinos, o principal formador, rio Rolante e os tributários que passem por áreas urbanizadas.

Em bacias com grande ocupação urbana, devem ser simulados tanto o cenário de ocupação atual quanto o cenário do Plano Diretor Urbano das cidades. O produto final desta etapa deverá ser a elaboração dos mapas de inundação para os seguintes

Este documento oferece subsídios para a elaboração dos demais produtos do presente projeto, além de poder ser disponibilizado publicamente para reuso por interessados nos temas abrangidos.

O Quadro 4 apresenta a relação de produtos previstos no presente projeto e a situação em que se encontrava o desenvolvimento de cada um dos produtos no momento do fechamento da presente edição.

Quadro 4 - Produtos previstos no contrato e status de execução

Número	Denominação do Produto	Status de Execução
1	Plano de Trabalho Consolidado	Executado
2	Consulta Pública - Relatório do Evento 1 - Plano de Trabalho	Executado
3	Consulta Pública - Relatório do Evento 2 - Diagnóstico	Não iniciado
4	Consulta Pública - Relatório do Evento 3 - Plano de Ação	Não iniciado
5	Base de Dados	Executado
6	Diagnóstico	Em revisão
7	Levantamento Topobatimétrico	Executado
8	Levantamento Aerofotogramétrico	Executado
9	Cadastro de Redes	Executado
10	Relatório dos Estudos Hidrológicos	Executado
11	Relatório Simulações Hidráulicas e Mapas de Inundações	
12	Projetos dos Cenários de Intervenção	Em execução
13	Análise de Viabilidade das Alternativas	Em execução
14	Consolidação do Conjunto de Intervenções	Não iniciado
15	Plano de capacitação e adequação dos serviços de gestão de águas pluviais	Não iniciado
16	Plano de Ação	Não iniciado
17	Resumo Executivo	Não iniciado
18	Relatório Final	Não iniciado

(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

3 OBJETIVOS DO RELATÓRIO

Para atendimento do objeto do Estudo a elaboração deste relatório levou em consideração as seguintes perspectivas de futuras etapas:

- A avaliação dos riscos no qual a população urbana da área de interesse está sujeita, quantificando e associando os danos às probabilidades de eventos extremos;
- Estudo de alternativas de controle de cheias que contemplem medidas estruturais e não-estruturais, considerando os cenários atual e futuro;
- Análise de viabilidade, considerando os aspectos técnico-econômicos, sociais e ambientais.

A Figura 2 adiante, apresenta o escopo da área de modelagem hidrodinâmica.

3.1 Metodologia

Modelos hidrológicos podem oferecer previsões de vazão em trechos de rios ocupados com população vulnerável à inundação a partir da chuva prevista por modelos meteorológicos.

Modelos hidráulicos de rios e planícies de inundação podem usar essas previsões para gerar previsões do momento de extravasamento do rio, evolução espaço-temporal da extensão da inundação e velocidade do escoamento superficial.

Tais resultados combinados à análise de impacto socioeconômico podem oferecer informação para melhorar a eficácia dos alertas de risco de inundação.

O sucesso em atividades de modelagem hidrológica e hidráulica de planícies de inundação depende primordialmente também da disponibilidade de dados adequados e metodologia adequada. A situação em diversas bacias do Brasil é de pouca disponibilidade de dados adequados a uma calibração ideal dos modelos de inundação.

Por fim, a análise de risco de inundação exige a consideração de uma cascata de incertezas através de vários componentes do modelo e, sempre que possível, deve buscar maneiras de restringir a incerteza resultante usando formas de assimilação de dados.

O modelo hidrodinâmico deve ser capaz de atender as seguintes questões:

- Apresentar as zonas de inundações prováveis e risco associado a estas. Os resultados deverão ser apresentados de forma a constituir uma ferramenta clara de gestão municipal através da delimitação racional da ocupação urbana;
- Fornecer subsídios para o estudo de alternativas de mitigação.

O zoneamento de áreas inundáveis, relacionado à segurança efetiva da população e equipamentos, consiste na definição espacial de uma área e de seu risco efetivo de inundação.

O nível de risco é dados em relação ao tempo de retorno das cheias, no caso (TR 5, 10, 25, 50 e 100 anos).

Estas áreas e seu risco associado irão definir a forma de ocupação urbana, com elementos mais importantes da infraestrutura urbana ficando em localizações com risco inferior de cheia (Figura 1), lembrando que a estipulação de zonas de regulação faz parte de relatórios seguintes.

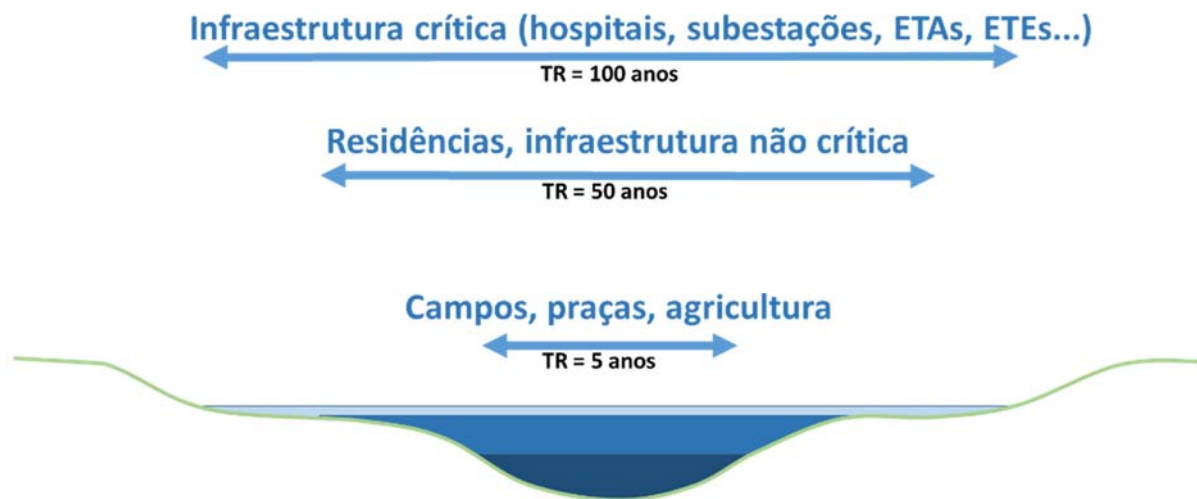
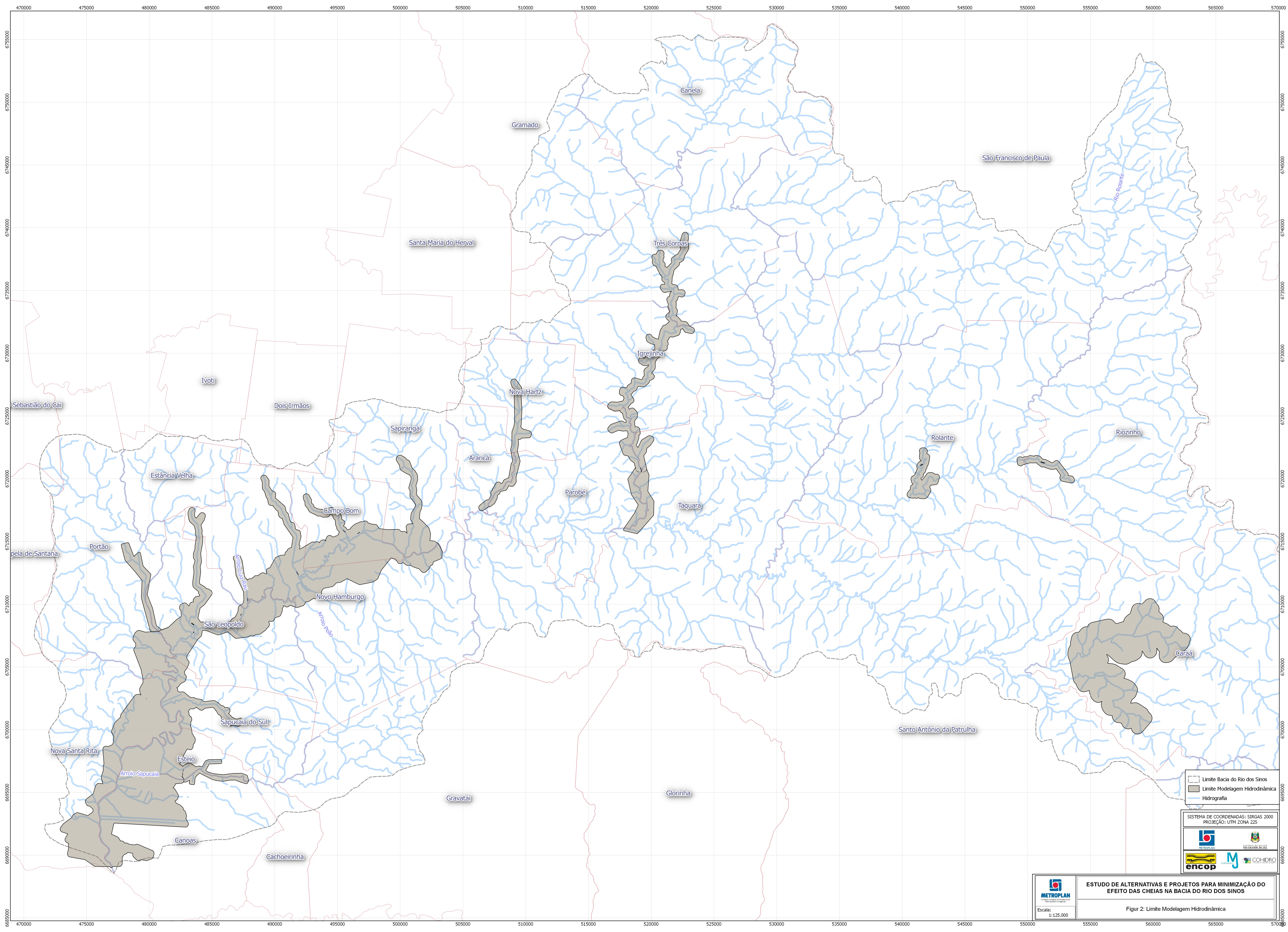


Figura 1 - Potencial ocupação urbana de acordo com o risco associado.
(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

A Figura 2 apresenta a área do escopo da modelagem. Os trechos dentro das áreas hachuradas apresentam cursos d'água que fazem parte da modelagem hidrodinâmica.

Os trechos que estão fora destas áreas não fizeram parte da modelagem hidrodinâmica, embora se ressalte que toda a bacia está compreendida na modelagem hidrológica.



4 MODELO HIDRODINÂMICO: BASE TEÓRICA

O objeto deste estudo visa a verificação das condições de cheias na bacia permitindo a elaboração de um mapa de inundação. Desta forma e por natureza dos eventos de cheias serão utilizados os componentes de modelagem em regime não permanente.

O software utilizado para a modelagem hidrodinâmica das cheias foi o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) elaborado pela USACE (US Army Corps of Engineering). A versão utilizada do software foi a 5.0.3 e pode ser obtida em <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>.

Este programa permite o cálculo da hidráulica em regime permanente em 1D ou regime não permanente em 1D e 2D. O sistema é composto de uma interface de usuário, componentes de análise hidráulica, componentes de armazenamento e gerenciamento de dados, visualização, mapeamento e elaboração de relatório de resultados.

O programa HEC-RAS contém 4 componentes de análise hidráulica: (1) modelagem 1D em regime permanente (2) modelagem 1D ou 2D em regime não permanente (3) modelagem de transporte de sedimentos (4) modelagem de temperatura e transporte (ex: contaminantes).

Uma capacidade importante deste programa é a capacidade de conectar modelos de 1D e 2D em uma mesma simulação. Isto permite reduzir a complexidade do modelo onde necessário e assim obter-se ganhos computacionais.

Todos componentes de análise hidráulica possuem a mesma representação de dados e geometrias além de mesmas rotinas computacionais. O programa também permite a elaboração de mapas de inundação diretamente na sua interface.

4.1 Características do Modelo

O procedimento computacional básico para solução das variáveis hidráulicas é a solução de equações de energia, neste caso a equação de Saint Venant (em sua forma unidimensional ou bidimensional).

As perdas de energia são computadas nas mais diversas formas: fricção (equação de Manning), coeficientes de expansão e contração, modelagem de turbulência, etc.

O modelo em si é constituído pelos seguintes elementos:

- Geometria: representa as superfícies hidráulicas e outros elementos correntes, como pontes e bueiros, assim como a própria hidrografia (trechos, junções). Apresenta também as características hidráulicas dos trechos como rugosidades, áreas de fluxo inefetivo, obstruções, diques, etc.
- Condições de contorno: representa os controles de nível nos extremos de modelo. Pode ser calculado como uma cota fixa, a altura normal, uma curva cota x vazão conhecida ou um cotograma; hidrograma de entrada: representa a vazão x tempo a ser computada em cada trecho.

4.1.1 Base teórica do modelo HEC-RAS 1D (regime não permanente)

As leis fundamentais que regem o escoamento em um curso d'água são (1) conservação de massa (2) conservação de quantidade momento.

Estas leis são expressas matematicamente na forma de equações diferenciais parciais e são, por simplicidade, referidas como equação da continuidade e de momento

A equação da continuidade define que para um volume de controle a taxa de entrada de vazão neste deve ser igual a variação da taxa de armazenamento.

✓ Equação da Continuidade

Considerando-se o volume de controle apresentado na Figura 3 (x) é a distância longitudinal, a vazão é uma função $Q(x,t)$ e a área molhada A_T .

A área molhada total considera a área molhada do canal A e a área de armazenamento lateral S .

A taxa de entrada em volume de controle pode ser escrita como:

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$$

E a taxa de saída como:

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$$

A taxa de variação no armazenamento como:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x$$

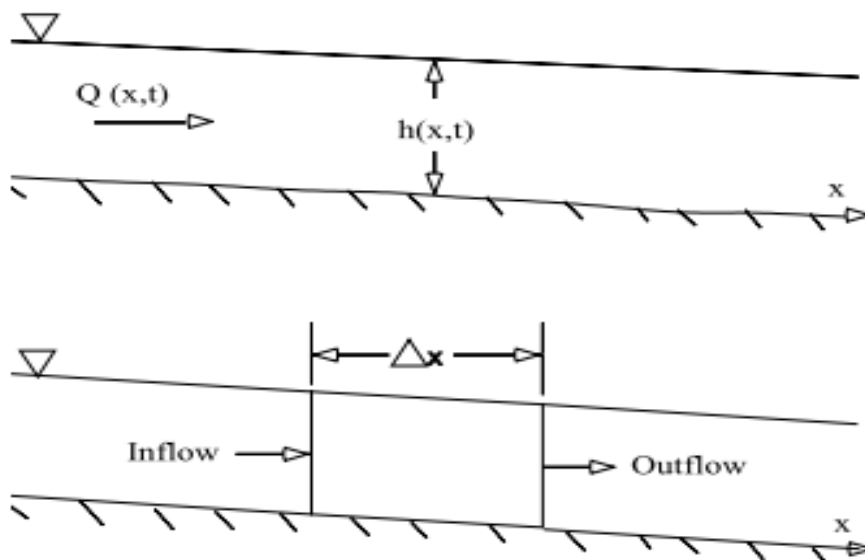


Figura 3 - Volume de controle para derivação da equação da continuidade e momento
(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

Assumindo um Δx pequeno o suficiente, a variação de massa no volume controle é igual a:

$$\rho \frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_l \right]$$

Onde Q_l é a vazão lateral entrando no volume de controle e ρ a densidade do fluido. Simplificando a equação e dividindo por $\rho \Delta x$ apresenta a forma da equação da continuidade:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

Onde q_l é a vazão lateral unitária.

✓ Equação de Quantidade de movimento

A conservação de quantidade de movimento é expressa pela segunda lei de Newton:

$$\sum F_x = \frac{d\vec{M}}{dt}$$

A conservação de quantidade de movimento para um volume de controle define que a taxa de *momentum* (energia) entrando no volume de controle mais a soma de todas as forças externas atuando sobre tal é igual a taxa de acumulação de quantidade de movimento.

No caso unidimensional da equação anterior tal é aplicado na direção x (perpendicular à seção).

O fluxo de quantidade de movimento é a massa do fluido multiplicada pelo vetor velocidade na direção do escoamento. Três forças são consideradas no HEC-RAS (1) pressão (2) gravidade e (3) fricção.

O modelo HEC-RAS assume uma distribuição de pressão hidrostática (pressão varia linearmente com a profundidade) sendo a força total devido à pressão igual a integral do produto pressão x área na seção hidráulica. A pressão pode ser definida como:

$$F_p = \int_0^h \rho g (h - y) T(y) dy$$

Onde h é a profundidade, y a altura sobre o fundo do canal e T(y) a função de largura que correlaciona a largura da seção com a distância a partir do fundo do canal.

Assumindo-se as forças na entrada e saída do volume de controle e adicionando-se a força exercida pelas margens (Fb), a equação da força resultante devido às pressões pode ser escrita como:

$$F_{pn} = -\rho g \Delta x \left[\frac{\partial h}{\partial x} \int_0^h T(y) dy + \int_0^h (h - y) \frac{\partial T(y)}{\partial x} dy \right] + F_b$$

Realizando-se o cálculo destas integrais e simplificando o resultado obtêm-se:

$$F_{pn} = -\rho g \frac{dh}{dx} \Delta x$$

A força devido à gravidade sobre o volume de controle na direção x é:

$$F_g = \rho g A \sin(\theta) \Delta x$$

Onde θ é o ângulo do fundo do canal com a horizontal. Para canais naturais o valor de θ é pequeno tal que $\sin(\theta) = -dz_0/dx$, tal que z_0 é a elevação do fundo.

Desta forma a força gravitacional pode ser escrita como:

$$F_g = -\rho g A \frac{dz_0}{dx} \Delta x$$

A forças devido à fricção com os limites físicos da seção hidráulica (margens, fundo, pilares, etc.) podem ser escritas como:

$$F_f = -\tau_0 P \Delta x$$

Onde τ_0 é a tensão cisalhante média atuando nos limites e P é o perímetro molhado. O valor desta é negativo na direção x . Substituindo o valor de τ_0 pode ser expressado em função de um coeficiente de arrasto C_d que nada mais é que o coeficiente de Chezy e simplificando a equação obtêm-se:

$$F_f = -\rho g A S_f \Delta x$$

Onde S_f é a declividade da linha de energia. No método utilizado pelo HEC-RAS tal fator é calculado pela equação de Manning:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{2,208R^{\frac{4}{3}}A^2}$$

Onde R é o raio hidráulico e n é coeficiente de Manning.

A taxa de fluxo de quantidade de movimento mais a soma de todas as forças externas atuando no volume pode ser definida então da seguinte maneira:

$$-\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - -\rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x$$

Assumindo a elevação da linha d'água, z , igual a $z_0 + h$ e simplificando os termos da equação apresenta-se a forma final da equação de quantidade de movimento:

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

Maiores detalhes sobre a metodologia do modelo HEC-RAS para modelagem em 1D podem ser encontrados no HEC-RAS – Hydraulic Reference Manual (2016).

4.1.2 Base teórica do modelo HEC-RAS 2D (regime não permanente)

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que descrevem a dinâmica de fluidos em 3 dimensões. Tais equações permitem determinar os campos de velocidade e de pressão num escoamento.

No contexto de escoamento em canais e modelagem de cheias simplificações sobre esta equação podem ser aplicadas, como as equações para Águas Rasas.

Outras suposições utilizadas na modelagem são escoamento incompressível, densidade uniforme e pressões hidrostáticas assim como efeitos simplificados da turbulência no tempo. Além disto são assume-se que as velocidades horizontais são de magnitude muito maior do que as velocidades verticais.

Nos escoamentos de águas rasas os termos dominantes são o da gravidade e fricção de fundo nas equações momento, sendo os demais termos ignorados.

A equação de momento de Navier-Stokes se torna a forma bidimensional da aproximação de onda difusa.

Combinando esta equação com a de conservação de massa obtém-se um modelo de uma única equação, o a aproximação de Onda Difusa para Águas Rasas.

Tais simplificações visam a redução do tempo computacional (custo computacional) para obtenção de soluções para o escoamento.

A abordagem de solução utilizada pela versão 2D do HEC-RAS é a do método dos volumes finitos, isto é, um método de resolução de equações às derivadas parciais baseado na resolução de balanços de massa, energia e quantidade de movimento a um determinado volume de meio contínuo.

✓ Conservação de massa

Assumindo um escoamento incompressível, a equação diferencial de conservação de massa (equação da continuidade) é (caso bidimensional):

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

Onde **t** é o tempo, **u** e **v** são os componentes da velocidade nos eixos **x** e **y** e **q** é um termo de fonte/sumidouro. A variável **H** é elevação da lâmina d'água:

$$H(x, y, t) = z(x, y) + h(x, y, t)$$

Onde **z** é a cota de fundo do leito e **h** é a profundidade d'água.

Em forma vetorial a equação da continuidade toma a forma:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0$$

Onde $\mathbf{V}=(u,v)$ é o vetor de velocidade e o operador **del** (∇) é o vetor das derivadas parciais $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)$. A integração desta equação em uma região horizontal, com vetor normal $\mathbf{n}$ obtém:

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

A região volumétrica Ω representa o espaço tridimensional ocupado pelo fluido. Os limites laterais são dados por $\mathbf{S}$. Assume-se que Q é qualquer vazão que entra ou sai do sistema (fonte/sumidouro), neste caso, pelos limites do topo ou fundo, como, por exemplo, um bombeamento.

✓ Conservação de quantidade de movimento

Assumindo-se que as velocidades horizontais são muito mais significativas que as velocidades verticais, pressões hidrostáticas, densidades constantes e ausência de efeitos de vento, a equação de conservação de quantidade de movimento de águas rasas é a seguinte (condição bidimensional):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v - f u \end{aligned}$$

Onde v_t é o coeficiente de viscosidade turbulenta, c_f é o coeficiente de fricção de fundo e f é o parâmetro de Coriolis.

O lado esquerdo destas equações apresenta os termos de aceleração. O lado direito apresenta as forças internas ou externas atuando sobre o fluido.

A forma vetorial destas equações pode ser escrita da seguinte forma:

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

Os significados físicos de cada termo são (da esquerda para direita): aceleração não permanente, aceleração convectiva, pressão, difusão turbulenta, fricção de fundo e força inercial de Coriolis.

Em escoamentos gravitacionais rasos com efeitos de fricção de fundo mais importantes os termos de aceleração não permanente, aceleração convectiva, difusão turbulenta e força inercial de Coriolis podem ser ignorados. A simplificação da equação de quantidade de movimento se torna:

$$\frac{n^2 |V| V}{(R(H))^{\frac{4}{3}}} = -\nabla H$$

Simplificando e normalizando a equação esta pode ser rearranjada na forma clássica:

$$V = - \frac{(R(H))^{\frac{2}{3}}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{\frac{1}{2}}}$$

Onde **V** é vetor de velocidade, R é o raio hidráulico, **∇H** é a elevação da superfície e n é coeficiente de Manning.

Maiores detalhes sobre a metodologia do modelo HEC-RAS para modelagem em 2D podem ser encontrados no HEC-RAS – Hydraulic Reference Manual (2016).

5 ELABORAÇÃO DOS MAPAS DE INUNDAÇÃO

5.1 Base de Dados

As bases principais de dados para construção do modelo hidrodinâmico são:

- Levantamentos Aerofotogramétricos, Topográficos, Topobatimétricos e Cadastrais realizados especificamente para este trabalho e consolidados conforme apresentado nos Relatórios de Levantamentos de Campo. Tais levantamentos foram apresentados em relatório de etapa anterior.
- Levantamentos topográficos existentes: Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul (1:50.000) e Bases Topográficas Municipais;
- Levantamentos de satélite: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission);

Por não existir uma só base de dados espaciais com detalhamento suficiente para construção do modelo com precisão adequada, todas as informações planialtimétricas disponíveis foram consolidadas em uma base única podendo assim obter o máximo de detalhes para tal.

Os dados de entrada para o modelo hidrodinâmico são os resultados obtidos na simulação hidrológica.

A simulação hidrológica assim como a simulação hidrodinâmica foi realizada considerando a apresentando da situação atual e oportunamente serão apresentadas outras considerando os estudos de alternativas e cenários futuros.

5.2 Construção do Modelo

✓ **Processamento dos Dados Espaciais e da Superfície Hidráulica**

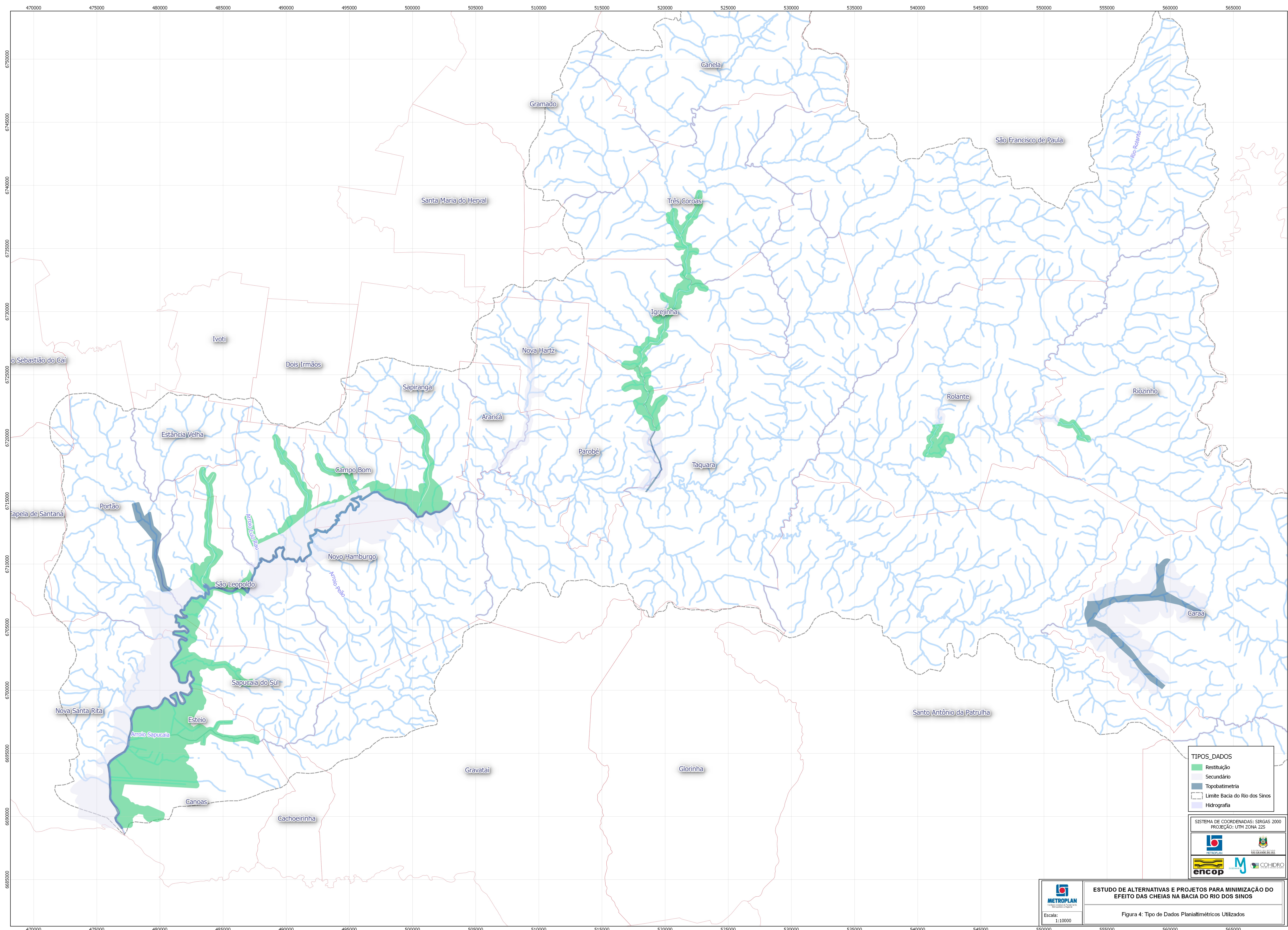
Para a modelagem hidrodinâmica do escoamento a superfície hidráulica computacional foi construída a partir de dados topográficos e topo-batimétricos existentes.

A qualidade do modelo hidrodinâmico é diretamente impactada pelo detalhamento e precisão do modelo de terreno utilizado. A criação do modelo de terreno é um passo de pós-processamento dos dados topográficos levantados e é importante para se utilizar da melhor forma possível dos levantamentos realizados.

Os dados planialtimétricos utilizados foram obtidos a partir dos seguintes levantamentos:

- Levantamento aerofotogramétrico;
- Levantamento de seções topobatimétricas;
- Levantamentos topográficos complementares.

A metodologia e resultados obtidos nestes levantamentos foi apresentada nos Relatórios de Levantamento de Campo. A Figura 4 mostra a localização dos dados topográficos utilizados.



TIPOS_DADOS

- Restituição
- Secundário
- Topobatimetria
- Limite Bacia do Rio dos Sinos
- Hidrografia

SISTEMA DE COORDENADAS: SIRGAS 2000
PROJEÇÃO: UTM ZONA 22S

Logos of PETROPLAN, encop, COHIDRO, and other organizations.

ESTUDO DE ALTERNATIVAS E PROJETOS PARA MINIMIZAÇÃO DO EFEITO DAS CHEIAS NA BACIA DO RIO DOS SINOS

Figura 4: Tipo de Dados Planialtimétricos Utilizados

A partir destes levantamentos foi construída uma superfície TIN (*triangulated irregular network*), isto é, uma estrutura de dados de superfície constituída de nós distribuídos de forma irregular e pontos tridimensionais arranjados como uma rede de triângulos não sobrepostos.

Este método é compatível com a representação de superfícies a partir de pontos distribuídos de forma irregular, o que ocorrerá devido às múltiplas fontes de informações e métodos de levantamentos planialtimétricos utilizados.

O método de construção dos triângulos de uma TIN será a Triangulação de Delaunay. Este método visa maximizar o ângulo interno mínimo dos triângulos com objetivo de uma representação da superfície mais suave e próxima da realidade.

A construção de um TIN é apenas um passo intermediário para o pós-processamento de dados planialtimétricos (detalhado a seguir) pois de fato o programa HEC-RAS se utiliza de dados estruturados em malha (*structured grid*).

A conversão foi realizada após a etapa final de processamento da triangulação.

Mesmo existindo uma quantidade significativa de dados planialtimétricos levantados é maior ainda densidade necessária para construção de uma superfície contínua que represente de forma adequada as seções hidráulicas.

Isto torna-se evidente na questão dos levantamentos topobatimétricos onde pode existir uma distância significativa entre as seções de rio levantadas e tal condição podendo levar à construção equivocada da superfície hidráulica.

Para sanar tal limitação foi necessária a inserção de informações planialtimétricas complementares.

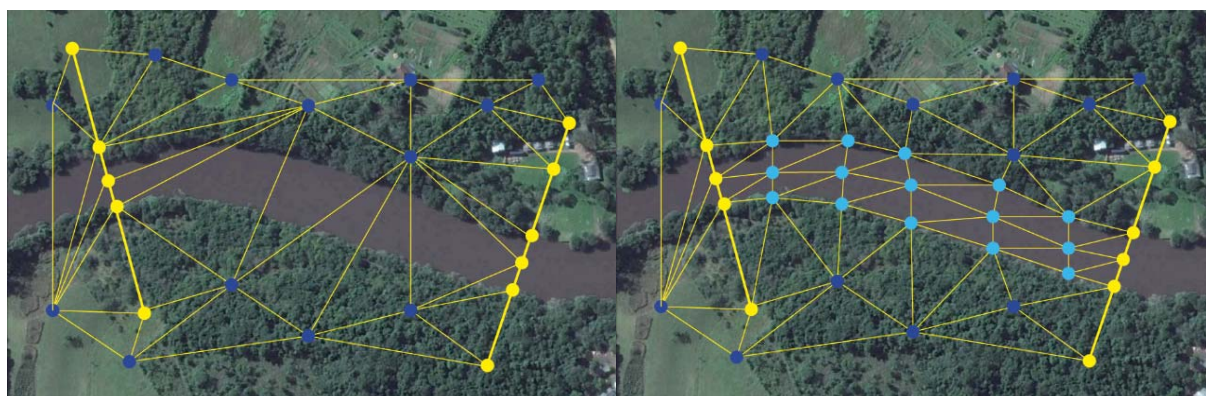
Tais informações complementares se utilizaram dos pontos com cota conhecida existentes mas tem como objetivo representar elementos de elevação que, devido a característica irregular da distribuição de pontos, não puderam ser levantados. Exemplos:

- Curvas e meandros de rio entre duas seções topobatimétricas;
- Elementos construídos com grande extensão longitudinal ao rio (ex: diques);
- Canais secundários de curta extensão.

Para avaliação de situações tais como esta foi utilizada uma ou mais imagens base em conjunto com os pontos cotados.

Os pontos de elevação característicos do trecho a ser representado foram previamente (antes da construção da TIN) interpolados entre as informações existentes.

Um exemplo de construção de superfície antes e depois deste processo de refino dos dados topográficos é apresentado na Figura 5.



● Pontos topográficos cotados ● Pontos topobatimétricos cotados ● Pontos complementares

Figura 5 - Comparação da superfície construída com e sem pontos complementares.
(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

Os elementos principais de elevação que demandam pontos complementares para correta representação da superfície estão representados na Figura 6.

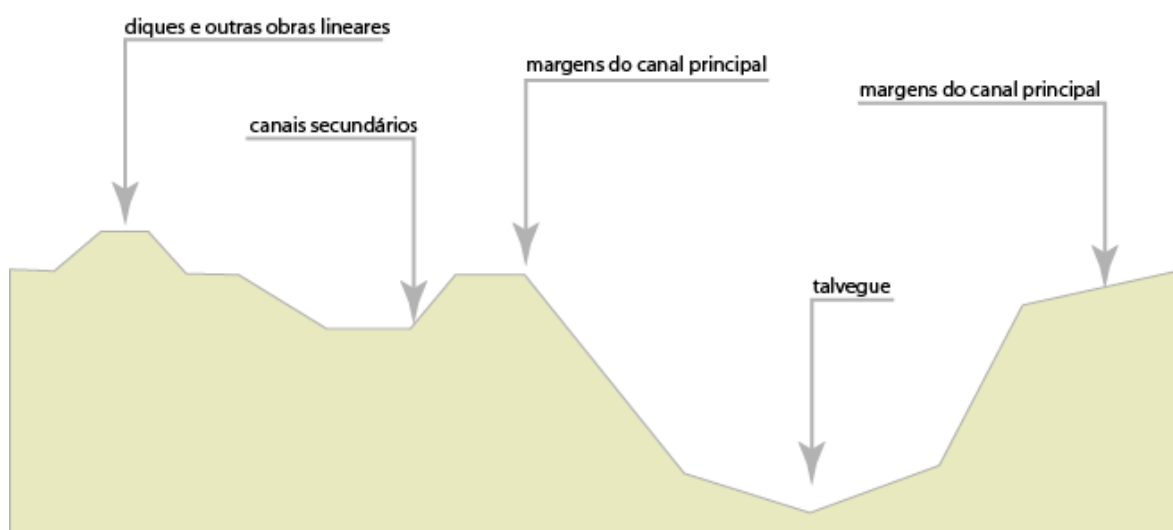


Figura 6 - Elementos principais de elevação para reconstituição da superfície
(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

Após a construção do modelo de terreno e conversão para um formato de malha estruturada o mesmo foi carregado para o HEC-RAS Mapper para o pré-processamento de geometrias e assim, permitir sua utilização na modelagem.

5.3 Construção da Malha Computacional

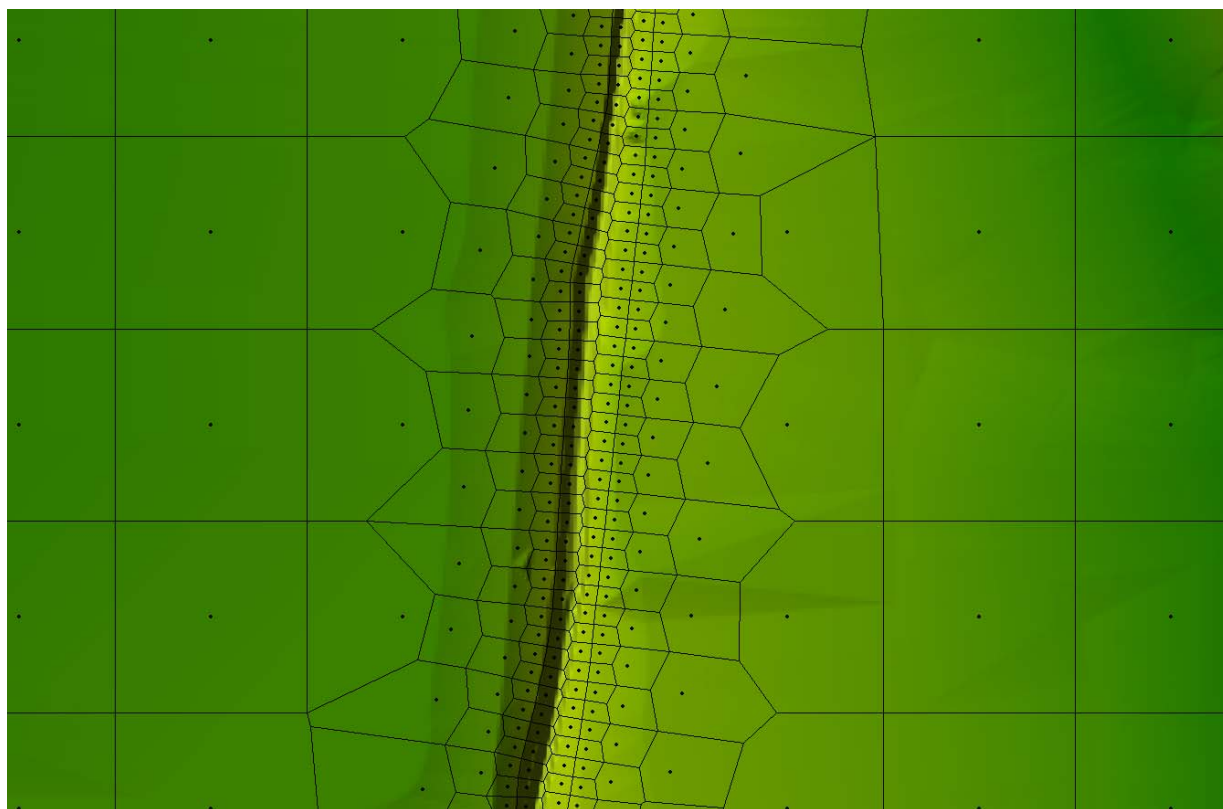
A malha computacional representa o detalhamento espacial para o cálculo das equações hidrodinâmicas do modelo. A malha computacional é constituída de células que apresentam dimensão física real e onde o escoamento é considerado uniforme.

Quanto menor a área individual das células maior a quantidade de células para cobrir um mesmo espaço e, assim, maior o custo computacional (relação entre tempo de simulação e capacidade de processamento) necessário.

Como a metodologia utilizada pelo programa HEC-RAS não demanda que as células possuam tamanho constante e permite que o formato destas não seja constante, a disposição destas pode ser otimizada para reduzir o custo computacional e permitir o detalhamento mínimo necessário.

A Figura 7 apresenta um exemplo da malha computacional utilizada no modelo hidrodinâmico (as cores representam a escala de cota de superfície hidráulica).

Pode-se observar a diferença entre o tamanho da célula computacional utilizada nas áreas de maior variação planialtimétrica (centro da figura) e nas áreas de planície ou menor variação planialtimétrica (esquerda e direita da figura).



*Figura 7 - Exemplo de malha computacional gerada.
(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)*

O detalhamento maior (menor célula computacional) é utilizado para a correta representação de elementos hidráulicos como a calha principal dos rios, diques, pontes, bueiros, etc.

As células utilizam a informação topográfica gerada pela superfície planialtimétrica construída computando uma cota média dentro dos seus limites individuais e fornecendo esta informação como dado de entrada ao modelo.

O Quadro 9 (ver pag. 36) apresenta um resumo das características da malha computacional.

5.4 Parâmetros

✓ Coeficiente de Rugosidade

A vazão e cota nos trechos de rio/canal simulados são diretamente relacionados ao coeficiente de rugosidade de Manning do trecho.

A estimativa deste parâmetro é fundamental para a modelagem hidrodinâmica, sendo altamente variável e dependente de um número de fatores como macro rugosidades da superfície dos canais, vegetação, irregularidades na seção, alinhamento do trecho, etc.

Além de ser variável ao longo do curso d'água, para uma mesma seção perpendicular hipotética de trecho de rio, o coeficiente de rugosidade não é necessariamente constante (Figura 8).

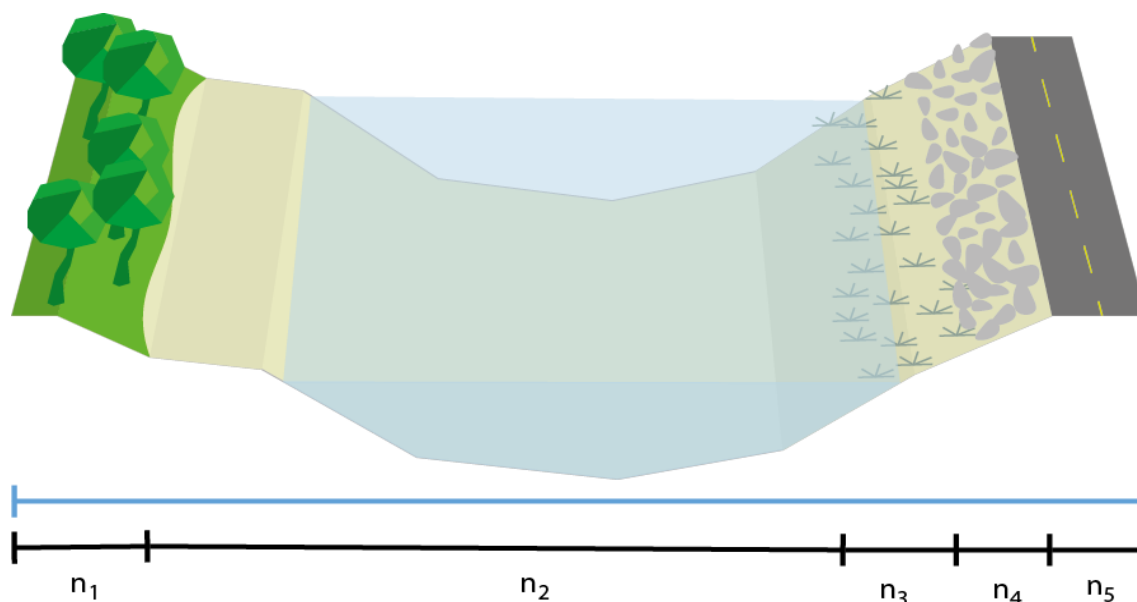


Figura 8 - Exemplo de variação de rugosidade em uma mesma seção hidráulica
(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

Os elementos que maior impacto no coeficiente de rugosidade são:

- Material de constituição do trecho;
- Irregularidades na seção: elementos nas margens da seção de um canal que se projetem na seção hidráulica (troncos, raízes expostas) ou erosões;
- Variações abruptas na dimensão da seção hidráulica;
- Obstruções na seção hidráulica (pontes/pilares recebem considerações específicas);
- Vegetação: especialmente de grande porte, acima da linha d'água, com crescimento perpendicular ao fluxo e com pouca flexibilidade;
- Curvas e meandros.

Variações importantes podem ocorrer naturalmente (ex: o nível médio do rio não permite crescimento significativo de vegetação na calha principal) ou por ação antrópica (ex: trechos com inundação eventual podem sofrer alguma forma de ocupação).

Isto é particularmente evidente em condições em que o canal principal não contém a vazão de cheia e ocorre extravasamento para uma planície de inundação.

A rugosidade efetiva de um trecho também é variável quanto no tempo. Um exemplo disto é formação de vegetação ripária em certas épocas do ano ou condições de nível de rio.

Tal vegetação pode oferecer resistência significativa ao escoamento fluvial e, desta forma, incrementar a rugosidade efetiva do canal.

Tais variações espaciais e temporais foram contempladas no modelo hidráulico.

Considerando a aleatoriedade de ocorrência de eventos de precipitação o parâmetro de rugosidade para uma determinada seção foi determinado através da pior condição de provável ocorrência, independente de sazonalidade.

Considerando o escopo da simulação e a impossibilidade de caracterização detalhada da rugosidade de cada trecho simulados, algumas generalizações foram realizadas.

A partir das seguintes referências foi elaborada uma relação das tipologias de revestimentos, canais e ocupação de solo características de bacia em questão e associado um valor de rugosidade para tal; ver Quadro 5 a seguir:

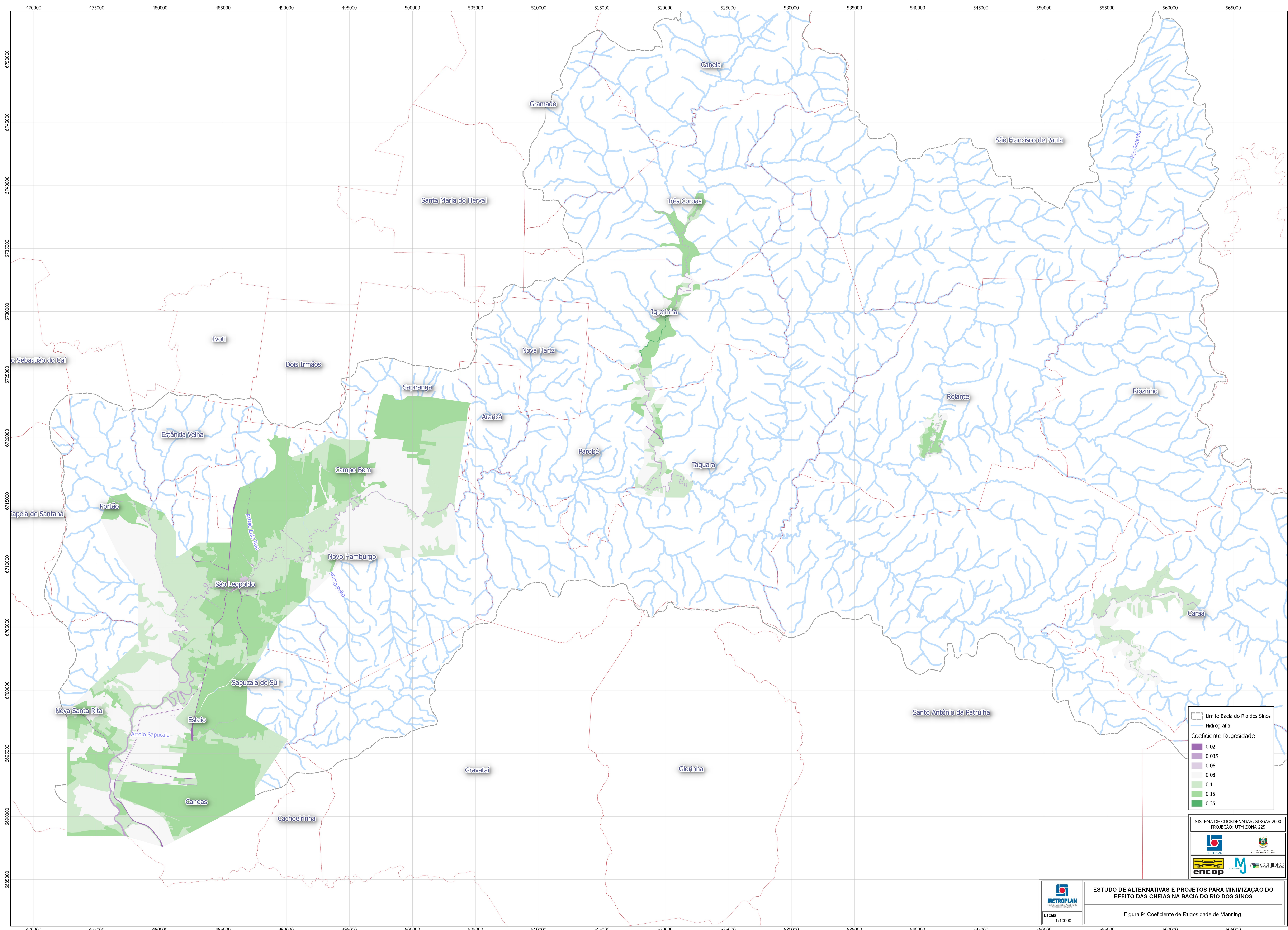
- ARCEMENT, GEORGE J.; SCHNEIDER, VERNE R. - Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. 1989;
- CHOW, V. T. - Open channel hydraulics. 1959.

Quadro 5 - Coeficientes de rugosidade propostos

Tipologia	Rugosidade
Canais Artificiais	
Canal, aduela, galeria de concreto	0,013
Gabião ou canal com enrocamento	0,030
Canal escavado, sem revestimento	0,023
Canais Naturais	
Canal natural, sem vegetação	0,033
Canal natural, com vegetação de pequeno porte	0,040
Canal natural, com vegetação de grande porte nas margens	0,050
Planícies de Inundação	
Banhado sem vegetação de grande porte	0,120
Planície de inundação com vegetação de grande porte	0,200
Lavoura	0,100
Outros Elementos	
Área Urbana – alta densidade	0,150
Área Urbana – baixa densidade	0,100

(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

A Figura 9 mostra o mapa dos coeficientes de rugosidade considerados na modelagem.



✓ Obras Correntes

Os trechos de rios e canais analisados estão inseridos em contextos urbanos, desta forma diversas pontes afetam diretamente a seção hidráulica e o cálculo hidrodinâmico do escoamento.

O HEC-RAS computa as perdas de energia em estruturas como pontes, bueiros e galerias em 3 componentes.

Os componentes consistem na perda de carga que existe imediatamente a jusante da estrutura (expansão do escoamento), perdas na estrutura e perdas a montante da estrutura (contração do escoamento).

Embora o modelo tenha sido construído em 2D as estruturas de pontes foram simuladas como um escoamento 1D nesta versão do programa.

Para o correto cálculo hidráulico em uma ponte no mínimo 4 seções hidráulicas devem ser representadas: uma a montante e outra a jusante, a uma distância suficiente para não sofrer influência da contração e expansão do escoamento e uma a montante e outra a jusante para não haver influência dos pilares no escoamento. Ver Figura 10 abaixo:

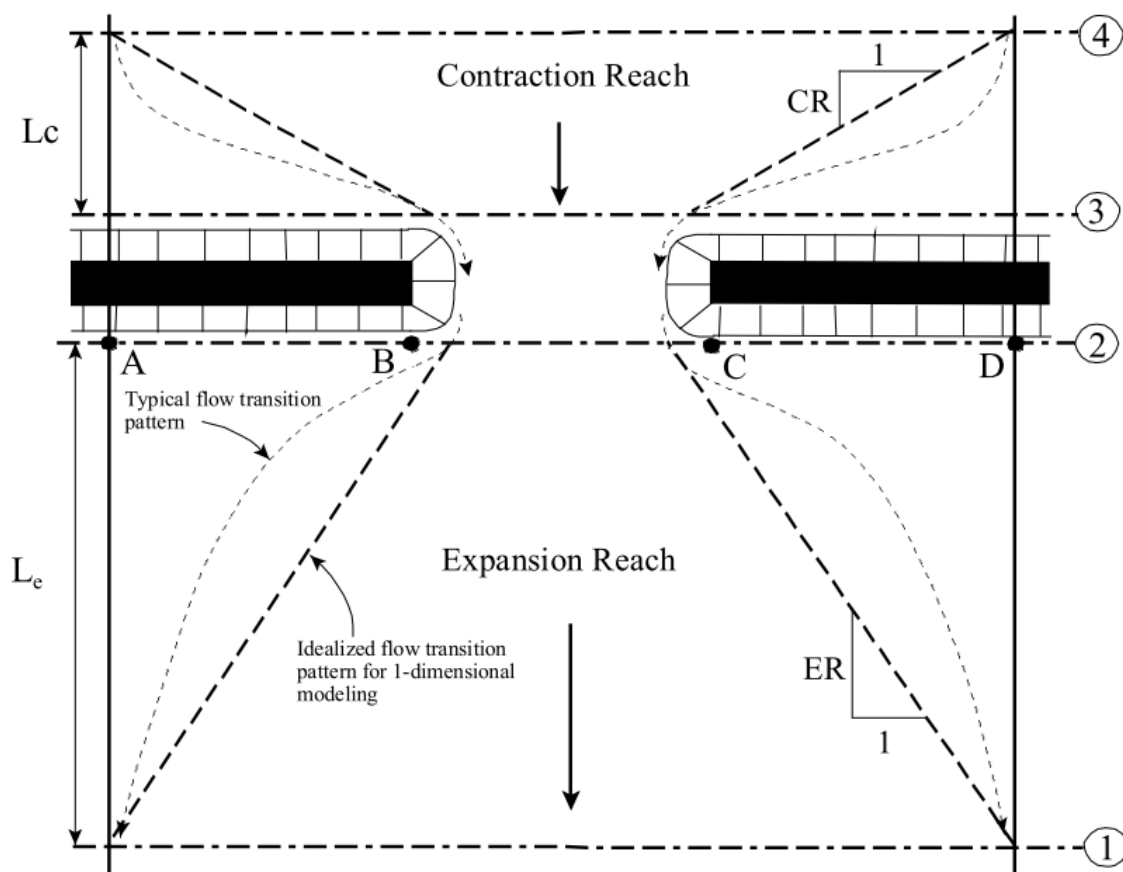


Figura 10 - Seções hidráulicas para representação de uma ponte no HEC-RAS
(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

Além disto o programa automaticamente gera 2 seções dentro da extensão da ponte.

Tais seções são criadas a partir dos parâmetros geométricos definidos no programa e levantados a partir do cadastro das estruturas das pontes (número, formato e geometria dos pilares, altura do tabuleiro, largura das pistas, etc.).

Para as seções 2 e 3 (Figura 10, acima) deve-se definir áreas inefetivas de escoamento, se apropriado (A-B e C-D).

Os coeficientes de perda de energia na contração e expansão do escoamento serão avaliados caso a caso e seguirão o indicado no Quadro 6 a seguir:

Quadro 6 - Coeficientes de perda de energia para contração e expansão

	Contração	Expansão
Sem pilares ou redução mínima de seção hidráulica	0	0
Transição Gradual	0,1	0,3
Valores típicos para pontes	0,3	0,5
Transições Abruptas	0,6	0,8

(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

O valor da perda de energia em si é função da diferença absoluta de velocidades entre seções adjacentes.

O cálculo hidráulico do escoamento através de uma ponte no HEC-RAS contempla as seguintes condições de escoamento:

- Escoamento de canal (o nível se encontra abaixo da superestrutura);
- Escoamento de canal e vertedouro (parte do escoamento ultrapassa a superestrutura);
- Escoamento pressurizado (o escoamento preenche toda a seção hidráulica sob a ponte sem ultrapassar a superestrutura);
- Escoamento pressurizado e vertedouro (o escoamento preenche toda a seção hidráulica sob a ponte e ultrapassa a superestrutura);
- Escoamento altamente submerso (o nível é muito mais alto que a superestrutura).

Das condições apresentadas acima apenas a última é pouco provável nas condições e trechos a serem analisados. O programa automaticamente altera a forma de cálculo dependendo das condições hidráulicas observadas.

O programa apresenta diversas formas de equação de energia para determinação da linha d'água em pontes cada uma desta sendo mais apropriada para certas condições hidráulicas e geometria da estrutura e canal.

A definição do método a ser utilizado em cada situação se dará após a análise do cadastro de cada ponte.

5.5 Escopo

O modelo hidrodinâmico foi construído apenas nos trechos onde o impacto das cheias ou conhecimento do comportamento são importantes, desta forma, foram analisados apenas os seguintes trechos da bacia:

- Rio dos Sinos até o Arroio Sapiranga, incluindo os Arroios Esteio, Sapucaia, José Joaquim, Portão, Cerquinha, Luiz Rau e Schimdt;
- Arroio Grande;
- Rio Paranhana;
- Arroio Areia;
- Arroio do Meio, Riozinho e Caraá;

A localização destas áreas já foi apresentada anteriormente na Figura 2..

5.6 Condições Iniciais e de Contorno

Condições de contorno devem ser estabelecidas em todos os limites (contornos) do sistema hídrico modelado. Condições de contorno podem ser estabelecidas em quaisquer pontos de controle do sistema onde sejam apropriadas, no trecho inicial simulado, no trecho final simulado e nos tributários importantes.

As condições de montante podem ser estabelecidas das seguintes formas:

- Hidrograma de entrada;
- Cotograma de entrada;
- Cota x vazão de entrada.

As condições de jusante podem ser estabelecidas das seguintes formas:

- Curva cota x vazão;
- Profundidade normal;
- Hidrograma de entrada;
- Cotograma de entrada;
- Cota x vazão de entrada.

As condições internas ao sistema podem ser estabelecidas das seguintes formas:

- Hidrograma de vazão lateral de entrada;
- Hidrograma de vazão lateral uniforme;
- Vazão de entrada de aquífero;
- Cota x vazão de entrada.

Além das condições limitantes de contorno também é necessário o estabelecimento de condições iniciais de vazão e nível em todos nós no início da simulação.

O método mais usual é inserção de uma vazão apenas e permitir o cálculo através do programa para o nível correspondente. Os níveis em todas as áreas de armazenamento também foram definidos.

Devido a característica estocástica dos eventos hidrológicos a condição inicial de cada elemento modelado na bacia não pôde ser definida claramente.

A simulação de eventos de precipitação máxima com intuito de determinação de manchas de inundação então deve-se valer de cenários realísticos para cada um dos elementos hidráulico com impacto no escoamento.

Assim foram propostas as seguintes condições:

- **Condição inicial de vazão:** igual a Q50% (e nível correspondente) para cada trecho simulado para TR 5 anos. Para os demais tempos de retorno a condição inicial utilizada foi a condição hidráulica simulada para o TR imediatamente anterior (ex: TR 50 tem como condição inicial o resultado da simulação do TR 25)
- **Nível no Rio Guaíba:** o Rio Guaíba possui uma influência direta no escoamento do Baixo Sinos e conseqüentemente das suas cheias. Entretanto sua bacia é dezenas de vezes maior do que a bacia do Sinos, ou seja, correlacionar os eventos de grande pluviosidade do Sinos diretamente com níveis altos do Rio Guaíba pode levar a considerações exageradas de níveis de cheia. Os níveis considerados para análise das cheias no Guaíba estão apresentados no Quadro 7.
- **Sistema de bombeamento:** para a modelagem das cheias os sistemas de bombeamento serão considerados sempre em capacidade máxima.
- **Warm-up:** uma das capacidades do modelo HEC-RAS é de definir um período de simulação para estabilização das condições iniciais (período de *warmup*). Isto permite que um sistema complexo de condições iniciais se torne estável numericamente e reduza o número de erros da simulação. A duração de cada período de *warmup* será apresentada a seguir.

Quadro 7 - Níveis do Guaíba considerados

TR	Cota
1 ano	0,82
5	2,08
10.00	2,39
25.00	2,79
50.00	3,08
100	3,36

(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

5.7 Calibração

A fase de calibração pode ser descrita como uma etapa que procura adequar os parâmetros para que o modelo produza resultados condizentes com a realidade. Assim é necessário calibrá-lo, ou seja, a partir da definição inicial dos parâmetros, através de uma gama de dados, pode-se testar os modelos utilizando determinados eventos para definir se estes representam adequadamente a realidade.

A calibração da relação cota x vazão foi realizada em todos os pontos onde existiam informações suficientes para tal.

Estas incluem estações fluviométricas com medições de “cota x vazão” simultâneas (resumos de descarga na Hidroweb) ou a partir de curvas de “cota x vazão” ajustadas.

Os valores de curvas de “cota x vazão” ajustadas são válidos mas analisou-se a magnitude da dispersão do ajuste sobre os dados medidos. Se a curva de ajuste não representava bem o funcionamento hidráulico fez-se um outro ajuste.

A calibração envolve a minimização da diferença entre dados observados e resultados de simulações através do ajuste dos parâmetros implícitos do modelo.

A função objetivo a ser minimizada é a diferença entre as cotas medidas e cotas simuladas para uma mesma vazão:

$$R = \sqrt{\sum \frac{(C_m - C_s)^2}{m}}$$

Onde **C_m** é a cota medida, **C_s** é a cota obtida através da simulação e **m** é o número de dados de entrada para a calibração.

A

Figura 11 apresenta os resultados de “cota x vazão” observados em relação aos valores obtidos no resultado da simulação hidrodinâmica.

Os resultados apresentam boa correlação entre os valores de cota vazão (**R² = 0,95**).

São Leopoldo - comparação cota x vazão

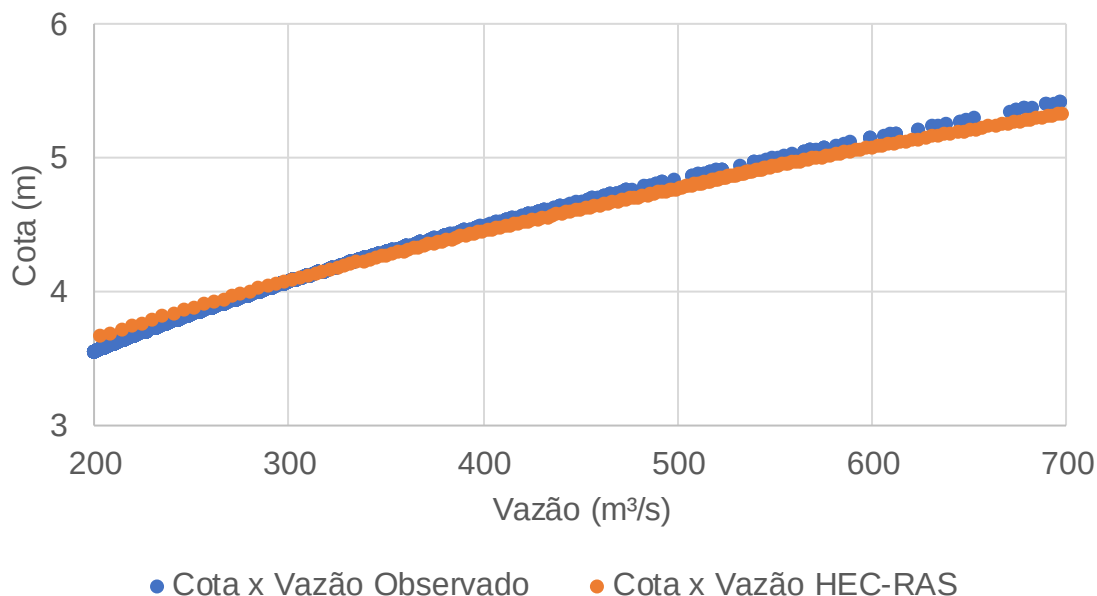


Figura 11 - Calibração dos Parâmetros Hidráulicos para a seção Estação São Leopoldo
(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

5.8 Combinação dos Efeitos

Sabe-se que existe um trecho ao longo do Rio dos Sinos no qual a influência do nível do rio Guaíba é significativa sobre as cheias máximas.

A correlação estatística entre as cheias do rio Guaíba e períodos de maior vazão do Rio dos Sinos é muito baixa, podendo-se considerar tais eventos (cheias Guaíba x Sinos) como eventos praticamente independentes.

Devido a relativa complexidade hidráulica entre o sistema Guaíba x Sinos é impossível, a priori, se definir qual a situação hidráulica mais crítica para cada tempo de retorno.

Desta forma foi proposta uma análise combinatória dos efeitos de jusantes e vazões de cheias do Rio dos Sinos, conforme apresentado no Quadro 8, avaliando duas condições por tempo de retorno.

A mancha de inundação final para cada TR pondera os efeitos de ambas simulações sendo que, para cada área (dentro da resolução espacial adotada), é considerada a maior cota simulada.

O mapa final e contorno de inundação é o resultado combinado das análises realizadas.

Quadro 8 - Análise combinatória de efeitos (Sinos x Guaíba).

Avaliação TR	Condição 1	Condição 2
TR 5 anos	Vazão Rio dos Sinos TR 5 anos Nível médio no Rio Guaíba	Vazão média no Rio dos Sinos Nível Rio Guaíba TR 5 anos
TR 10 anos	Vazão Rio dos Sinos TR 10 anos Nível médio no Rio Guaíba	Vazão média no Rio dos Sinos Nível Rio Guaíba TR 10 anos
TR 25 anos	Vazão Rio dos Sinos TR 25 anos Nível médio no Rio Guaíba	Vazão média no Rio dos Sinos Nível Rio Guaíba TR 25 anos
TR 50 anos	Vazão Rio dos Sinos TR 50 anos Nível médio no Rio Guaíba	Vazão média no Rio dos Sinos Nível Rio Guaíba TR 50 anos
TR 100 anos	Vazão Rio dos Sinos TR 100 anos Nível médio no Rio Guaíba	Vazão média no Rio dos Sinos Nível Rio Guaíba TR 100 anos

(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

5.9 Secionamento do Modelo

Devido à grande diferença de escala entre o Rio dos Sinos e seus afluentes, tanto os tempos de resposta hidrológica quanto a dimensão dos elementos topográficos são significativamente diferentes entre eles.

Assim tanto o passo de tempo computacional (tempo entre cada instante simulado) quanto o detalhamento da malha computacional (densidade espacial dos pontos avaliados) devem ser apropriados a cada caso.

Um passo computacional de curta duração para atender os tempos de respostas dos afluentes incrementa muito o custo computacional (tempo necessário para realizar a simulação) e acrescenta pouco detalhe aos maiores cursos d'água.

Um passo computacional maior reduz o tempo computacional mas apresenta resultados inadequados para os menores afluentes.

De modo a se otimizar tanto o custo computacional quanto para se atingir um nível de detalhamento adequado para o trabalho, a modelagem foi secionada em trechos.

Desta forma o Rio dos Sinos e os seus afluentes foram modelados separadamente e seus resultados combinados após através de software de SIG.

Ao serem combinados os resultados das simulações avaliou-se para cada região (dentro da discretização espacial utilizada) o valor máximo combinado, somando-se os resultados do Rio dos Sinos e seus afluentes (Figura 12).



*Figura 12 - Análise combinada das manchas de inundação
(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)*

5.10 Resumo dos Parâmetros Hidráulicos e Computacionais

O Quadro 9 apresenta um resumo dos parâmetros hidráulicos e computacionais utilizados nas simulações para cada trecho simulado.

Quadro 9 - Parâmetros Hidráulicos e Computacionais

Malha Computacional	Rio dos Sinos	Esteio/Sapucaia	José Joaquim	Portão	Cerquinha	Luiz Rau	São José
Quantidade de células	264086	78699	78964	41527	13940	13838	20048
Área Média [m²]	583	270	81	277	448	87	239
Área Máxima [m²]	1433	890	212	727	5168	166	1640
Área Mínima [m²]	32	4	4	3	2	5	3
Equivalente Médio Célula Quadrada [m]	24	16	9	17	21	9	15
Sub-malha topográfica [cm]	250	100	100	100	100	100	100
Passo Computacional [segundos]	180	15	10	60	30	60	60
Intervalo de Saída de Resultados [min]	30	60	30	30	60	60	30
Warmup [horas]	48	12	3	12	6	3	3
Parâmetro τ	1	1	1	1	1	1	1
Tolerância de Altura da Lâmina d'Água [cm]	1	6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Modelo Computacional	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D

Malha Computacional	Sapiranga	Grande	Paranhana	Areia	Riozinho	Meio	Caraá
Quantidade de células	20490	29217	98227	18100	26015	20425	7786
Área Média [m²]	263	439	338	200	88	76	180
Área Máxima [m²]	1105	1294	950	487	235	243	2330
Área Mínima [m²]	3	13	17	4	6	4	3
Equivalente Médio Célula Quadrada [m]	16	21	18	14	9	8	13
Sub-malha topográfica [cm]	100	100	250	100	100	100	100
Passo Computacional [segundos]	15	120	15	15	5	10	10
Intervalo de Saída de Resultados [min]	30	60	30	60	30	30	15
Warmup [horas]	3	24	6	24	3	3	3
Parâmetro τ	1	1	1	1	1	1	1
Tolerância de Altura da Lâmina d'Água [cm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Modelo Computacional	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D	Difusão 2D

(Fonte: Consórcio Metroplan Bacia do Rio dos Sinos)

5.11 Fluxo de Trabalho

O fluxograma de trabalho para a construção, calibração e obtenção de resultados do modelo hidrodinâmico foi o seguinte:

- Construção do modelo digital do terreno a partir do processamento dos resultados de levantamentos topográficos obtidos e imagens de satélite e de aerofotogrametria.
- Construção da geometria do modelo com inserção do modelo digital do terreno no HEC-RAS e das estruturas existentes (ex: pontes, bombeamento, áreas de bloqueio, etc.)
- Elaboração do mapa de rugosidades (coeficiente de Manning) a partir do mapa de uso dos solos e imagens de satélite e levantamento aéreo.
- Definição das condições iniciais e de contorno;
- Definição dos hidrogramas de calibração por trecho simulado;
- Calibração dos parâmetros do modelo;
- Definição do hidrogramas de cheias de acordo com os tempos de retorno de projeto;
- Simulação da condição proposta;
- Pós-processamento dos resultados para obtenção de mapas e informações secundárias.

6 RESULTADOS

Os resultados obtidos nas simulações estão apresentados em anexo a este relatório, conforme abaixo:

- MANCHAS DE INUNDAÇÕES (formato A3):

Figura 13 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 5 anos – situação geral
Figura 14 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 10 anos – situação geral
Figura 15 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 25 anos – situação geral
Figura 16 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 50 anos – situação geral
Figura 17 - Rio dos Sinos - Tempo de Retorno 100 anos – situação geral
Figura 18 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 5 anos – situação geral
Figura 19 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 10 anos – situação geral
Figura 20 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 25 anos – situação geral
Figura 21 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 50 anos – situação geral
Figura 22 - Paranhana e Grande - Tempo de Retorno 100 anos – situação geral
Figura 23 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 5 anos – situação geral
Figura 24 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 10 anos – situação geral
Figura 25 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 25 anos – situação geral
Figura 26 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 50 anos – situação geral
Figura 27 - Rolante e Areia - Tempo de Retorno 100 anos – situação geral
Figura 28 - Riozinho - Tempo de Retorno 5 anos – situação geral
Figura 29 - Riozinho - Tempo de Retorno 10 anos – situação geral
Figura 30 - Riozinho - Tempo de Retorno 25 anos – situação geral
Figura 31 - Riozinho - Tempo de Retorno 50 anos – situação geral
Figura 32 - Riozinho - Tempo de Retorno 100 anos – situação geral
Figura 33 - Nascentes - Tempo de retorno 5 anos – situação geral
Figura 34 - Nascentes - Tempo de retorno 10 anos – situação geral
Figura 35 - Nascentes - Tempo de retorno 25 anos – situação geral
Figura 36 - Nascentes - Tempo de retorno 50 anos – situação geral
Figura 37 - Nascentes - Tempo de retorno 100 anos – situação geral
Figura 62 - Articulação

- MANCHAS DE INUNDAÇÕES DIVIDIDAS POR ÁREAS (formato A1);

Figura 38 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 1
Figura 38a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 1 - IMAGEM
Figura 39 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 2
Figura 39a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 2 - IMAGEM
Figura 40 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 3
Figura 40a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 3 - IMAGEM
Figura 41 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 4
Figura 41a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 4 - IMAGEM
Figura 42 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 5
Figura 42a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 5 - IMAGEM
Figura 43 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 6
Figura 43a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 6 - IMAGEM
Figura 44 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 7
Figura 44a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 7 - IMAGEM
Figura 45 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 8
Figura 45a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 8 - IMAGEM
Figura 46 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 9
Figura 46a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 9 - IMAGEM
Figura 47 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 10
Figura 47a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 10 - IMAGEM

Figura 48 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 11
Figura 48a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 11 - IMAGEM
Figura 49 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 12
Figura 49a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 12 - IMAGEM
Figura 50 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 13
Figura 50a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 13 - IMAGEM
Figura 51 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 14
Figura 51a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 14 - IMAGEM
Figura 52 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 15
Figura 52a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 15 - IMAGEM
Figura 53 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 16
Figura 53a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 16 - IMAGEM
Figura 54 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 17
Figura 54a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 17 - IMAGEM
Figura 55 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 18
Figura 55a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 18 - IMAGEM
Figura 56 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 19
Figura 56a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 19 - IMAGEM
Figura 57 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 20
Figura 57a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 20 - IMAGEM
Figura 58 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 21
Figura 58a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 21 - IMAGEM
Figura 59 - Mancha de Inundação – Detalhe Área 22
Figura 59a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 22 – IMAGEM
Figura 60 - Mancha de Inundação _ Detalhe Área 23
Figura 60a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 23 - IMAGEM
Figura 61 - Mancha de inundação – Detalhe Área 24
Figura 61a - Mancha de Inundação – Detalhe Área 24 – IMAGEM

Os arquivos em formato (.kmz e .pdf), bem como os “shapes” serão apresentados também em mídia digital.

7 REFERÊNCIAS

COMITÊ DE GERENCIAMENTO DO RIO DOS SINOS (2014) – Plano da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos.

LABORATÓRIO DE GEOPROCESSAMENTO DO CENTRO DE ECOLOGIA UFRGS (2002) - Classificação de vegetação do RS;

TUCCI C. E. M. (2009) – Hidrologia – Ciência e Aplicação.

USACE –HEC-RAS (2010) - River Analysis System. Hydraulic Reference Manual, US Army Corp of Engineers – Hydrologic Engineering Center. Davis (CA). January - 2010.

USACE-HEC-HMS (2000) – Hydrologic Modeling System – Technical Reference Manual.