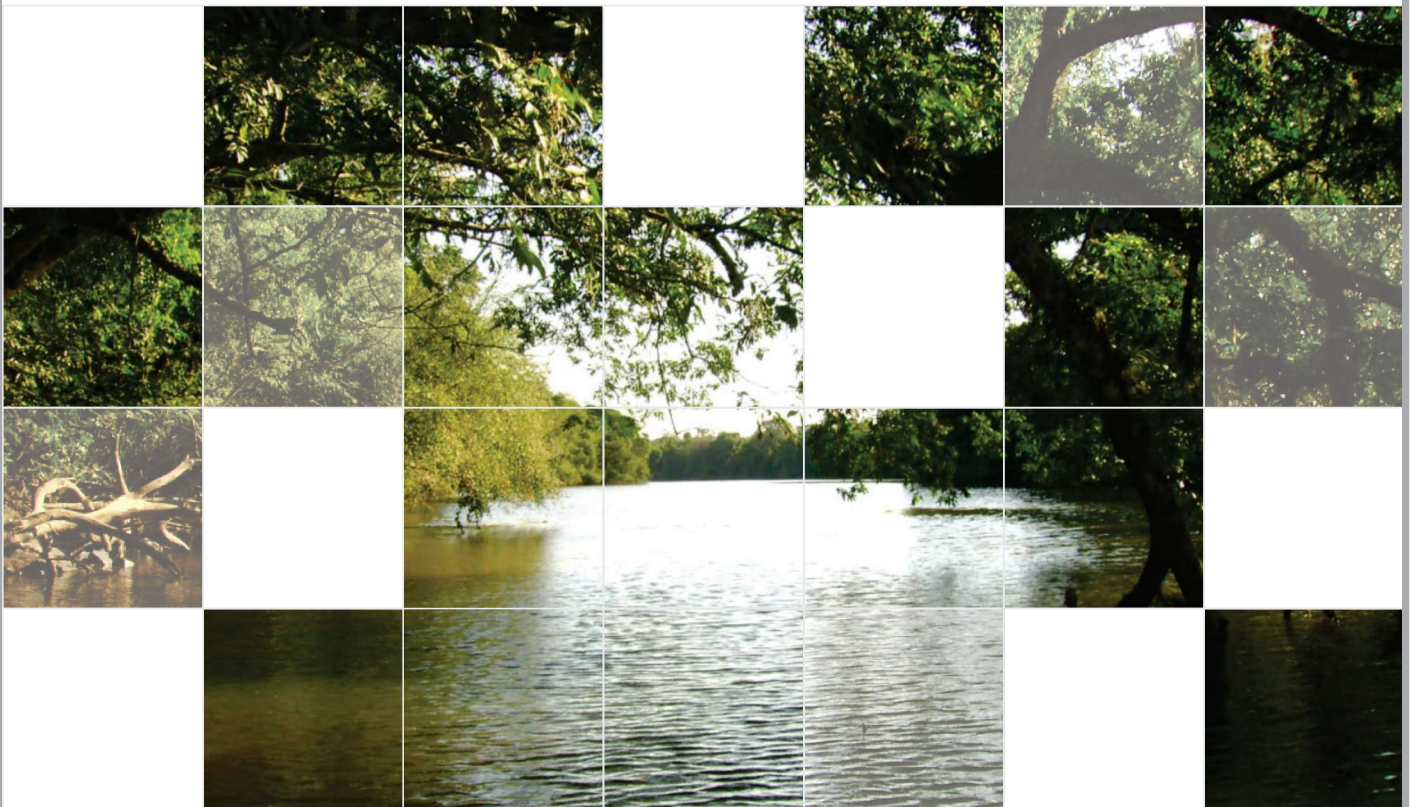




ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
Secretaria de Obras Públicas, Irrigação
e Desenvolvimento Urbano - SOP

**ESTUDO DE ALTERNATIVAS PARA MINIMIZAÇÃO
DO EFEITO DAS CHEIAS DO TRECHO BAIXO DO RIO CAÍ**



RELATÓRIO FINAL – RF
ESTUDOS E SOLUÇÕES RECOMENDADAS PARA
O PROBLEMA DE CHEIAS NO BAIXO RIO CAÍ
Edição Revisada

Consórcio Técnico



ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

**Secretaria de Obras Públicas, Irrigação e
Desenvolvimento Urbano - SOP**

**ESTUDOS DE ALTERNATIVAS PARA MINIMIZAÇÃO DO
EFEITO DAS CHEIAS DO TRECHO BAIXO DO RIO CAÍ/RS**

RELATÓRIO FINAL – RF

**ESTUDOS E SOLUÇÕES RECOMENDADAS PARA O
PROBLEMA DE CHEIAS NO BAIXO RIO CAÍ**

EDIÇÃO REVISADA

Consórcio Técnico



Enggeplus
engenharia e consultoria Ltda.



AEROGEO
Aerofotogrametria, Geoprocessamento e Engenharia Ltda

(OUTUBRO/2014)



QUADRO DE CODIFICAÇÃO DO DOCUMENTO

Código:	EG0182-R-ERH-RF-01-01			
Título do Documento:	RELATÓRIO FINAL: ESTUDOS E SOLUÇÕES RECOMENDADAS PARA O PROBLEMA DE CHEIAS NO BAIXO RIO CAÍ – RF – EDIÇÃO REVISADA			
Aprovador:	FERNANDO FAGUNDES			
Data da Aprovação:	14/10/2014			
Controle de Revisões				
Nº da Revisão	Natureza/Justificativa	Aprovação		
		Data	Responsável	Rubrica
00	Emissão Inicial	24/09/2014	Fernando Fagundes	F.F
01	Complementações	14/10/2014	Fernando Fagundes	F.F



ÍNDICE



ESTUDOS DE ALTERNATIVAS PARA MINIMIZAÇÃO DO EFEITO DAS CHEIAS DO TRECHO BAIXO DO RIO CAÍ/RS

ESTUDOS E SOLUÇÕES RECOMENDADAS PARA O PROBLEMA DE CHEIAS NO BAIXO RIO CAÍ – RF

EDIÇÃO REVISADA

ÍNDICE

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.1	Identificação do Contrato de Prestação de Serviços.....	2
1.2	Objetivos e Escopo dos Estudos e Planejamentos.....	2
1.3	Breve Caracterização da Área de Estudo.....	3
1.4	Forma de Apresentação dos Relatórios.....	8
1.5	Planejamento do Trabalho.....	9
1.6	Equipe Técnica.....	9
1.7	Conteúdo do Relatório Final - RF.....	12
2	SERVIÇOS DE CAMPO.....	13
2.1	Aerofotogrametria.....	14
2.2	Topobatimetria.....	18
3	ESTUDOS HIDROLÓGICOS.....	20
3.1	Caracterização do Problema das Cheias no Trecho Baixo do Rio Caí.....	21
3.2	Análise de Dados Pluviométricos.....	33
3.3	Análise de Dados Fluviométricos.....	38
3.4	Avaliação dos Mecanismos de Formação de Cheias no Baixo Rio Caí.....	43
3.5	Cenários para Simulações Hidráulicas.....	46
4	SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS E MAPAS DE INUNDAÇÕES.....	50
4.1	Simulações Hidrológicas.....	51
4.1.1	Modelo Hidrodinâmico Utilizado.....	51
4.1.2	Condições de Contorno.....	53
4.1.3	Dados de Entrada Considerados.....	54
4.1.4	Calibração do Modelo.....	55
4.2	Mapas de Inundações.....	60
5	ESTUDOS DE ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO.....	61
5.1	Concepção das Alternativas Técnicas Consideradas.....	62
5.1.1	Proposição de Medidas Estruturais.....	62
5.1.2	Proposição de Medidas Não estruturais.....	73
5.2	Simulação Hidrodinâmica Integrada para as Alternativas Modeladas.....	76
5.3	Estimativa de Custos das Alternativas.....	79
6	ESTUDO DE VIABILIDADE E HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS.....	81
6.1	Estabelecimento das Séries de Custos e Benefícios das Alternativas.....	82
6.1.1	Custos das Alternativas.....	82
6.1.2	Custos Financeiros das Cheias.....	84
6.1.3	Benefícios Financeiros das Alternativas.....	86
6.2	Avaliação da Viabilidade Financeira das Alternativas.....	86



6.3	Avaliação Técnica e Ambiental das Alternativas.....	88
6.3.1	Avaliação Técnica das Alternativas	88
6.3.2	Avaliação Ambiental das Alternativas	89
6.4	Hierarquização das Alternativas	90
6.4.1	Análise Integrada Comparativa das Alternativas.....	90
6.4.2	Hierarquização das Alternativas	92
7	MOBILIZAÇÃO SOCIAL	96
7.1	Reuniões Públicas e com Instituições Estratégicas	97
7.2	Encontros Públicos.....	98
7.2.1	Audiência Pública 1	99
7.2.2	Audiência Pública 2	99
7.2.3	Audiência Pública 3	100
7.2.4	Audiência Pública 4	100
7.3	Meios de Divulgação	101
7.3.1	Jornal	101
7.3.2	Revista	101
7.3.3	Panfleto Informativo.....	101
7.3.4	Cartaz de Divulgação	101
7.3.5	Sites Institucionais.....	101
7.3.6	Facebook.....	101
7.3.7	Lista de E-mails	102
7.4	Resultados da Participação Social	102
7.4.1	Consulta Pública 1.....	102
7.4.2	Consulta Pública 2.....	103
8	SOLUÇÕES RECOMENDADAS PARA O PROBLEMA DE CHEIAS NO BAIXO RIO CAÍ.....	107
9	ANEXOS.....	112



RELAÇÃO DE QUADROS E FIGURAS



RELAÇÃO DE QUADROS

Quadro 1.1: Relatórios a Serem Apresentados.....	8
Quadro 1.2: Relação da Equipe Técnica.....	9
Quadro 3.1: Enchentes ocorridas nos municípios de interesse no período de 2003-2007. Fonte: PROFILL (2007).....	26
Quadro 3.2: Fonte, Identificação do Conteúdo e Análise Crítica de Aproveitamento das Informações Consultadas.....	28
Quadro 3.3: Vazões e cotas características para diversos tempos de recorrência no km 56,8 (Passo Montenegro) e km 53 (Montenegro). Fonte: SEMA/Profill (2009).....	31
Quadro 3.4: Níveis em Montenegro sem e com canal extravasor e redução para vários tempos de recorrência. Fonte: SEMA/Profill (2009).....	32
Quadro 3.5: Postos Pluviométricos Selecionados.....	33
Quadro 3.6: Precipitações médias anuais.....	34
Quadro 3.7: Distribuição intra-anual das Precipitações Médias (mm).....	36
Quadro 3.8: Média das precipitações máximas anuais.....	36
Quadro 3.9: Precipitações Máximas de 1 dia, ajustadas por Gumbell.....	38
Quadro 3.10: Equações IDF para os postos selecionados.....	38
Quadro 3.11: Estações de Monitoramento Fluviométrico.....	39
Quadro 3.12: Estatísticas Mensais de Vazões (m ³ /s) para o Baixo Caí.....	40
Quadro 3.13: Correlações entre séries de vazões médias e máximas, das estações selecionadas.....	41
Quadro 3.14: Estatísticas Mensais de Cotas (cm) para o Baixo Caí.....	41
Quadro 3.15: Correlações entre séries de cotas médias e máximas, das estações selecionadas.....	42
Quadro 3.16: Vazões Máximas, por Tempo de Retorno, ajustadas por Gumbell.....	43
Quadro 3.17: Cotas Máximas, por Tempo de Retorno, ajustadas por Gumbell.....	43
Quadro 3.18: Anos com eventos de cheia para a comparação entre as séries de precipitações e vazão (e cotas).....	45
Quadro 3.19: Correlações entre séries de Praça da Harmonia (níveis) e Nova Palmira (precipitações e vazões), nas estações selecionadas.....	45
Quadro 3.20: Vazões máximas, em função do tempo de retorno, para as sub-bacias.....	48
Quadro 3.21: Vazões Máximas para a bacia do rio Caí, na S-26, através da interpolação entre Barca do Caí e Nova Palmira.....	49
Quadro 3.22: Níveis característicos do Lago Guaíba, para cenários de simulação.....	49
Quadro 4.1: Níveis máximos para a estação Praça de Harmonia.....	54
Quadro 5.1: Níveis de Água para Cheia (TR=100anos) nos Municípios para os Cenários Atual e com as Alternativas de Proteção – simulação integrada das alternativas.....	76
Quadro 5.2: Níveis de Água de Cheia (TR=100anos) Alcançados nos Municípios para os Cenários Atual, com Alternativa de Proteção Individual Local e nos Outros Municípios Integrada (todas as alternativas).....	77



Quadro 5.3: Custos unitários dos serviços considerados.....	79
Quadro 5.4: Resumo Geral da Orçamentação das Alternativas Estruturais.....	80
Quadro 6.1: Custos Totais de Implantação das Intervenções Estruturais	82
Quadro 6.2: Custos de Desapropriação das Áreas Atingidas pelas Cheias	84
Quadro 6.3: Custos Financeiros das Cheias.....	85
Quadro 6.4: Relação entre as cheias de diferentes recorrências e o custo da cheia com tempo de recorrência de 100 anos.....	85
Quadro 6.5: Benefícios Financeiros das Alternativas para Cheias de Diversos TR's	86
Quadro 6.6: Resumo dos Resultados da Viabilidade Financeira das Alternativas.....	87
Quadro 6.7: Matriz Multicritério de Análise Comparativa e Integrada entre Alternativas Concorrentes	91
Quadro 6.8: Análise Comparativa de Viabilidade por Aspecto para cada Alternativa Concorrente	92
Quadro 7.1: Participação de pessoas nas audiências públicas do Estudo de Alternativas...	98
Quadro 8.1: Resumo dos Resultados da Viabilidade Financeira das Alternativas.....	108

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da Área de Interesse	4
Figura 1.2: Hidrografia da Bacia Hidrográfica do Rio Caí.....	5
Figura 1.3: Trecho sinuoso do Rio Caí próximo a Montenegro (Fonte: Google Maps, 2012) .6	
Figura 1.4: Geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Caí	7
Figura 1.5: Cronograma Físico de Atividades Atualizado.....	10
Figura 1.6: Fluxograma Geral de Atividades	11
Figura 2.1: Etapas da Aerofotogrametria	14
Figura 2.2: Área com Base Topo-Cartográfica.....	15
Figura 2.3: Exemplo do Detalhamento da Restituição Aerofotogramétrica elaborada para o Estudo. Escala 1:2.000	16
Figura 2.4: Exemplo do Detalhamento da Ortofoto elaborada para o Estudo. Escala 1:2000	17
Figura 2.5: Etapas da Topobatimetria	18
Figura 2.6: Localização das Seções Topobatimétricas	19
Figura 3.1: Enchente em São Sebastião do Caí (1920)	21
Figura 3.2: Inundação de 1982 na cidade de São Sebastião do Caí.....	23
Figura 3.3: Inundação de 2000 na cidade de São Sebastião do Caí.....	23
Figura 3.4: Inundação de 2007 na cidade de São Sebastião do Caí.	23
Figura 3.5: Enchente em São Sebastião do Caí, em julho de 2011.	23
Figura 3.6: Inundação de 2012 na cidade de São Sebastião do Caí.	23
Figura 3.7: Inundação de 2013 na cidade de São Sebastião do Caí.	23



Figura 3.8: Montenegro - inundação em setembro de 1965.....	24
Figura 3.9: Montenegro - inundação em setembro de 2007.....	24
Figura 3.10: Inundação em Montenegro em julho de 2009.....	24
Figura 3.11: Inundação em Montenegro em julho de 2011.....	24
Figura 3.12: Vista da cidade de Montenegro às margens do Rio Caí - julho/2011.....	25
Figura 3.13: Cais do Porto em Montenegro - Setembro/2012.....	25
Figura 3.14: Enchente em Pareci Novo, em setembro de 2007.....	25
Figura 3.15: Inundação no centro de Pareci Novo em julho de 2011.....	25
Figura 3.16: Inundação no centro de Pareci Novo em julho de 2011.....	25
Figura 3.17: Inundação em Pareci Novo em julho de 2013.....	25
Figura 3.18: Inundação em Harmonia, em 1984.....	26
Figura 3.19: Inundação em Harmonia, em 2013.....	26
Figura 3.20: Postos Pluviométricos selecionados para análise espacial das precipitações..	35
Figura 3.21: Distribuição Espacial das Precipitações Médias Anuais.....	35
Figura 3.22: Distribuição Espacial das Precipitações Máximas.....	37
Figura 3.23: Localização das Estações Fluviométricas.....	39
Figura 3.24: Registro de níveis máximos históricos na propriedade do Sr. Walter Fuhr, na localidade de Matiel, município de Pareci Novo.....	44
Figura 3.25: Diagrama esquemático para as simulações hidráulicas.....	46
Figura 3.26: Sub-bacias do Baixo Caí, com destaque para as sub-bacias dos Arroios Cadeia e Maratá.....	47
Figura 3.27: Hidrogramas de Projeto para a sub-bacia do Arroio Cadeia.....	48
Figura 3.28: Hidrogramas de Projeto para a sub-bacia do Arroio Maratá.....	48
Figura 4.1: Subdivisão das seções para o cálculo da condutância (Fonte: HEC-RAS, 2010).	52
Figura 4.2: Visão geral da metodologia adotada na modelagem matemática.....	53
Figura 4.3: Representação do trecho do rio Caí utilizado para simulação no modelo.....	55
Figura 4.4: Séries de vazões diárias em Barca do Caí (a) e níveis diários na Praça da Harmonia (b) durante a cheia de 1984.....	56
Figura 4.5: Séries de vazões diárias em Barca do Caí (a) e níveis diários na Praça da Harmonia (b) durante a cheia de 1988.....	57
Figura 4.6: Comparação entre os níveis diários observados e calculados em Barca do Caí (a) e Montenegro (b) – Cheia de 1984.....	58
Figura 4.7: Perfil longitudinal de níveis no trecho simulado durante a vazão de pico observada na cheia de 1984. Os pontos identificam o nível observado em Barca do Caí (montante) e Montenegro (jusante).....	58
Figura 4.8: Comparação entre os níveis diários observados e calculados em Barca do Caí (a) e Montenegro (b) – Cheia de 1988.....	59
Figura 4.9: Perfil longitudinal de níveis no trecho simulado durante a vazão de pico observada na cheia de 1988. Os pontos identificam o nível observado em Barca do Caí (montante) e Montenegro (jusante).....	59



Figura 5.1: Esboço das alternativas de intervenção propostas para Montenegro.....	64
Figura 5.2: Esboço das alternativas de intervenção propostas para São Sebastião do Caí .	66
Figura 5.3: Esboço das alternativas de intervenção propostas para Harmonia	68
Figura 5.4: Esboço das alternativas de intervenção propostas para Pareci Novo	70
Figura 5.5: Esboço das alternativas de intervenção propostas para as localidades de Matiel, Bananal e Várzea.....	71
Figura 5.6: Esboço das alternativas de intervenção propostas para a RS-124	72
Figura 5.7: Alteração nos níveis da água da cheia centenária devido à implantação do conjunto das alternativas estruturais	78
Figura 7.1: Cronologia das Audiências Públicas Estudo de Alternativas para a Minimização do Efeito das Cheias do Trecho Baixo do rio Caí	98
Figura 7.2: Audiência Pública 1 - São Sebastião do Caí (dez./13)	99
Figura 7.3: Audiência Pública 1 - São Sebastião do Caí (dez./13)	99
Figura 7.4: Audiência Pública 2 - Montenegro (abr./14)	99
Figura 7.5: Audiência Pública 2 - Montenegro (abr./14)	99
Figura 7.6: Audiência Pública 3 - Pareci Novo (ago./14)	100
Figura 7.7: Audiência Pública 3 - Pareci Novo (ago./14)	100
Figura 7.8: Audiência Pública 4 - Montenegro (out./14)	100
Figura 7.9: Audiência Pública 4 - Montenegro (out./14)	100
Figura 7.10: Medidas Estruturais Sugeridas na 1ª Consulta Pública	103
Figura 7.11: Notas atribuídas as alternativas	103
Figura 7.12: Avaliação das alternativas para minimização do efeito das cheias em Harmonia	104
Figura 7.13: Avaliação das alternativas para minimização do efeito das cheias em Montenegro.....	104
Figura 7.14: Avaliação das alternativas para minimização do efeito das cheias em Pareci Novo	105
Figura 7.15: Avaliação das alternativas para minimização do efeito das cheias em São Sebastião do Caí.....	106
Figura 7.16: Resumo das avaliações para minimização do efeito da cheias do baixo rio Caí	106



1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Apresentam-se, inicialmente, considerações a respeito do contrato que orienta a execução do presente trabalho, dos objetivos e escopo dos estudos e planejamentos efetuados, da forma de edição dos relatórios que apresentam os resultados do trabalho e, ainda, a respeito do conteúdo do presente relatório, relativo Relatório Final: Estudos e Soluções Recomendadas para o Problema de Cheias no Baixo Rio Caí - RF.

1.1 Identificação do Contrato de Prestação de Serviços

O presente trabalho decorre do contrato firmado com a Secretaria de Obras Públicas, Irrigação e Desenvolvimento Urbano - SOP, constante do Processo Administrativo nº 000463-22.00/12-2, Tomada de Preços nº 186/CELIC/2012, objetivando a “Elaboração de Serviço de Consultoria Relativo ao Estudo de Alternativas para a Minimização do Efeito das Cheias do Trecho Baixo do rio Caí”.

Os principais dados, informações e condições que permitem caracterizar o referido contrato de prestação de serviços de consultoria são os seguintes:

- Modalidade/Identificação da Licitação: Tomada de Preços Nº 186/CELIC/2012;
- Processo Administrativo: Expediente Nº 000463-22.00/12-2;
- Data da Licitação: 14/01/2013;
- Prazo de Execução dos Serviços: 10 meses;
- Valor do Contrato: R\$ 1.402.416,87;

Com base nas cláusulas e condições do referido contrato e de seu Anexo IV: Termos de Referência, é que se desenvolvem as atividades, estudos e planejamento que visam à “Elaboração de Serviço de Consultoria Relativo ao Estudo de Alternativas para a Minimização do Efeito das Cheias do Trecho Baixo do rio Caí”.

1.2 Objetivos e Escopo dos Estudos e Planejamentos

O objeto do presente trabalho é a elaboração dos “Serviços de Consultoria Relativos ao Estudo de Alternativas para Minimização do Efeito das Cheias do Trecho Baixo do Rio Caí”, dado que esta região tem sofrido frequentemente com as inundações, as quais acarretam danos materiais, diminuição da qualidade de vida da população e até perdas de vidas humanas. Os municípios de interesse para o estudo são aqueles cujas áreas urbanas localizam-se ao longo do curso do rio Caí, em sua porção mais baixa são: Harmonia, Montenegro, Pareci Novo e São Sebastião do Caí.

Trata-se de um trabalho multidisciplinar que envolve conhecimentos de planejamento regional, ambiental e de recursos hídricos, aerofotogrametria, topobatimetria, hidrologia e obras hidráulicas, mobilização social, entre outros.

A definição das atividades a serem desenvolvidas foi realizada com base nos aspectos mencionados anteriormente e nos objetivos dos trabalhos. Tais objetivos devem servir como balizadores para a elaboração dos estudos e são os seguintes:

- Avaliar detalhadamente o problema das cheias no trecho baixo do Rio Caí com vistas a proposição de soluções para o problema;
- Obtenção de alternativas de intervenção ambientalmente e economicamente viáveis para a minimização dos efeitos das cheias do Rio Caí, mediante a apropriação do conhecimento local e a melhor técnica disponível;
- Fomentar a participação das comunidades envolvidas no desenvolvimento do estudo, considerando o Comitê Caí como o principal interlocutor na região, bem como levantar a opinião e percepção da população sobre o tema.

Esses, em suma, são os objetivos e o escopo do presente trabalho que, como ficou evidenciado, deve ser desenvolvido em estreita colaboração com as comunidades, de forma a que o seu resultado expresse claramente o desejo social.

1.3 Breve Caracterização da Área de Estudo

De acordo com a subdivisão hidrográfica do Sistema Estadual de Recursos Hídricos, a bacia do rio Caí está inserida na região hidrográfica do Guaíba, a qual é composta por outras oito bacias hidrográficas: Lago Guaíba, Gravataí, Sinos, Taquari-Antas, Baixo Jacuí, Pardo, Vacacaí, Vacacaí-Mirim e Alto Jacuí. A região abriga cerca de 70% da população do estado do Rio Grande do Sul e sua área é de, aproximadamente, 85.000km² o que corresponde a cerca de 30% da área do estado. Estes dados deixam claro que há uma considerável concentração populacional na região hidrográfica do Guaíba.

A bacia hidrográfica do rio Caí está situada na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, aproximadamente, na área compreendida pelos paralelos e meridianos 29°06" e 30°S, e 50°24" e 51°40" W. Esta bacia limita-se a oeste e a norte com a bacia Taquari-Antas, ao sul com a bacia do Baixo Jacuí e a oeste com a bacia do Sinos. A área de drenagem da bacia do Rio Caí é de 4.983,38 km². A população estimada é de 537.658 habitantes assim distribuída: 82,5% em área urbana e 17,5% em área rural. Esta população corresponde a 5% da população total do estado do Rio Grande do Sul (PROFILL, 2008).

A bacia do rio Caí abrange, integral ou parcialmente 42 municípios gaúchos. Destes, são de interesse para o presente estudo, aqueles situados na parte baixa da bacia, em especial, os que possuem as áreas urbanas localizadas às margens do rio Caí: Harmonia, São Sebastião do Caí, Pareci Novo e Montenegro.

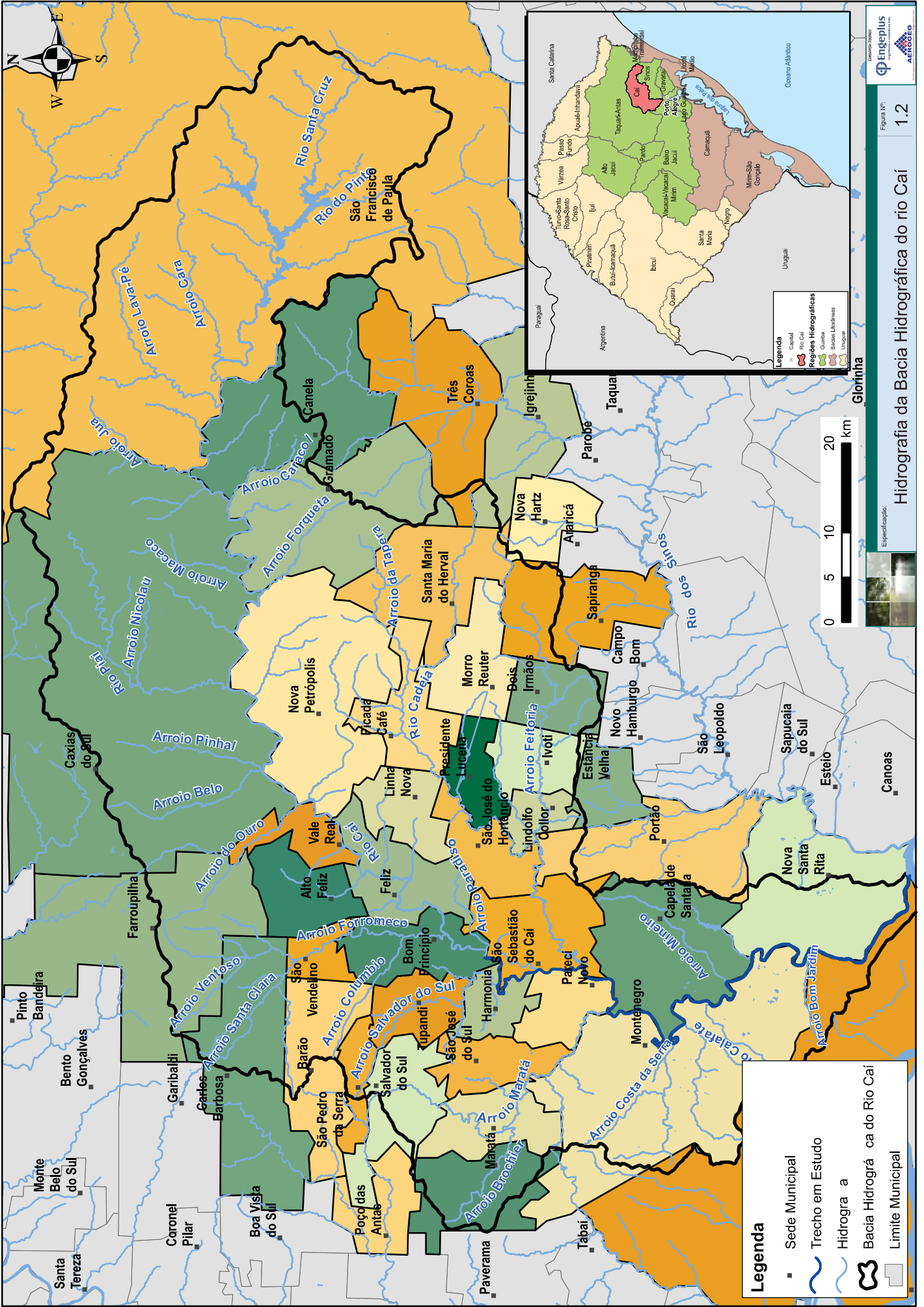
O município de Harmonia está localizado nas proximidades do limite entre o médio e o baixo curso do rio Caí, estando a área urbana às margens deste rio, nas coordenadas geográficas 29.54°S e 51.42°W. A área do município é de cerca de 45 km², onde se distribui uma população de 4.254 habitantes. Destes, 58% residem na área urbana (IBGE, 2010).

O município de São Sebastião do Caí está situado nas coordenadas geográficas 29°35 "S e 51°23 "W, às margens do rio Caí, no limite entre o médio e o baixo curso do rio. A área do município é de 111,45 km² e a população residente é de 21.944 habitantes, dos quais, aproximadamente, 80% estão domiciliados na área urbana (IBGE, 2010).

Pareci Novo é um município situado ao longo do curso do rio Caí, entre São Sebastião do Caí e Montenegro, cujo território abrange uma área de, aproximadamente, 57 km². Sua sede encontra-se nas coordenadas geográficas 29.63°S e 51.39°W, sua população é de 3.511 habitantes, dos quais 28% residem na área urbana (IBGE, 2010).

Em direção à jusante, o município de Montenegro localiza-se nas coordenadas 29°41 "S e 51°28 "W, já no baixo curso do rio Caí. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sua área é de 420km² e a população residente em 2010 era de 59.436 habitantes. Destes, cerca de 90% residem na área urbana do município. A Figura 1.1 apresenta a localização da área de interesse.

A Figura 1.2 apresenta a hidrografia da bacia do Caí. Os principais cursos d'água são: rio Caí, que é o principal rio da bacia; rio Cadeia; e os arroios Forromeco e Maratá. Próximo à foz do rio Caí, na confluência com o rio Jacuí, existem extensas áreas de banhados, numa região conhecida como Delta do Jacuí. O rio Caí possui três barragens, que integram o Sistema Salto, as quais regulam em certo grau o regime fluvial.



Engelplus
 Hidrografia da Bacia Hidrográfica do rio Cai
 Figura Nº: 1.2

O Sistema Salto é constituído de 3 barragens no trecho superior da bacia do Caí, cuja função única é a regularização das vazões para a geração de energia na bacia do Rio dos Sinos, através de uma transposição de vazões para o Rio Paranhana. São elas: a Barragem do Salto, inaugurada em 1952, a Barragem do Blang, inaugurada em 1957, e a Barragem Divisa, inaugurada em 1960. As duas primeiras encontram-se no Rio Santa Cruz, principal afluente do Caí, e a última encontra-se no Arroio da Divisa, que deságua na Barragem do Blang.

O rio Caí possui comprimento aproximado de 208,5km, enquanto a distância entre seus pontos extremos é de 89,1km, o que confere ao rio um considerável índice de sinuosidade: 2,34. Esta sinuosidade é facilmente percebida quando se observa o rio Caí em uma imagem de satélite, como a Figura 1.3.

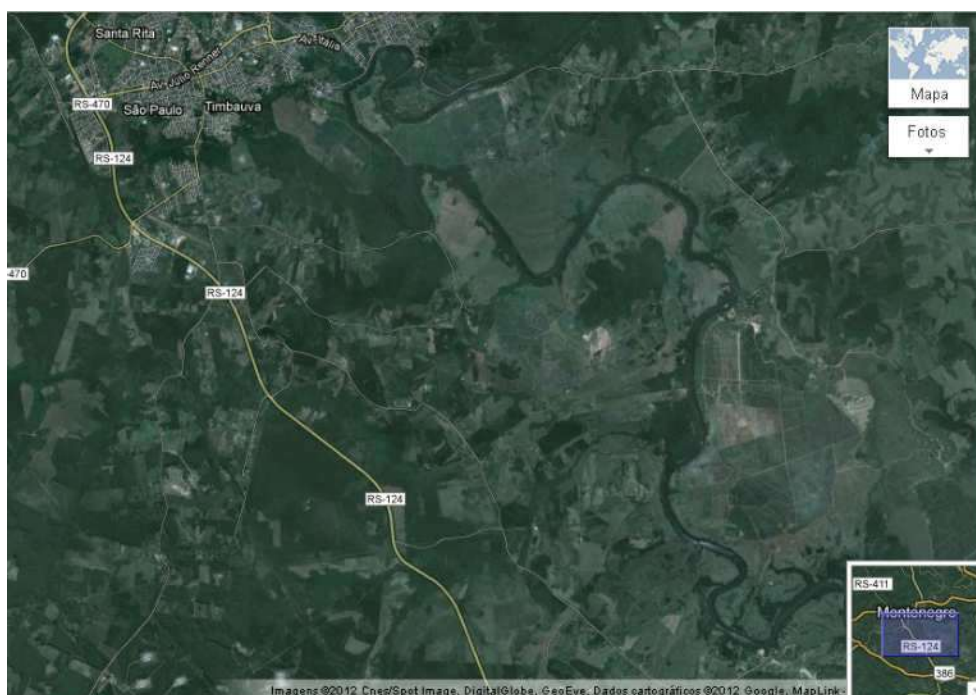
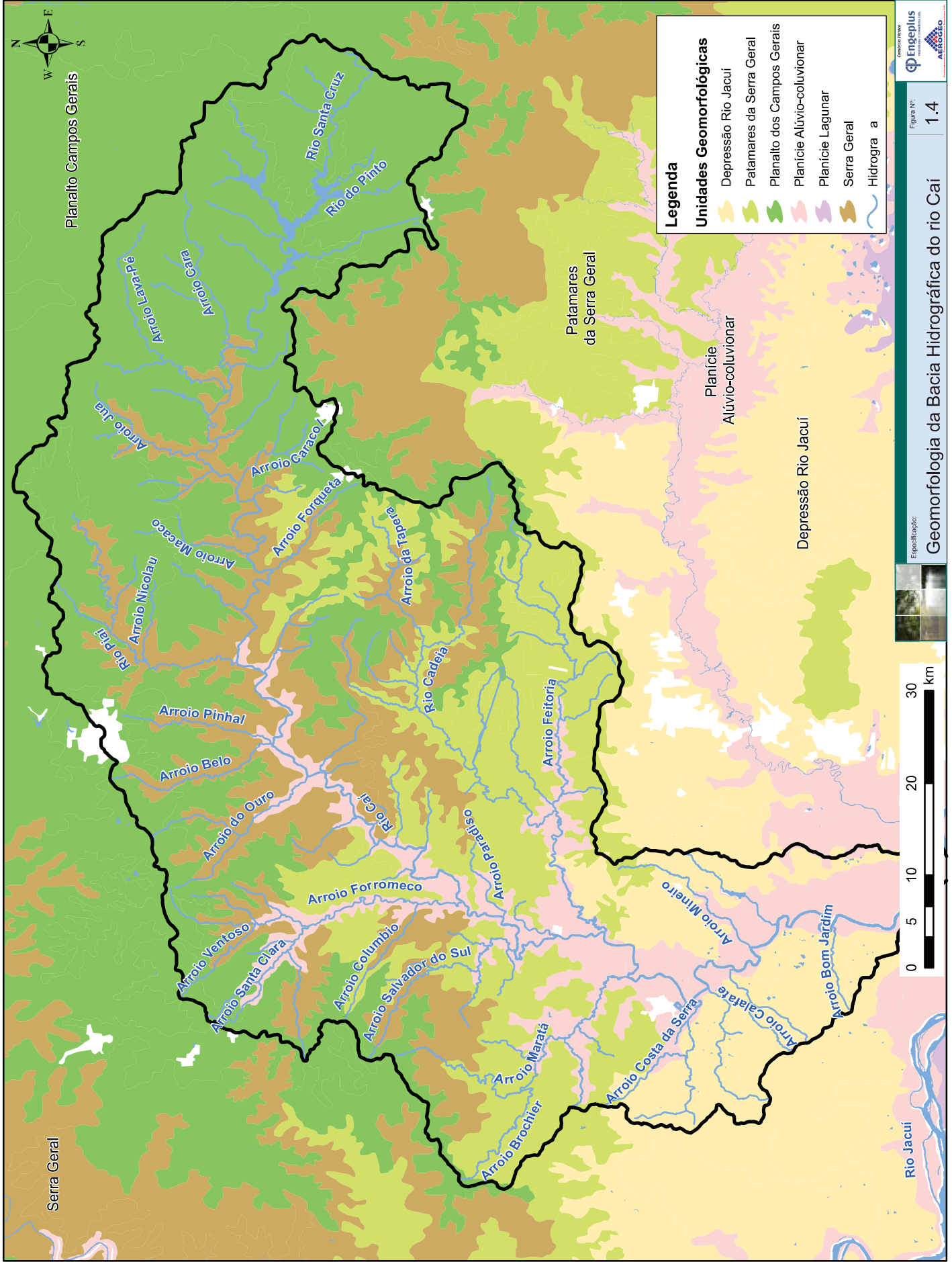


Figura 1.3: Trecho sinuoso do Rio Caí próximo a Montenegro (Fonte: Google Maps, 2012)

A densidade de drenagem na bacia é de 1,1 km por km², indicando que a bacia é mal drenada devido à elevada permeabilidade do solo. A bacia hidrográfica do rio Caí apresenta uma elevada amplitude altimétrica, sendo que a altitude média é de 457m e a máxima é de 1.027m registrada no Planalto da bacia do Paraná. As áreas mais elevadas estão localizadas na porção nordeste da bacia, enquanto as mais baixas estão a sudoeste, indicando também a direção preferencial dos rios.

A área da bacia também possui declividades elevadas nas escarpas do planalto. Uma das sub-bacias com maior declividade é a do arroio Forromeco, com aproximadamente 23,2%, o que garante maior velocidade ao escoamento da água durante as chuvas. De maneira genérica, os vales da bacia hidrográfica do rio Caí possuem de médio à forte entalhamento, em especial no curso médio do rio Caí e nos afluentes que deságuam nesse trecho do rio.

Em relação ao relevo da bacia, de acordo com a classificação proposta por Ross (1985; 2006), a bacia hidrográfica do rio Caí localiza-se em duas grandes unidades geomorfológicas: Planalto e Chapadas da bacia do Paraná; e Depressão Central (Depressão Periférica sul-rio-grandense). Esta última trata-se de uma área onde prevalecem relevos esculpidos sobre rochas areníticas. As áreas mais baixas da bacia, as várzeas dos principais cursos d' água, estão inseridas nesse compartimento. A litologia predominante no trecho em estudo é composta por arenitos finos, e os principais tipos de solo são os argissolos, planossolos e luvisolos. A Figura 1.4 apresenta o mapa geomorfológico.



A região da bacia localizada na Depressão Central possui temperatura média anual de 19,4°C. Apenas de novembro a março a temperatura média mensal ultrapassa os 20°C. A precipitação média anual oscila entre 1.300 e 1.800mm, de acordo com os microclimas locais. A porção da bacia caracterizada por altitudes mais elevadas possui temperaturas mais amenas e maior volume de chuva. A temperatura média anual é de 16°C, sendo que apenas dois meses registram temperatura média superior a 20°C. Nestas áreas, a precipitação média anual varia entre 1.800 e 2.500mm.

De acordo com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia, o período compreendido entre junho e setembro corresponde aos meses com a maior precipitação do ano nas proximidades da bacia hidrográfica do rio Caí. A média de precipitação nesses meses oscila entre 120 e 140 mm. Os meses menos chuvosos são abril e maio, com média em torno de 90 mm (INMET, 2009).

1.4 Forma de Apresentação dos Relatórios

Tendo em vista o caráter multidisciplinar do estudo e as várias etapas de conteúdo técnico específico que o mesmo está dividido, a apresentação dos resultados foi programada através de relatórios editados com denominação e codificação representativas de seu conteúdo, a saber:

- R's: Relatórios Técnicos que abordam a elaboração de assuntos específicos;
- RF: Relatório Final, contendo o resumo técnico dos estudos realizados e o melhor cenário de intervenção para a minimização do problema das cheias no baixo rio Caí.

Assim, os resultados do trabalho foram consolidados nos relatórios relacionados no quadro a seguir.

Quadro 1.1: Relatórios a Serem Apresentados

Codificação	Conteúdo/Título	Data de Entrega*
R1	Plano Geral de Trabalho	24/10/2013
R2	Cobertura Aérea e Topobatimetria	28/11/2013
R3	Apoio Terrestre e Aerotriangulação Digital	27/01/2014
R4	Produtos Finais da Aerofotogrametria e Topobatimetria	24/03/2014
R5	Estudos Hidrológicos	24/03/2014
R6	Simulações Hidrológicas e Mapas de Inundações	10/06/2014
R7	Estudos de Alternativas de Intervenção	14/07/2014
R8	Estudo de Viabilidade e Hierarquização das Alternativas	03/09/2014
R9	Consultas Públicas	24/09/2014
RF	Estudos e Soluções Recomendadas para o Problema de Cheias no Baixo Rio Caí	24/09/2014

*Data da Emissão Inicial.

Através desses relatórios foram disponibilizadas todas as informações técnicas, socioeconômicas, ambientais e os planejamentos efetuados para o trecho do baixo rio Caí.

1.5 Planejamento do Trabalho

O desenvolvimento dos trabalhos teve por base o Cronograma Físico (Figura 1.5) o qual relaciona os prazos parciais e totais que foram estipulados para a realização dos estudos, conforme as etapas de execução. O Cronograma Físico foi atualizado em junho de 2014, com vistas a demonstrar a realidade do andamento dos estudos, incorporando um aditamento de prazo de 90 dias.

As atividades e produtos foram elaborados ao longo de 13 (treze) meses, gerando produtos intermediários que correspondem aos resultados alcançados nos blocos metodológicos previstos.

Ao longo dos meses, procurou-se otimizar os resultados de uma atividade em relação à(s) outra(s) dependente(s), distribuindo-as de maneira a cumprir os prazos. Como procedimento de trabalho, foram estabelecidas reuniões semanais com a Fiscalização, de forma a possibilitar o acompanhamento sistemático dos estudos e resultados.

O Fluxograma Geral de Trabalho (Figura 1.6) demonstra, de forma esquemática, as inter-relações e a sequência lógica das atividades técnicas que foram desenvolvidas no Estudo de Alternativas para Minimização do Efeito das Cheias do Baixo Caí.

1.6 Equipe Técnica

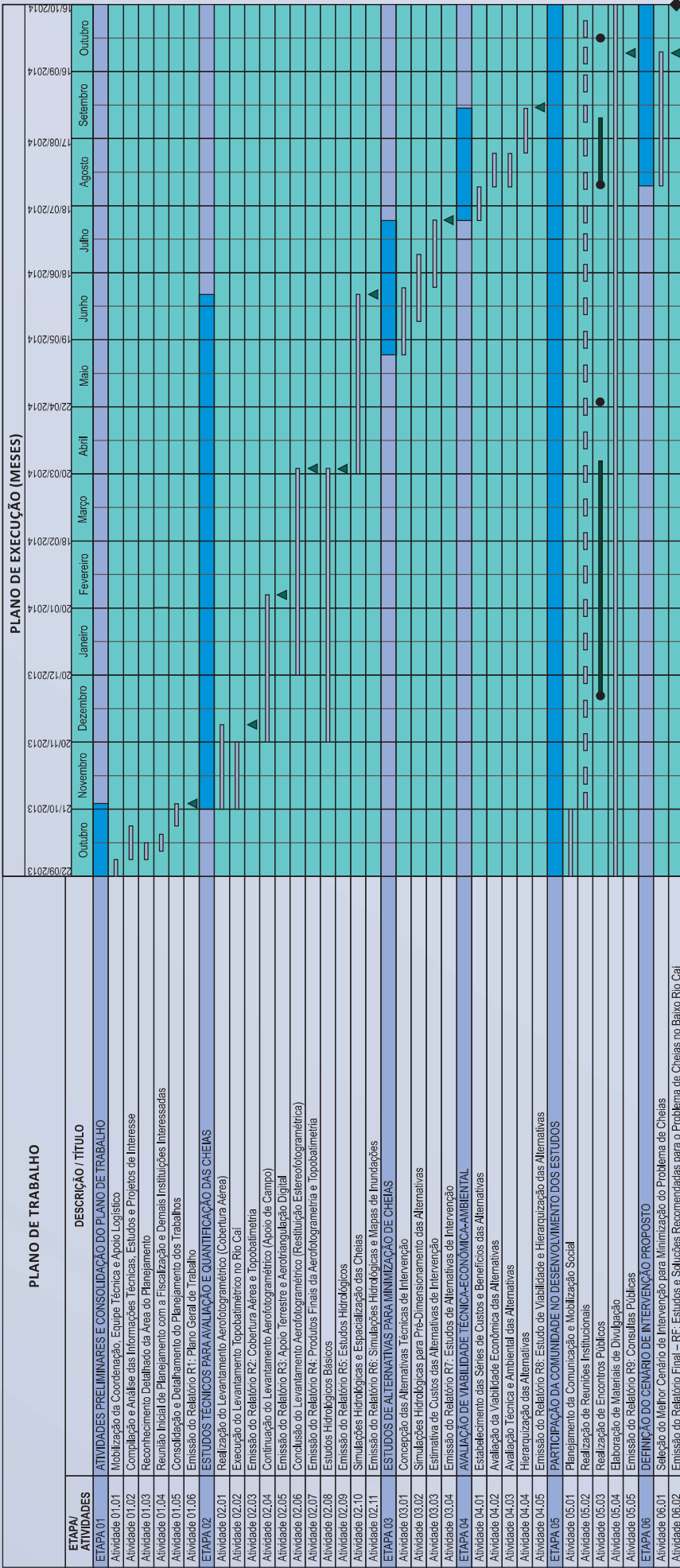
A equipe técnica principal que foi utilizada para o desenvolvimento dos serviços está apresentada neste item, onde encontra-se a relação da equipe e suas atribuições.

Os membros da equipe técnica, profissionais experientes nas especialidades requeridas para a execução dos serviços, estão nominados no Quadro 1.2. O mesmo quadro indica a função e a formação acadêmica de cada um dos integrantes da equipe de nível superior que desenvolveu os trabalhos.

Quadro 1.2: Relação da Equipe Técnica

Profissional	Formação	Função
Jairo F. Barth	Eng. Civil	Coordenador Geral
Josiane Gomes	Eng. Agrícola	Esp. em planejamento ambiental
Milton Dupont	Eng. Civil	Esp. em levantamento aerofotogramétrico
Franco Turco Buffon	Eng. Civil	Esp. em hidrologia
Silvana M. da Rosa	Eng. Agrônoma	Esp. em avaliação de uso e ocupação do solo
Luiz Carlos Campos	Eng. Civil	Esp. em estruturas hidráulicas
Fernando Fagundes	Eng. Civil	Esp. em gestão de recursos hídricos
Cristian Sanabria	Sociólogo	Esp. em Comunicação Social
Sidnei Gusmão Agra	Eng. Civil	Esp. em modelagem hidrológica e hidráulica
Henrique Kotzian	Eng. Civil	Esp. em hidrologia e hidráulica
Carolina Schreiner Heck	Eng. Ambiental	Planejamento ambiental

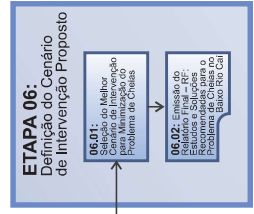
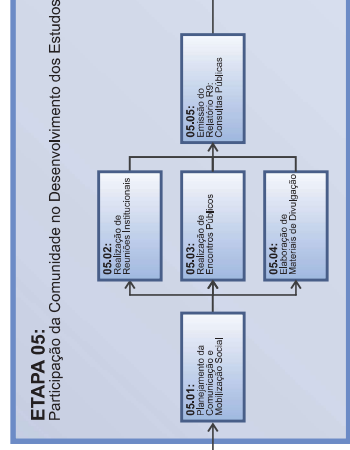
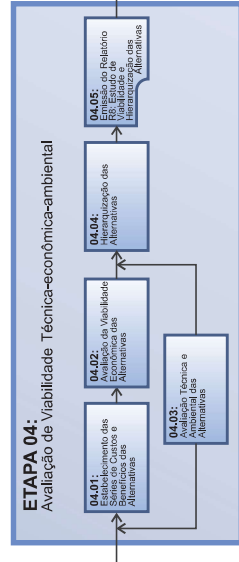
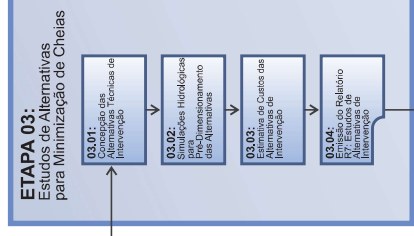
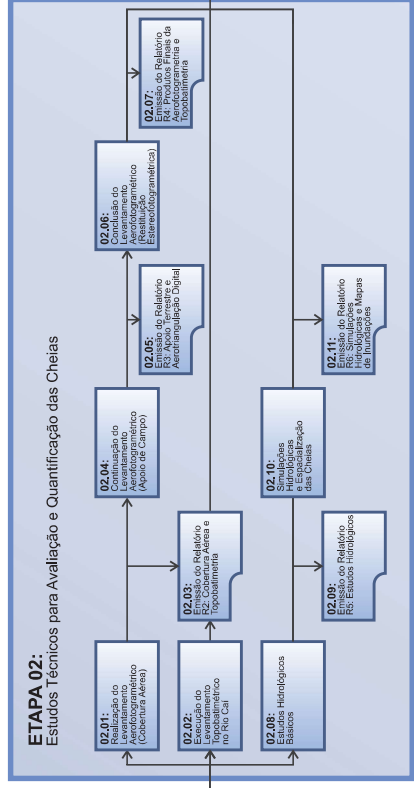
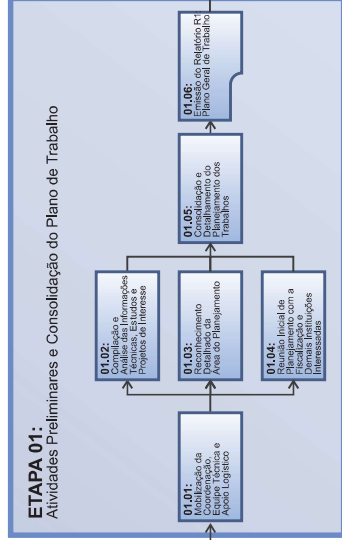
Cronograma Físico de Atividades Atualizado



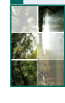
Dias	Relatório	Data
1	Início do Prazo Contratual	22/09/2013
33	R1 - Plano Geral de Trabalho	24/10/2013
68	R2 - Cobertura Aérea e Topometria	28/11/2013
128	R3 - Apoio Terrestre e Aerotriangulação Digital	27/01/2014
184	R4 - Produtos Finais da Aerofotogrametria e Topometria	24/03/2014
184	R5 - Estudos Hidrológicos	24/03/2014
262	R6 - Simulações Hidrológicas e Mapas de Inundações	10/06/2014
296	R7 - Estudos de Alternativas de Intervenção	14/07/2014
347	R8 - Estudo de Viabilidade e Hierarquização das Alternativas	03/09/2014
368	R9 - Consultas Públicas	24/09/2014
390	Encarte Informativo	16/10/2014

Legenda:

- Realizado
- Duração das Etapas
- Duração das Atividades Principais
- Reuniões/Encontros Públicos
- Consultas Públicas
- Emissão/Entrega de Produtos/Relatórios
- Emissão/Entrega do Encarte Informativo



Ordem de Serviço



1.7 Conteúdo do Relatório Final - RF

O presente relatório objetiva apresentar uma síntese dos trabalhos desenvolvidos e o melhor cenário de intervenção para a minimização do problema das cheias no baixo rio Caí, com vistas a atender o Termo de Referência do Estudo de Alternativas para a Minimização do Efeito das Cheias do Trecho Baixo do rio Caí.

O presente relatório, fora estas considerações iniciais, apresenta o seguinte conteúdo:

- **Serviços de Campo**, onde se apresenta os levantamentos aerofotogramétricos e topobatimétricos realizados para a área de interesse.
- **Estudos Hidrológicos**, os quais tiveram por objetivo a caracterização e a quantificação dos mecanismos de formação das cheias no trecho baixo do rio Caí.
- **Simulações Hidrológicas e Mapas de Inundações**, consiste na apresentação da série de simulações realizadas, buscando representar o comportamento das cheias no trecho em estudo.
- **Estudos de Alternativas de Intervenção**, consistiram na concepção, simulação hidrológica e pré-dimensionamento de alternativas estruturais e não estruturais com vistas à proteção contra cheias, bem como na estimativa dos seus custos de implantação.
- **Estudo de Viabilidade e Hierarquização das Alternativas**, onde foram avaliados diversos aspectos a fim de verificar a viabilidade financeira, técnica, ambiental e social das alternativas propostas e, assim, hierarquizá-las.
- **Mobilização Social**, consistiu de estratégias para envolver as comunidades da área do estudo.
- **Soluções Recomendadas para o Problema de Cheias no Baixo Rio Caí**, tendo por base os capítulos anteriores, apresentam-se recomendações e considerações finais a respeito do estudo.
- **Anexos**, onde estão apresentados os elementos que complementam o presente relatório.

Em termos de Atividades do Plano de Trabalho, este Relatório Final abrange a Etapa 06 – Definição do Cenário de Intervenção Proposto, integrada por:

- Atividade 06.01 – Seleção do Melhor Cenário de Intervenção para Minimização do Problema de Cheias
- Atividade 06.02 – Emissão do Relatório Final – RF: Estudos e Soluções Recomendadas para o Problema de Cheias no Baixo Rio Caí



2 SERVIÇOS DE CAMPO

2 SERVIÇOS DE CAMPO

Os serviços de campo desenvolvidos no âmbito do Estudo de Alternativas para Minimização do Efeito das Cheias do Trecho Baixo do Rio Caí compreenderam os levantamentos aerofotogramétricos e topobatimétricos, no trecho do rio de interesse para os estudos, conforme descrito em sequência.

2.1 Aerofotogrametria

Como subsídio inicial ao presente estudo, foi realizada restituição aerofotogramétrica ao longo do baixo trecho do rio Caí, abrangendo duas faixas com larguras distintas:

- Para os primeiros 40 km (em linha reta e partindo da foz), foi restituída faixa com largura de 500 m para cada lado do rio Caí; e
- Para os seguintes 40 km, foi restituída faixa com largura de 1.500 m para cada lado do rio Caí.

Assim, o trecho em questão localiza-se da foz do rio Caí à, aproximadamente, rodovia RS-122. Importante destacar que no primeiro segmento (de jusante), a faixa restituída mostrou-se insuficiente para atingir as cotas de interesse, conforme configuradas nos estudos hidrológicos e na modelagem hidrodinâmica realizados. Essa situação consistiu em uma restrição técnica à referida modelagem.

A aerofotogrametria iniciou no planejamento da cobertura aerofotogramétrica e culminou na edição final das Ortofotos. A Figura 2.1 apresenta o esquema seguido no desenvolvimento destas atividades.

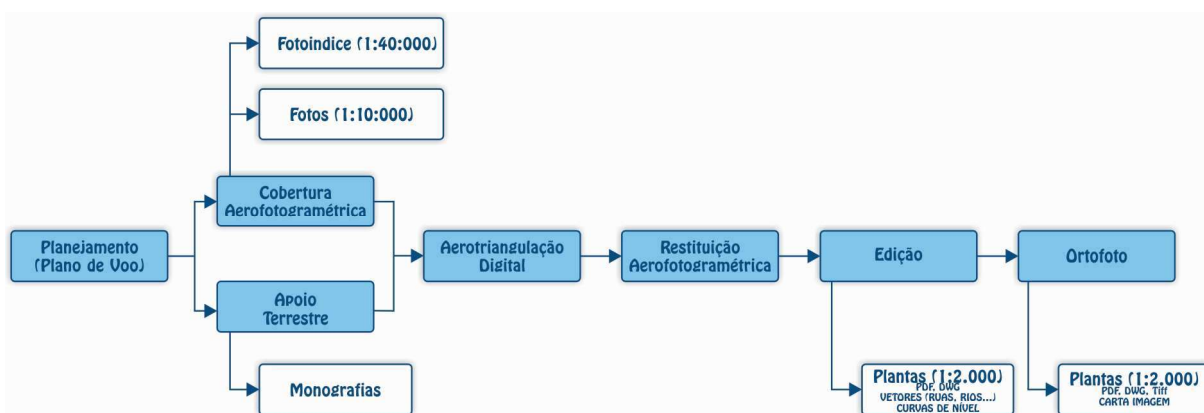
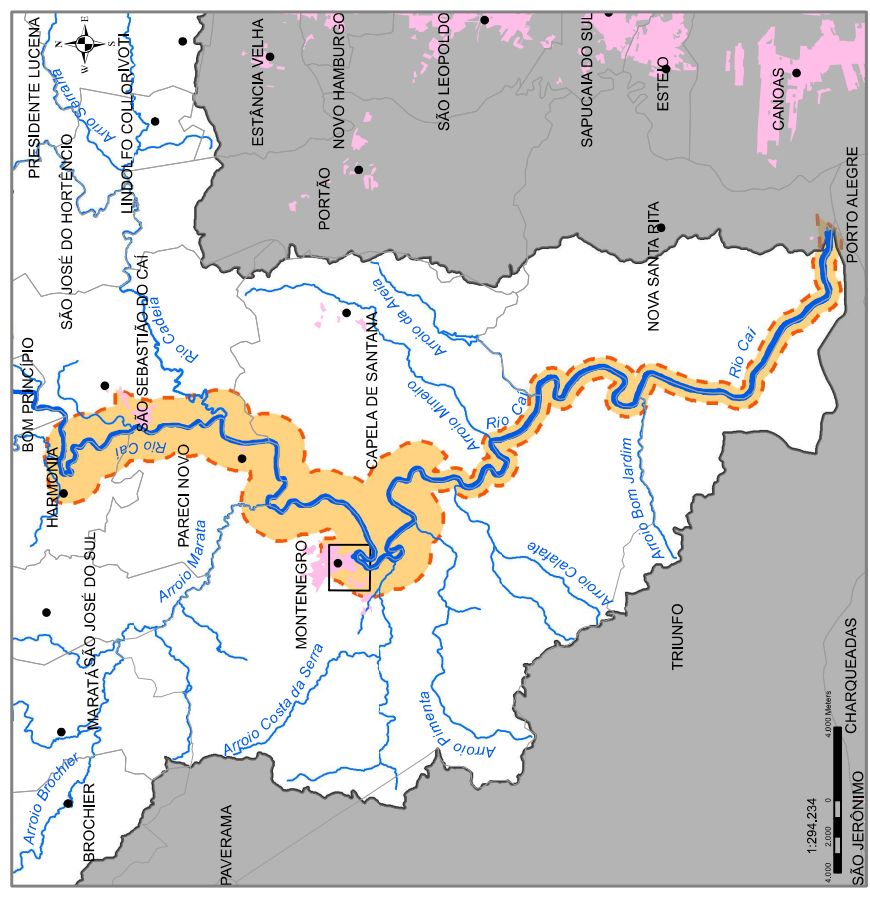
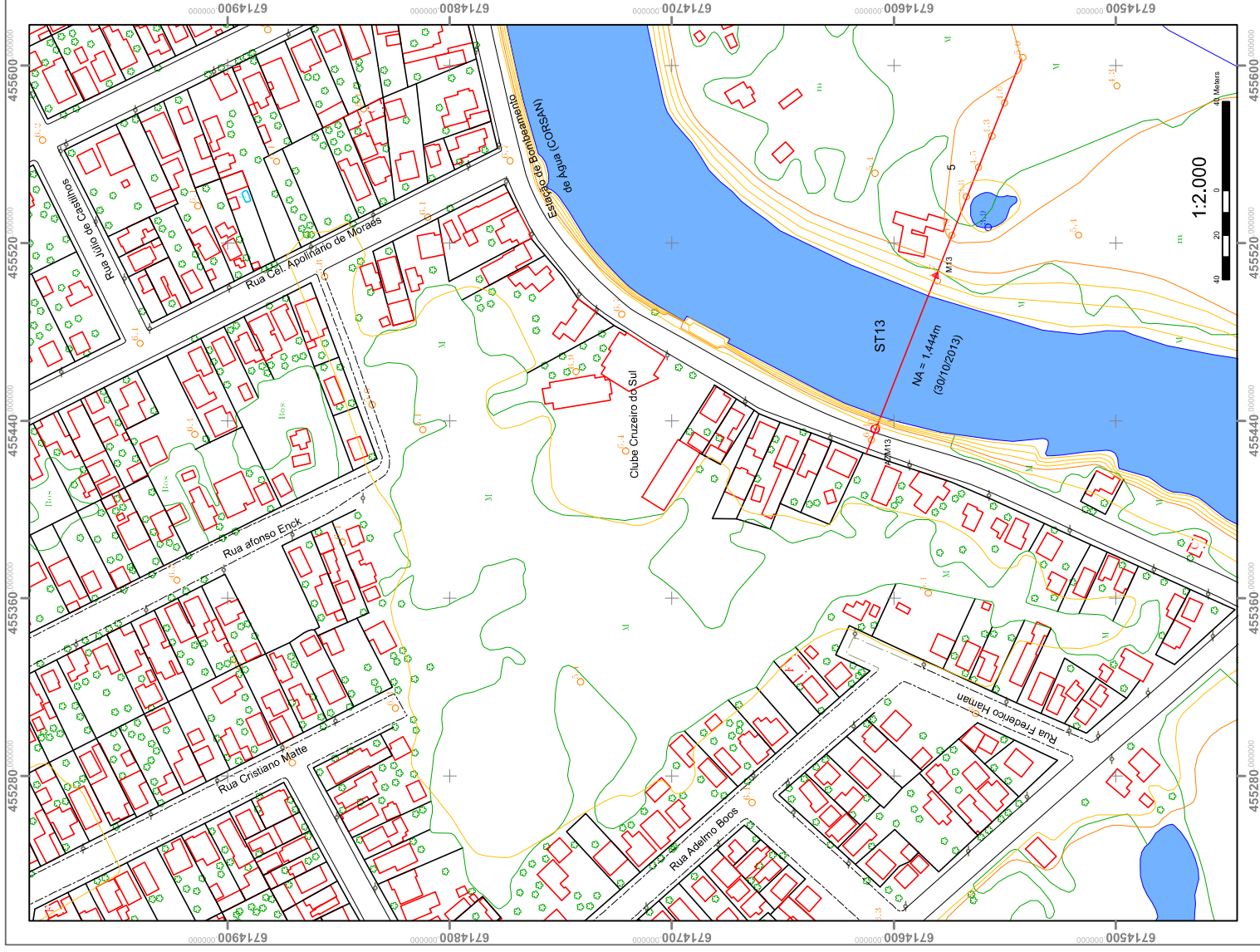









Figura 2.1: Etapas da Aerofotogrametria

A Figura 2.2 apresenta a área objeto dos serviços topobatimétricos e de restituição aerofotogramétrica, indicando a cobertura aérea.

Em sequência, na Figura 2.3 e na Figura 2.4 apresentam-se exemplos dos produtos gerados a partir dos levantamentos realizados.



Legenda

-  Limites Municipais
-  Sede Municipal
-  Área de Visualização em Montenegro
-  Mancha Urbana
-  Cursos d'água
-  Limite da bacia do rio Cai
-  Área Restituída



2.2 Topobatimetria

O levantamento topobatimétrico da calha do rio foi realizado no mesmo trecho que os levantamentos aerofotogramétricos, conforme descrito no item anterior. Para tanto, foram levantadas 28 seções transversais, definidas conforme as necessidades do modelo hidrodinâmico utilizado.

As 28 seções topobatimétricas ao longo do trecho em estudo do rio Caí foram selecionadas nos locais de maior interesse para o estudo. As atividades relacionadas ao levantamento topobatimétrico foram realizadas conforme o esquema apresentado na Figura 2.5.

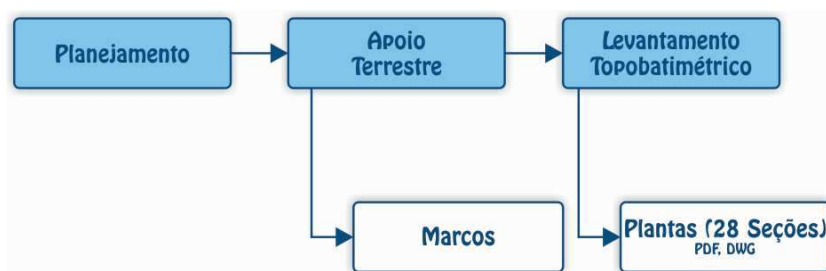
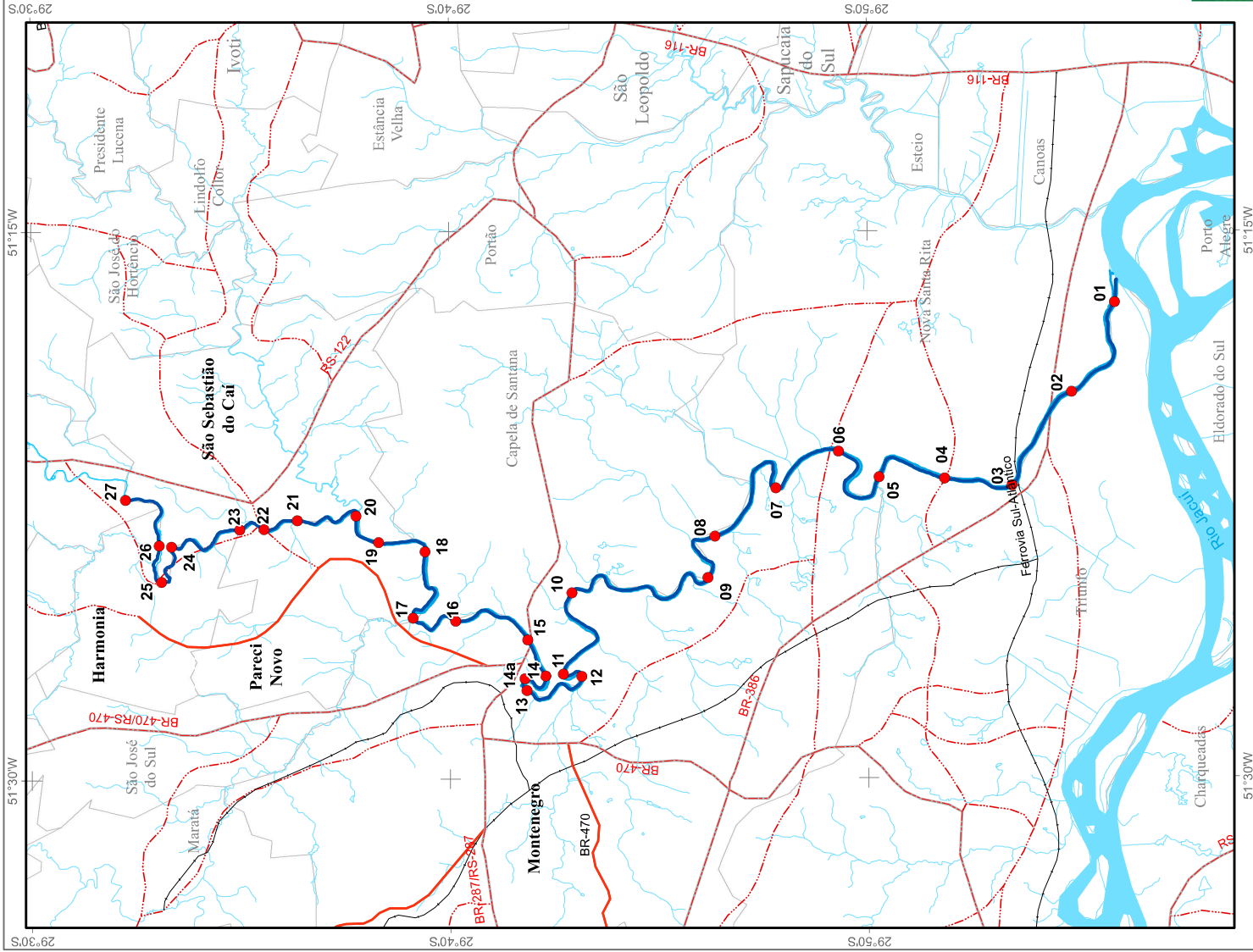


Figura 2.5: Etapas da Topobatimetria

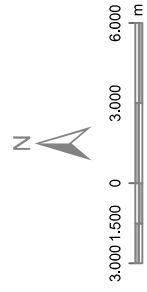
Na Figura 2.6 é apresentada a localização das seções topobatimétricas.

Esses dois produtos topo-cartográficos foram integrados de forma a possibilitar a configuração do terreno (modelo numérico do terreno) considerado na modelagem hidrodinâmica realizada neste trabalho.

A restituição aerofotogramétrica, na escala 1:2.000 e com curvas de nível a cada metro, foi a base cartográfica para o presente estudo de alternativas de intervenções. Cumpre salientar que essa base cartográfica apresenta precisão adequada ao presente estudo, no que se refere às informações altimétricas para simulação dos níveis de cheias, demarcações das cotas inundadas para diversas recorrências, bem como para a quantificação das áreas afetadas pelas cheias. Ademais de fornecer as imprescindíveis informações planialtimétricas e cadastrais para o presente planejamento das obras de minimização dos impactos das cheias do rio Caí.



- Legenda**
- Seção Topobatimétrica
 - Trecho de Estudo
 - Hidrografia
 - Rodovia Pavimentada
 - Rodovia Não Pavimentada
 - Ferrovia
 - Estrada Secundária
 - Limite Municipal





3 ESTUDOS HIDROLÓGICOS

3 ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Este capítulo visa apresentar uma compilação dos Estudos Hidrológicos desenvolvidos no Relatório Técnico R5. Tais estudos hidrológicos objetivam a caracterização e a quantificação dos mecanismos de formação das cheias no trecho baixo do rio Caí.

Inicialmente é apresentado uma caracterização do problema das cheias, partindo-se dos estudos anteriormente desenvolvidos, principalmente no trabalho “dos alemães”, da década de 70, e no Plano de Bacia, e em diversos artigos e projetos que tinham como objeto de estudo a região de interesse deste projeto.

Na sequência são analisados os dados de precipitações e vazões disponíveis para a bacia. São analisados valores médios e extremos máximos, e suas distribuições espacial e temporal. São apresentados, ainda, avaliações das correlações entre as informações do baixo Caí, com dados do Lago Guaíba e do trecho alto do Caí, buscando compreender quais as variáveis que mais afetam o processo de cheias no trecho baixo do Caí.

Finalmente são apresentadas as condicionantes para a etapa de simulação hidráulica: um diagrama esquemático ajuda a compreender o que será simulado, e são indicados os valores a serem considerados para as vazões de montante, os níveis de jusante, as vazões de afluentes ao trecho e de contribuição lateral, e os valores de controle para calibração do modelo.

Todas estas etapas metodológicas resultaram num efetivo conhecimento deste processo de cheias, conforme poderá ser visto a seguir, embasando as decisões sobre quais soluções podem ser implantadas para a minimização deste problema.

3.1 Caracterização do Problema das Cheias no Trecho Baixo do Rio Caí

O rio Caí, notadamente em seu baixo trecho, localizado a jusante da cidade de Bom Princípio, objeto do presente estudo, tem se caracterizado como uma região extremamente suscetível à ocorrência de enchentes. Com efeito, desde o início do século passado, e mesmo antes, tem sido relatadas enchentes, com impactos sociais e econômico-financeiros significativos principalmente nas cidades de São Sebastião do Caí e Montenegro.

Apenas a título ilustrativo, há relatos de uma grande enchente ocorrida no século XIX, em 1878, em São Sebastião do Caí, na qual o rio teria atingido cerca de 15 metros acima do seu nível normal. Outro relato histórico, informa que no ano de 1920 a referida cidade foi atingido por uma enchente considerável; que embora sem registros sobre o nível do rio nessa ocasião, pode-se visualizar seus efeitos na imagem abaixo (Figura 3.1). Novamente em 1932 outro evento crítico atingiu a cidade e o rio Caí alcançou 13,80 metros.

Mais recentemente, após o início do monitoramento oficial dos níveis de água em diversos pontos do rio Caí, a partir da década de 40 do século passado, foram registrados diversos eventos relacionados a enchentes nesse trecho (baixo), com impactos diretos nas cidades de São Sebastião do Caí e Montenegro, mas também atingindo as cidades de Harmonia e Pareci Novo.

Analisando os registros históricos dos níveis de água, seja nas estações fluviométricas próximas às cidades de São Sebastião do Caí e Montenegro, sejam em relatos e registros extra-



Figura 3.1: Enchente em São Sebastião do Caí (1920)¹

¹ Fonte: http://www2.ufpel.edu.br/iffisp/ppgs/eics/dvd/documentos/gts_IIIeics/gt19/gt19janeice.pdf

oficiais, observam-se eventos críticos com elevados níveis de água nos seguintes anos: 1928, 1941, 1944, 1954, 1956, 1959, 1963, 1965, 1967, 1982, 1984, 1985, 1987, 1988, 1997, 2000, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013. Ou seja, 25 anos com eventos críticos em um intervalo de 86 anos, uma média de um ano crítico a cada 3,4 anos. Mas se considerarmos apenas as ocorrências a partir de 1941, essa recorrência reduz para 3 anos. Se considerarmos que em diversos anos ocorrem mais de uma enchente (como, por exemplo, 2007 e 2009, com cinco ocorrências), essa recorrência tende a diminuir.

Ainda com base nos citados registros, observa-se que nos últimos 14 anos (desde 2000 até a presente data), ocorreram 10 eventos críticos, resultando em uma média de um evento para cada 1,4 ano, mostrando assim uma intensificação na ocorrência de enchentes.

Obviamente, essa modificação na frequência de ocorrência de enchentes, pode ter origem em diversos fatores, que não aqueles estritamente hidrológicos: maior atenção aos eventos, maior visibilidade dos meios de comunicação sobre essa ocorrência, expansão das áreas urbanas ou ocupadas sobre as margens do rio Caí.

Paralelamente, também podem ser identificados fatores hidrológicos, tais como: alteração no padrão climático, aumento da impermeabilização nos solos da bacia hidrográfica, elevação dos níveis de jusante agravando a influência do remanso, entre outros.

Quanto à gênese das enchentes na bacia hidrográfica do rio Caí, diversos estudos técnicos e acadêmicos foram elaborados, originados exatamente da gravidade da ocorrência desses eventos e de seus impactos sociais e econômicos. Dentre eles, pode-se citar:

- Modelo para previsão, espacialização e análise de áreas inundáveis na bacia hidrográfica do rio Caí. Guilherme Garcia de Oliveira. Dissertação de Mestrado – UFRGS/Sensoriamento Remoto, 2010.
- A gênese climática das enchentes na bacia hidrográfica do rio Caí. Cassio Arthur Wollmann. Trabalho de conclusão de curso de graduação – UFSM/Geografia, 2008.
- A frente polar atlântica e a gênese das enchentes ocorridas na bacia hidrográfica do rio Caí. Cassio Arthur Wollmann. Artigo Técnico – UFSM/Geografia, 2009.
- Sazonalidade dos episódios de enchentes na bacia do rio Caí. Cassio Arthur Wollmann. Artigo Técnico – UFSM/Geografia, 2010.
- Influência de variáveis morfométricas e da distribuição de chuvas na previsão de enchentes em São Sebastião do Caí. Garcia de Oliveira. Artigo Técnico – UFRGS/Sensoriamento Remoto, 2010.
- Sistemas atmosféricos envolvidos na gênese das enchentes ocorridas na bacia do rio Caí (1982-2005). Cassio Arthur Wollmann. Artigo Técnico – UFSM/Geografia.

Conforme os referidos estudos, a origem da ocorrência das enchentes no trecho baixo do rio Caí decorrem das condições pluviométricas e físicas da bacia hidrográfica. De acordo com WOLLMANN (2008), a geomorfologia, aliada ao fortalecimento dos sistemas frontais durante o inverno, exerce grande influência nos volumes de chuva, justificando o maior volume na escarpa do Planalto da bacia do Paraná. No entanto, como a orientação preferencial dos rios na região é NE-SW, a concentração das águas, resultantes do excedente pluviométrico, se dá nos vales e várzeas dos rios que deságuam na Depressão Central, como o rio Caí.

Essas ocorrências, aliadas à configuração física do vale do rio Caí (altas declividades longitudinais e transversais nas zonas de cabeceiras e baixas declividades longitudinais e transversais nas zonas mais baixas, associadas a planícies de inundação), acabam por originar a grande maioria dos eventos críticos.

No entanto, há uma parcela de eventos de enchentes não diretamente relacionados à ocorrência de precipitações intensas ou mesmo continuadas, o que chamou a atenção dos autores. Para esses eventos, a condição de jusante deve ter sido a origem das enchentes. Sabe-se que o nível de água na foz do rio Caí, junto ao Delta do Jacuí, exerce importante influência nos níveis de água na porção mais baixa do trecho em estudo, pelo efeito de remanso.

Os níveis no Delta do Jacuí, por sua vez, são determinados, basicamente, por dois fatores: escoamento no rio Jacuí e nível de água no Lago Guaíba. O primeiro determinado pelo regime pluviométrico na sua extensa bacia hidrográfica; e o segundo determinado também pela variação na direção e intensidade dos ventos e das marés.

Quando se analisam os dados disponíveis desde os anos 1980, conclui-se que as maiores inundações ocorreram nos anos de 1982, 2000 e 2007. As imagens a seguir (Figura 3.2 a Figura 3.7) mostram alguns eventos críticos para a cidade de São Sebastião do Caí.



Figura 3.2: Inundação de 1982 na cidade de São Sebastião do Caí.²



Figura 3.3: Inundação de 2000 na cidade de São Sebastião do Caí.³



Figura 3.4: Inundação de 2007 na cidade de São Sebastião do Caí.⁴



Figura 3.5: Enchente em São Sebastião do Caí, em julho de 2011.⁵



Figura 3.6: Inundação de 2012 na cidade de São Sebastião do Caí.⁶



Figura 3.7: Inundação de 2013 na cidade de São Sebastião do Caí.⁷

² Fonte: http://www.ufrgs.br/srm/ppgsr/publicacoes/Dissert_GuilhermeOliveira.pdf

³ Fonte: http://www.ufrgs.br/srm/ppgsr/publicacoes/Dissert_GuilhermeOliveira.pdf

⁴ Fonte: <http://cabanhaluzdosol.blogspot.com.br/2011/07/enchente-em-sao-sebastiao-do-cai-pode.html>

⁵ Fonte: <http://noticias.band.uol.com.br/cidades/noticia/?id=100000445447>

⁶ Fonte: <http://deolhonotempo.com.br/site/enchente-inunda-casas-em-sao-sebastiao-do-cai-rs/>

Vale destacar, por exemplo, que a área urbana de São Sebastião do Caí, somente em um intervalo de dois anos, entre setembro de 2007 e 2009, foi atingida cinco vezes por inundações, sendo que as três últimas ocorreram num intervalo de apenas 45 dias, entre agosto e setembro de 2009. Das cinco inundações, a maior delas ocorreu em setembro de 2007 quando o rio chegou a 14,63 metros. Em Montenegro, o pico da inundação de 2007 ocorreu no dia 25 de setembro. Aproximadamente 5.000 pessoas foram afetadas pelo evento.

Em 2009, em São Sebastião do Caí, o rio atingiu 14,10 metros. Tais eventos ocorreram praticamente fora do inverno, estação predominante da ocorrência de enchentes, o que mostra a forte variabilidade sazonal desses fenômenos.

Em 2011, nova inundação ocorreu no mês de julho, atingindo o município de São Sebastião do Caí. A medição da Defesa Civil indicou que o rio Caí ficou 14,80 metros acima de seu nível normal, superando a última grande enchente na cidade, que havia sido em 2000, quando o rio chegou aos 14,70 metros. Foram alagados diversos bairros, chegando a poucos metros da praça central da cidade. A inundação atingiu 10 mil pessoas, sendo que 120 ficaram desalojadas e 60 desabrigadas.

As figuras a seguir (Figura 3.8 a Figura 3.13) ilustram as enchentes verificadas na cidade de Montenegro em 1965, 2007, 2009, 2011 e 2012.



Figura 3.8: Montenegro - inundação em setembro de 1965⁸



Figura 3.9: Montenegro - inundação em setembro de 2007⁹



Figura 3.10: Inundação em Montenegro em julho de 2009¹⁰



Figura 3.11: Inundação em Montenegro em julho de 2011¹¹

⁷ Fonte: <http://www.fatonovo.com.br/imagens.php?id=61>

⁸ Fonte: http://historiasvalecai.blogspot.com.br/2013_01_01_archive.html

⁹ http://www.metsul.com/secoes/visualiza.php?cod_subsecao=29&cod_texto=919

¹⁰ Fonte: <http://historiasvalecai.blogspot.com.br/2013/03/1817-fotos-aereas-das-enchentes-em.html>

¹¹ http://metemont.blogspot.com.br/2011_07_01_archive.html



Figura 3.12: Vista da cidade de Montenegro às margens do Rio Caí - julho/2011¹²



Figura 3.13: Cais do Porto em Montenegro - Setembro/2012¹³

Embora seja dado destaque para as enchentes em Montenegro e São Sebastião do Caí, também a cidade de Pareci Novo, localizada às margens do rio Caí, sofre os danos causados pelas enchentes deste rio. Em 2011, em um intervalo de apenas quatro meses, a cidade foi atingida por três eventos críticos, tendo sido decretada situação de emergência, quando mais de cem famílias ficaram isoladas, devido às estradas e ruas alagadas, outras foram removidas para casas de familiares ou buscaram abrigos. A inundação chegou ao centro da cidade, como mostram a Figura 3.15 e Figura 3.16. J a a Figura 3.14 e a Figura 3.17 mostram os eventos de 2007 e 2013.



Figura 3.14: Enchente em Pareci Novo, em setembro de 2007¹⁴



Figura 3.15: Inundação no centro de Pareci Novo em julho de 2011¹⁵



Figura 3.16: Inundação no centro de Pareci Novo em julho de 2011¹⁶



Figura 3.17: Inundação em Pareci Novo em julho de 2013¹⁷

¹² Fonte: <http://historiasvalecai.blogspot.com.br/2013/03/1817-fotos-aereas-das-enchentes-em.html>

¹³ <http://ambientalian.blogspot.com.br/2012/09/rio-cai-enchente-setembro-de-2012.html>

¹⁴ http://www.metsul.com/secoes/visualiza.php?cod_subsecao=29&cod_texto=919

¹⁵ <http://www.imperial.fm.br/image/tid/512>

¹⁶ Fonte: <http://www.imperial.fm.br/node/11105>

¹⁷ Fonte: <http://www.valedocai.com.br/noticia/4829/pareci-vai-decretar-situacao-de-emergencia/>

Esta enchente, ocorrida em julho de 2011, também atingiu o município de Harmonia, que se localiza a montante de São Sebastião do Caí, e também está às margens do rio Caí. No evento, as partes mais baixas, em especial nas regiões de várzea, tiveram os maiores prejuízos, visto que os arroios da região subiram rapidamente e alagaram as áreas do entorno. A Figura 3.18 e a Figura 3.19 mostram enchentes nessa cidade nos anos de 1984 e 2013.



Figura 3.18: Inundação em Harmonia, em 1984¹⁸



Figura 3.19: Inundação em Harmonia, em 2013¹⁹

O Quadro 3.1 apresenta informações sobre as enchentes que atingiram os municípios de Montenegro, Pareci Novo e São Sebastião do Caí, entre 2003 e 2007. Os dados apresentados, apenas exemplificativamente, incluem o número de pessoas e as áreas atingidas nos municípios em cada um dos eventos, bem como os principais danos.

Quadro 3.1: Enchentes ocorridas nos municípios de interesse no período de 2003-2007. Fonte: PROFILL (2007)

Município	Data	Locais Atingidos	Pessoas Atingidas	Danos
Montenegro	09/07/2003	Bairros: Olaria, Ferroviário, Industrial, Tanac, Passo do Manduca, São Paulo, Santo Antônio, Santa Rita, Imigração, Cinco de Maio, Municipal, São João e parte da área central (elevação do nível das águas do rio Caí).	40	Foram danificadas 10 residências, resultando em 40 pessoas desalojadas
	20/09/2007	Bairros Olaria, Ferroviário, Industrial, Tanac, Passo do Manduca municipal, Centro e parte da área central.	5000	Prejuízo nas áreas residenciais e estabelecimentos comerciais, ocasionando perdas de grande proporção, bem como estragando bens patrimoniais, sistema viário e gêneros de primeira necessidade.
Pareci Novo	24/09/2007	Distrito Bananal, Porto Maratá, Matiel, e a sede do Município. No distrito de Matiel a situação é emergencial pois é divisa com Caí. Na área Central da cidade, o Bairro da Várzea e as ruas ribeirinhas ao Rio Caí estão inundadas.	255	62 Residências danificadas, 02 públicas, 08 particulares. O município ficou isolado, não havendo sistema de transporte para fora dos limites municipais.

¹⁸ <http://www.fatonovo.com.br/edicao-n%C2%B0-74,-de-12-de-janeiro-a-19-de-janeiro-de-1984-not-2453.php>

¹⁹ Fonte: <http://www.fatonovo.com.br/recuperacao-das-estradas-not-1393.php>

Município	Data	Locais Atingidos	Pessoas Atingidas	Danos
São Sebastião do Caí	20/02/2003	Bairros Quilombo, Navegantes, Vila Rica e Rio Branco	1022	100 pessoas desalojadas. 300 pessoas afetadas. Danificadas: 10 residências populares R\$ 1.200,00, 129 outras R\$ 7.740,00. 03 de ensino R\$ 360,00, 08 edificações comunitárias R\$ 1.200,00 Danos Ambientais: dano de intensidade média no desmatamento R\$ 4.500,00. Prejuízos econômicos: pecuária: 10 unidades R\$ 7.000,00. Outros 03 R\$ 10.000,00. Prejuízos Sociais: energia elétrica 2.000 m de rede de distribuição R\$ 3.000,00 e 300 consumidores sem energia R\$ 1.500,00. Alimentos básicos 02 estabelecimento R\$ 1.000,000.
	09/07/2003	Devido à elevação do nível de água do Rio Caí, acima de sua vazão normal, os bairros Quilombo, Navegantes, Vila Rica e Rio Branco entre outros, foram os mais afetados do município.	1159	Foram danificadas 138 residências e uma comunitária. Também foram afetados os serviços essenciais como: abastecimento de água, energia e o sistema de transporte.
	01/09/2005	Comunidades de ribeirinhas	150	Aproximadamente 51 famílias desalojadas. (51 residências de ribeirinha atingidas). 163 pessoas desabrigadas encaminhados aos abrigos provisórios da Assiste Social.
	24/09/2007	Bairros Quilombo, Navegantes, Vila Rica, Rio Branco, além da zona central da cidade.	3038	1200 Pessoas desalojadas. 1500 desabrigadas. 338 deslocadas, totalizando 280 Residências 04 públicas 03 comunitárias 120 particulares (Ind. e Com). Nas propriedades rurais, grande parte da produção de hortaliças foi perdida, além das áreas adubadas com plantio nas várzeas do Rio Caí, afetando as fontes de receita e sustento de inúmeras famílias.

A elevada ocorrência de enchentes no vale do rio Caí tem chamado a atenção do Estado para o problema e originou a realização de diversos e importantes estudos. O Quadro 3.2 apresenta a relação de fontes de informações acessadas e consultadas e o conteúdo das mesmas. Essas fontes de informações foram analisadas quanto aos seus conteúdos técnicos e aproveitamento como subsídio direto aos estudos, seja no que se refere à hidrologia, seja quanto à proposição de intervenções. O quadro também apresenta os resultados dessa análise crítica. Três fontes de informações se destacam em termos de aproveitamento como subsídio técnico:

- **Planejamento Hidrológico e Estudo de Desenvolvimento Regional da Bacia do Rio Caí. AGRAR-UND HYDROTECHNIK GMBH, (1970)**

Trata-se de um estudo antigo, mas bastante conhecido, visto constituir-se em um dos primeiros esforços para a análise regional no âmbito das bacias hidrográficas. Embora se trate de um estudo amplo, com vistas ao desenvolvimento regional, houve uma atenção especial para a questão das cheias, seus efeitos e sobre as possibilidades de implantação de ações estruturais e não-estruturais de proteção.

Quadro 3.2: Fonte, Identificação do Conteúdo e Análise Crítica de Aproveitamento das Informações Consultadas

Nº	Título	Instituição	Autoria	Natureza	Data	Conteúdo/Tipo de Informação	Análise Crítica (aproveitamento)	Aproveitamento
1	PLANEJAMENTO HIDROLÓGICO E ESTUDO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL DA BACIA DO RIO CAÍ	Agrar und Hydrotechnik GmbH	-	Relatório Técnico	1970/71	Hidrologia e proposição de estruturas de engenharia	Aproveitamento das obras de engenharia propostas	Obras/soluções
2	PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO CAÍ	PROFILL Eng. Amb. Ltda.	-	Relatório Técnico	2008	Simulação de eventos críticos e proposição de soluções	Aproveitamento da proposição de soluções	Hidrologia/soluções
3	CONSULTA PÚBLICA – QUESTIONÁRIOS	ENGEPLUS Eng. Cons. Ltda.	-	Contribuições sociais	2013/14	Proposições e sugestões de ações para minimização	Aproveitamento da proposição de soluções	Soluções
4	PROJETO DE PROTEÇÃO CONTRA INUNDAÇÕES DA CIDADE DE MONTENEGRO	DNOS	-	Relatório Técnico	1988	Proposições e sugestões de ações para minimização	Aproveitamento das obras de engenharia propostas	Obras/soluções
5	ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO CAÍ	CPRM	Márcia Petrollo e André Germano	Artigo Técnico	2011	Proposição de sistema de alerta hidrologico	Configuração, implantação e operação do sistema de alerta	Soluções
6	MODELO PARA PREVISÃO, ESPECIALIZAÇÃO E ANÁLISE DE ÁREAS INUNDÁVEIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAÍ	UFRGS/Sensoiamento Remoto	Guilherme Garcia de Oliveira	Dissertação de Mestrado	2010	Estudos hidrologicos, mapeamentos e modelos de previsão de cheias	Dados e estatísticas hidrologicas e mapeamento de cheias	Hidrologia
7	MEMÓRIAS E REPRESENTAÇÕES DO RIO CAÍ E DAS ENCHENTES EM SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	ULBRA	Janice Roberta Schroder	Artigo Técnico	2012	Resgate histórico e social das cheias no rio Caí	Referências históricas (qualitativas)	Registro histórico
8	HISTÓRIO DE PROPOSTAS DE SOLUÇÃO PARA AS CHEIAS NO RIO CAÍ	-	João Boos	Dossiê	2013	Resgate de soluções, opiniões gerais, críticas e sugestões	Relação de problemas da solução do estudo da AGRAR	Análise social da solução
9	MANIFESTO À DEFESA CIVIL - COMITÊ DE BACIA, IMPRENSA E AUTORIDADES MUNICIPAIS	-	Eduardo César Schroeder	Manifesto	2011	Descrição das cheias e análise das soluções (contra os diques)	Análise das soluções com críticas e sugestões	Análise social da solução
10	BANCO DE DADOS DA DEFESA CIVIL SOBRE EVENTOS NA BACIA DO RIO DOS SINOS (2003-2013)	Defesa Civil	-	Banco de Dados	2013	Dados sobre eventos, com populações atingidas	Indicação dos impactos (população atingida) por eventos	Registro de eventos
11	A GÊNESE CLIMÁTICA DAS ENCHENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAÍ	UFSM/Geografia	Cassio Arthur Wollmann	Trabalho de conclusão de graduação	2008	Análise das origens climáticas das enchentes e sua sazonalidade	Sazonalidade da ocorrência de enchentes no rio Caí - inverno	Sazonalidade
12	O ESTUDO DAS CHEIAS NAS DIFERENTES LINHAS DE PESQUISA DA GEOGRAFIA FÍSICA - UMA REVISÃO TEÓRICA	UFSM/Geografia	Cassio Arthur Wollmann	Artigo Técnico	2009	Conceituação de enchente na geografia física	Apenas conceitos e inserção na geografia física	Conceitos
13	A FRENTE POLAR ATLÂNTICA E A GÊNESE DAS ENCHENTES OCORRIDAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAÍ	UFSM/Geografia	Cassio Arthur Wollmann	Artigo Técnico	2009	Gênese das enchentes – climatologia	Enchentes mais prováveis no inverno - sistemas frontais estacionários	Sazonalidade
14	ESTUDO DE CASO - CONSTRUÇÃO DE DIQUE-ESTRADA EM SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	UFSM/Geografia	Cassio Arthur Wollmann	Artigo Técnico	2013	Análise de viabilidade (social e técnica) da construção do dique-estrada em SSC	Conclui pela aceitação do dique-estrada	Análise social da solução
15	PERCEPÇÃO DE IMPACTOS SOCIO-AMBIENTAIS - CONSTRUÇÃO DE DIQUE-ESTRADA EM SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	UFSM/Geografia	Cassio Arthur Wollmann	Artigo Técnico	2013	Análise de percepção social da construção do dique-estrada em SSC	Conclui pela aceitação social do dique-estrada	Análise social da solução
16	SAZONALIDADE DOS EPISÓDIOS DE ENCHENTES NA BACIA DO RIO CAÍ	Revista Brasileira de Climatologia	Cassio Arthur Wollmann	Artigo Técnico	2010	Análise da sazonalidade das enchentes	Sazonalidade da ocorrência de enchentes no rio Caí - inverno	Sazonalidade
17	PERCEPÇÃO DA POPULAÇÃO DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ COMO FORMA DE PREVISÃO DE ENCHENTES	Revista Brasileira de Climatologia	Cassio Arthur Wollmann	Artigo Técnico	2010	Percepção social e previsão de enchentes	Conclui que a população tem percepção para prever enchentes em SSC	Percepção social
18	INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS E DA DISTRIBUIÇÃO DE CHUVAS NA PREVISÃO DE ENCHENTES EM SSB	UFRGS/Sensoiamento Remoto	Guilherme Garcia de Oliveira	Artigo Técnico	2010	Estudo de previsão de cheias e fatores de influência	Índices de influência morfológicas nas cheias (para calibração)	Mapas para calibração
19	RECONSTITUIÇÃO DE VAZÕES NATURAIS DO RIO CAÍ - ATRAVÉS DE MODELAGEM HIDROLÓGICA	PROFILL - IPI/UFRGS	Bruno Collischonn	Artigo Técnico	2007	Modelagem hidrologica chuva-vazão para reconstrução de vazões naturais	Reconstrução de vazões apenas para a parte alta da bacia	Hidrologia
20	ESTRADA-DIQUE-PONTE SOBRE O RIO CAÍ E LIGAÇÃO RODOVIÁRIA INTERVALES	P. M. SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	P. M. SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	Dossiê	-	Proposição de construção de estrada-dique-ponte em São Sebastião do Caí	Sugestão de ação estrutural para São Sebastião do Caí	Soluções
21	MAPA DA CIDADE DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ COM ÁREAS ATINGIDAS NA ENCHENTE DE AGOSTO DE 2013	P. M. SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	P. M. SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	Mapa	2013	Mapa da zona central com áreas inundadas em agosto de 2013	Calibração do modelo hidrodinâmico, em SSC	Mapa de enchentes
22	AÇÃO EMERGENCIAL PARA RECONHECIMENTO DE ÁREAS DE ALTO E MUITO ALTO RISCO A ENCHENTES	CPRM	CPRM	Mapeamento sobre imagem de satélite	2012	Mapeamento em imagem Google de áreas de risco de inundação em SSC	Ilustrativo e informativo	Mapa de enchentes
23	SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ENVOLVIDOS NA GÊNESE DAS ENCHENTES OCORRIDAS NA BACIA DO RIO CAÍ (1982-2005)	UFSM/Geografia	Cassio Arthur Wollmann	Artigo Técnico	-	Análise da formação das cheias	Informativo	Conceitos
24	CHEIAS NO RIO CAÍ	Câmara de Vereadores de Montenegro	Presidente da Câmara	Relatório da Reunião	2013	Coletânea de estudos já analisados e relato de sessão	Abordagem de diques em Capela de Serão e Harmonia	Análise social da solução

Dentro do amplo arcabouço de informações técnicas geradas no âmbito deste estudo, possui interesse especial os aspectos relacionados especificamente à hidrologia das cheias na bacia do rio Caí (notadamente em seu trecho baixo), bem como, e principalmente, quanto à proposição de ações para a proteção contra cheias nesta bacia.

A análise desse estudo possibilitou a identificação de algumas informações de interesse relativas à hidrologia na bacia, com ênfase para os eventos fluviométricos críticos (cheias). Diversos dados, análises e resultados são apresentados, com destaque para os níveis das cheias (o tratamento principal foi dado por evento crítico), suas vazões e áreas de impacto. Entre as estações fluviométricas adotadas encontram-se as que atualmente operam, com destaque para Nova Palmira, Barca do Caí e Montenegro.

Já naquela época, sabia-se da influência do nível de água do Delta Jacuí (e, por decorrência do nível de água no próprio Lago Guaíba), no comportamento linimétrico e fluviométrico da estação de Montenegro.

Para as séries hidrológicas disponíveis à época do estudo, foram analisadas as recorrências das inundações em diversos trechos do rio Caí (vale lembrar que o presente estudo foca o trecho baixo, correspondente às zonas II, III e IV do estudo de 1971). Como conclusão, o estudo estabeleceu que já para o trecho de São Sebastião do Caí a recorrência de eventos de cheia é praticamente anual e mantém-se assim até a foz do rio Caí. Evidencia que em Montenegro (e deste ponto até a foz) as cheias decorrem do nível de água do rio Jacuí, podendo ocorrer várias vezes por ano, e inclusive não associadas a vazões elevadas no rio Caí, mas a níveis elevados no Jacuí.

No entanto, devido ao fato do estudo ter sido desenvolvido há bastante tempo (concluído em 1971), os dados hidrológicos apresentados e seus tratamentos e resultados técnicos encontram-se comprometidos pelas limitadas extensões das séries hidrológicas (se comparadas com a situação atual). Na melhor condição, a série histórica limita-se a 30 anos. Nessa condição, apenas alguns eventos críticos foram abrangidos pelas séries históricas, o que compromete, por exemplo, os tratamentos estatísticos quanto à determinação dos tempos de recorrência dos eventos de máximas vazões e níveis de água.

Inobstante essa limitação, foi aplicado um modelo matemático-hidrológico (com todas as restrições tecnológicas da época), que apresentou um ajuste satisfatório às situações de calibração e que concluiu que a adoção de diques (no caso em questão havia proposição de diversos diques para proteção de áreas rurais agricultáveis – o que não é o caso do presente estudo) causaria impacto significativo quanto à elevação dos níveis de água durante as cheias.

Por outro lado, as proposições de ações estruturais com vistas à proteção contra as cheias são consistentes, independentemente da restrição dos parâmetros hidrológicos adotados (séries limitadas). Isso decorre do fato de que, para alterações limitadas nos níveis de água nas cheias (para situação de projeto), não há comprometimento significativo das soluções indicadas. Ou seja, as proposições indicadas podem ser aproveitadas, fazendo-se as devidas correções e ajustes para as condições hidrológicas atuais (vazões e níveis de água para os eventos críticos).

Foi indicada a inviabilidade da construção de reservatórios a montante para a contenção das cheias e indicada a viabilidade da utilização de diques (polderes) nas zonas mais baixas, de São Sebastião do Caí para jusante.

A título de recomendações, por exemplo, para a cidade de São Sebastião do Caí, o estudo concluiu ser inviável a construção de um dique e propõe apenas um sistema de alerta de cheias (em outra parte do estudo é apresentada a solução de dique). Já para a cidade de Montenegro, o estudo indica a adoção de diques de proteção associados com um corta-rio para aumentar a descarga, embora haja nesse trecho forte remanso. Os diques (ou polderes) indicados devem atuar em conjunto com estações de esgotamento das águas internas. Como a recorrência de proteção dessas obras foi adotada como 20 anos (melhor

viabilidade financeira conforme o estudo), para recorrência superiores haverá transbordamento e conseqüente inundação das áreas protegidas, demandando a existência de extravasores e capacidade de bombeamento para o seu esgotamento. Em resumo, as proposições de soluções de proteção contra cheias, identificam as seguintes ações estruturais:

Para São Sebastião do Caí – adoção de dique de proteção (embora no texto das recomendações esteja indicado apenas a adoção de sistema de alerta de cheias).

Para Montenegro – duas alternativas, ambas com diques de proteção e corta-rio, mas com áreas de abrangência distintas.

Assim, foi nesse estudo que teve origem a solução para Montenegro com “canal extravasor”. Este “corte” causaria a redução do comprimento do rio entre o km 56 e km 49,1 de 6.900 m para 1.000 m. Além do canal, o projeto incluía a construção de diques, através dos quais uma extensa área para cultivo passaria a estar permanentemente protegida, o denominado polder Montenegro. Por fim, o projeto previa um sistema de bombeamento para drenar o polder, bem como a transferência do cais do porto de Montenegro.

O estudo salienta diversas vezes que a função do corte no meandro é simplesmente afastar a calha do rio Caí da cidade de Montenegro, permitindo assim que seja construído um dique que não interfira na área urbana. A proteção efetiva seria feita pelo dique.

O referido estudo afirma que o meandro, muitas vezes, é considerado como sendo a causa principal para as inundações na cidade de Montenegro. O corte no meandro, conforme a modelagem então aplicada, ocasionaria uma redução dos níveis máximos na área urbana de cerca de 50 a 70 cm para cheias com tempo de retorno menor ou igual a 5 anos. No caso de ocorrerem cheias com tempo de retorno maior que 5 anos a diminuição do nível seria de apenas alguns centímetros, porque nestas cheias os níveis já são tais, que o meandro perde a sua ação.

- **Projeto de Proteção Contra Inundações na Cidade de Montenegro. Departamento Nacional de Obras de Saneamento (1988).**

O projeto do canal extravasor foi retomado 18 anos depois, em estudo desenvolvido pelo DNOS. A concepção geral do projeto anterior foi mantida (diques – canal de desvio – estação de bombeamento). Este trabalho se deteve no detalhamento extensivo dos aspectos geotécnicos da obra, como por exemplo as características do material a ser utilizado nos diques. O projeto hidráulico foi bem mais sucinto, e muitos aspectos de projeto não foram adequadamente analisados.

Assim como o projeto desenvolvido na década de 70, o projeto do DNOS também afirma que a função do canal não é a de reduzir os níveis de cheia. O estudo alerta que a função básica do canal é evitar que os diques a serem executados acompanhem a atual margem do rio passando ao longo da zona urbana, o que causaria dificuldades espaciais e desfiguraria o aspecto da cidade.

- **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Caí. SEMA/PROFILL (2007).**

O estudo em questão trata-se de um plano de bacia bastante abrangente (incluindo diagnóstico, prognóstico, enquadramento de cursos de água e proposição de ações). No âmbito dessa última atividade de proposição de ações, foi elaborado um estudo específico quanto às cheias e seus impactos, principalmente na porção baixa da bacia do rio Caí. Para tanto, além de uma revisão do estudo da Agrar und Hydrotechnik GmbH (1971), bem como de estudo complementar do DNOS, foi realizada modelagem hidrodinâmica para o trecho do rio Caí compreendido entre Montenegro e a foz do rio Caí. Essa modelagem teve por objetivo específico avaliar a solução de “corta-rio” indicada pelo estudo de 1971, combinando-a com a adoção de diques de proteção.

Para a modelagem e simulação de situações, foi utilizado o modelo HEC-RAS (U.S. Corps of Engineers, 2006), um modelo hidrodinâmico unidimensional com uma interface gráfica para visualização de resultados. Como dado de entrada, foi utilizada geometria do leito do rio Caí representada através das medições de seção transversal, da foz até o Passo Montenegro, num total de 26 seções, obtidas de um estudo do DEPRC e interpoladas de forma que houvesse uma seção a cada 200 m.

Como condição de contorno de montante, foi utilizada a série de cotas observadas no posto fluviométrico de Passo Montenegro. As cotas foram referenciadas a um nível absoluto pelo nível do zero da régua, situado a -0,39 m, conforme o estudo de 1971.

Para condição de contorno de jusante foi utilizada a série de cotas diárias no posto Praça da Harmonia, situada no rio Guaíba. Estas cotas foram obtidas junto ao banco de dados *Hidroweb* da ANA e em parte junto ao SPH. Considerou-se, por simplificação, que a cota no Guaíba corresponde aproximadamente à cota do rio Jacuí na altura da foz do Caí. O zero da régua deste posto se encontra a -0,24 m de altitude, conforme informação da SPH.

Para calibração do modelo, foi tomada uma vazão de 580 m³/s, correspondente aproximadamente à cota 650 em Passo Montenegro. As características do canal extravasor foram obtidas do estudo da Agrar e foram introduzidas no esquema de simulação:

- O canal tem 1.000 m de comprimento;
- Largura na superfície igual a 70 m;
- Inclinação dos taludes 1:2; e
- A cota de fundo é - 2 m e a cota de superfície é de 7 m.

O intervalo de tempo de simulação adotado foi de 12h. Para as cotas da condição de jusante, só foram obtidos dados médios diários, de forma que se atribuiu a cota média aos dois intervalos de cada dia.

“Segundo Agrar–und Hydrotechnik GMBH (1970), há extravasamento na seção de Passo Montenegro a partir da 7,25 m de altitude, correspondente à cota 764 na régua. Foi feita uma análise estatística da série para determinar qual o tempo de recorrência desta cota, e conseqüentemente conhecer a frequência de extravasamento do rio neste ponto, resultando um tempo de 3,57 anos para a cota 764.

Embora a seção de Passo Montenegro situe-se quase 4 km a montante da área urbana, pode se considerar que o extravasamento é praticamente simultâneo nas duas seções, de forma que se pode esperar uma cheia a cada 3,5 anos em Montenegro, em média.

O modelo foi então simulado entrando-se com esta cota como condição de contorno de montante no km 56,8. Como condição de contorno de jusante, foi imposto o nível de 0,99 m no km 0, correspondente a uma cota média de cheia no Jacuí. A partir desta simulação, foi determinada a vazão de extravasamento do Caí em Montenegro, estimada em 777,3 m³/s.

O mesmo procedimento foi realizado para as cotas de 5, 10, 20 e 50 anos de tempo de recorrência em Passo Montenegro. Para cada cenário, foi avaliado o nível da cheia no km 53, correspondente à seção do rio junto à Montenegro. Os resultados são sintetizados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3: Vazões e cotas características para diversos tempos de recorrência no km 56,8 (Passo Montenegro) e km 53 (Montenegro). Fonte: SEMA/Profill (2009)

Cota na Régua km 56,8 (cm)	Tempo de Recorrência	Nível Absoluto km 56,8 (m)	Vazão (m ³ /s)	Nível Absoluto km 53 (m)
764	3,57 anos*	7,25	777,3	6,91
783	5 anos	7,44	812,2	7,10
813	10 anos	7,74	868,1	7,39
834	20 anos	7,95	907,8	7,60
856	50 anos	8,17	949,9	7,81

* Correspondente ao extravasamento da calha

Não há dados que informem a partir de que cota há prejuízos na zona urbana de Montenegro. Neste estudo, se considera que passa a haver prejuízos a partir do nível de 6,91m. Para cada uma das vazões, o modelo foi simulado, desta vez com o canal extravasor, e se verificou qual foi a redução da cota no km 53 (Quadro 3.4).

Quadro 3.4: Níveis em Montenegro sem e com canal extravasor e redução para vários tempos de recorrência. Fonte: SEMA/Profill (2009)

Tempo de Recorrência	Vazão (m ³ /s)	Nível sem Canal (m)	Nível com Canal (m)	Redução (m)
3,57 anos*	777,3	6,91	6,37	0,54
5 anos	812,2	7,10	6,55	0,55
10 anos	868,1	7,39	6,82	0,57
20 anos	907,8	7,60	7,01	0,59
50 anos	949,9	7,81	7,21	0,60

Observa-se que o canal extravasor efetivamente reduz o nível d'água para todas as faixas de vazão, alterando a conclusão original dos estudos anteriores. A redução, no entanto, é insuficiente para cheias com mais de 15 anos com tempo de retorno, quando há extravasamento mesmo com canal.

Pode-se considerar, portanto, que o canal extravasor tem um benefício de reduzir a frequência de inundações menores. A frequência de extravasamento diminuiria de uma vez a cada 3,5 anos para uma vez a cada 15 anos, aproximadamente. Esta redução, embora significativa, não resolve o problema, pois para eventos de maior recorrência a cidade de Montenegro continuará sendo inundada.

Para ilustrar o efeito do canal extravasor, foram simuladas algumas cheias conhecidas. A cheia de outubro de 2000 foi a maior cheia dos últimos 15 anos, com uma cota máxima de tempo de retorno estimado em 14,1 anos. Nesse caso, a cota máxima do evento seria reduzida em 57 cm, de 7,52 m para 6,95 m. Ainda assim, ocorreriam prejuízos na zona urbana de Montenegro.

Um ponto que não foi devidamente estudado está relacionado à forma de ligação do canal extravasor ao traçado original do rio. Este ponto é importante, pois determina se o canal passa a ser o novo leito do rio ou se permanece seco, sendo usado apenas em eventos de cheia. O projeto original, proposto por Agrar- und Hydrotechnik GMBH (1970), previa um dispositivo de entrada e saída, dotado de comportas, que regula a passagem de água para o meandro, incluindo uma regra de operação que previa a liberação da passagem de água pelo meandro em períodos de estiagem, para evitar a putrefação das águas. Daí se depreende que o projeto original efetivamente previa o corte do meandro do rio Caí e um novo traçado para o rio, com todas as consequências ambientais que essa medida possa vir a ter. Ainda é necessário destacar que a CORSAN tem sua captação de água para o abastecimento público de Montenegro nesse trecho do rio Caí.

O presente estudo indica que o canal extravasor é uma solução apenas parcial para as enchentes no município de Montenegro. Embora diminua em algumas dezenas de centímetros o nível d'água para cheias características e reduza a frequência de extravasamento do rio Caí, a cidade de Montenegro continuará inundando para enchentes com recorrências maiores.

Já o projeto de proteção contra cheias, que inclui o canal extravasor e um sistema de diques ao longo de Montenegro, aparentemente é uma solução tecnicamente melhor, pois evitaria danos mesmo no caso de uma cheia da magnitude da ocorrida em maio de 1941. No entanto, os custos de implantação desta variante são bastante altos, podendo chegar a R\$ 45 milhões (não computadas despesas de desapropriação e licenciamento), valor que provavelmente seria mais bem gasto na remoção de população mais carente das áreas inundáveis e transformação destas em áreas de lazer ou de proteção ambiental (valor referido a 2009).

Por fim, o estudo concluiu que o projeto do canal extravasor, seja qual for a concepção considerada, deve ter impactos significativos na morfologia fluvial, qualidade de água e nos ecossistemas do rio Caí.

O estudo indicou, ainda, que devem ser consideradas medidas não-estruturais para a mitigação dos impactos das enchentes do rio Caí em Montenegro. O zoneamento de cheias é uma delas. A previsão antecipada de cheias também é uma alternativa não-estrutural a ser implementada

O estudo e a respectiva simulação concluiu que o canal extravasor ou corta-rio é uma solução parcial, reduzindo a nível de água em Montenegro, na ordem de 50 a 60 cm e aumentando a recorrência de cheias de 3,5 para 15 anos. A adoção de dique de proteção poderia aumentar a recorrência das cheias na cidade para 100 anos. A solução então estudada representa proteção apenas para a cidade de Montenegro.

3.2 Análise de Dados Pluviométricos

Os dados de chuva, e também de vazão, foram obtidos e constituem as séries históricas, sobre as quais foram aplicados os modelos estatísticos adequados, para a caracterização das cheias no Baixo Caí. A seguir são apresentados os resultados desta compilação de dados (neste item para pluviometria e no próximo para fluviometria). Além da simples coleta e compilação dos dados, apresenta-se a localização espacial dos pontos de amostragem e seu contexto na bacia.

Os dados obtidos foram analisados de modo a se caracterizar o padrão regional de precipitações médias e máximas, assim como suas principais estatísticas e distribuição temporal. Finalmente, foram elaboradas as curvas IDF (Intensidade x Duração x Frequência) para as estações da bacia.

A análise de precipitações médias partiu da avaliação dos postos pluviométricos com disponibilidade de dados para a bacia do rio Caí. Foram analisados os postos pluviométricos do Sistema Nacional de Informações Hidrológicas (Hidroweb) e selecionados aqueles operados pela ANA / CPRM e pela CEEE devido ao fato destes apresentarem uma série de monitoramento mais longa.

Para cada estação foi verificado o período com informações disponíveis, de modo a identificar um período longo e homogêneo de dados. Este procedimento possibilitou identificar 13 estações pluviométricas da ANA, operadas pela CPRM, com disponibilidade de dados, já consistidos, entre 01/01/1944 e 31/12/2006.

Para complementar esta rede, foram selecionadas outras 3 estações pluviométricas, da CEEE, localizadas na parte alta da bacia do rio Caí, onde há maior carência de estações da ANA/CPRM. Estas três estações apresentam dados entre 01/01/1948 e 31/12/1978.

Assim, foram selecionadas estações que pudessem ser utilizadas, de modo a atender aos objetivos deste trabalho. O Quadro 3.5 e a Figura 3.20 a seguir apresentam as características e a localização, respectivamente, das estações pluviométricas selecionadas como referência para a distribuição espacial das precipitações médias.

Quadro 3.5: Postos Pluviométricos Selecionados

Código	Nome	Município	Responsável/ Operador	Latitude	Longitude	Altitude (m)
2850009	PASSO TAINHAS	SÃO FRANCISCO DE PAULA	ANA / CPRM	-28,8675	-50,4561	640
2851003	ANTÔNIO PRADO	ANTÔNIO PRADO	ANA / CPRM	-28,8533	-51,2844	630
2851021	PASSO DO PRATA	VERANÓPOLIS	ANA / CPRM	-28,8775	-51,4483	400
2950010	CAPÃO DOS COXOS	SÃO FRANCISCO DE PAULA	CEEE	-29,4	-50,5833	920
2950016	GLORINHA	GRAVATAÍ	ANA / CPRM	-29,8828	-50,7889	77



Código	Nome	Município	Responsável/ Operador	Latitude	Longitude	Altitude (m)
2950026	RENANIA	GRAMADO	CEEE	-29,2500	-50,5400	660
2950038	TERRA DE AREIA	TERRA DE AREIA	ANA / CPRM	-29,5911	-50,0336	40
2950041	VÁRZEA SÃO JOÃO	SÃO FRANCISCO DE PAULA	CEEE	-29,3167	-50,4167	950
2951010	ENCANTADO	ENCANTADO	ANA / CPRM	-29,2378	-51,8594	60
2951022	NOVA PALMIRA	CAXIAS DO SUL	ANA / CPRM	-29,335	-51,1903	80
2951024	PORTO GARIBALDI	MONTENEGRO	ANA / CPRM	-29,8117	-51,3869	15
2951027	SÃO VENDELINO	SÃO VALÉRIO DO SUL	ANA / CPRM	-29,3664	-51,3711	140
2951028	SAPUCAIA DO SUL	SAPUCAIA DO SUL	ANA / CPRM	-29,82	-51,1611	20
2951067	CHARQUEADAS	CHARQUEADAS	ANA / CPRM	-29,9514	-51,6283	21
3050008	LOMBAS	VIAMÃO	ANA / CPRM	-30,0467	-50,7019	0
3051005	GUAÍBA COUNTRY CLUB	GUAÍBA	ANA / CPRM	-30,0889	-51,6236	40

A partir das séries de precipitação total mensal, obteve-se a precipitação média anual de cada estação apresentadas no Quadro 3.6. A partir das precipitações médias anuais, procedeu-se a distribuição espacial das precipitações. Os resultados podem ser observados na Figura 3.21. Percebe-se que os maiores totais pluviométricos são verificados na vertente norte da bacia, na região de Caxias do Sul e São Vendelino, indicando que esta região promove forte influência no processo de formação das cheias no trecho baixo do rio Cai.

Quadro 3.6: Precipitações médias anuais

Código	Nome	Precipitação média anual (mm)
2850009	PASSO TAINHAS	1539,6
2851003	ANTÔNIO PRADO	1728,6
2851021	PASSO DO PRATA	1594,6
2950010	CAPÃO DO COXO	1644,3
2950016	GLORINHA	1394,7
2950026	RENANIA	1821,4
2950038	TERRA DE AREIA	1756,1
2950041	VÁRZEA SÃO JOÃO	1456,5
2951010	ENCANTADO	1377,4
2951022	NOVA PALMIRA	1569,3
2951024	PORTO GARIBALDI	1474,9
2951027	SÃO VENDELINO	1713,1
2951028	SAPUCAIA DO SUL	1481,8
2951067	CHARQUEADAS	1472,6
3050008	LOMBAS	1372,8
3051005	GUAÍBA COUNTRY CLUB	1267,8

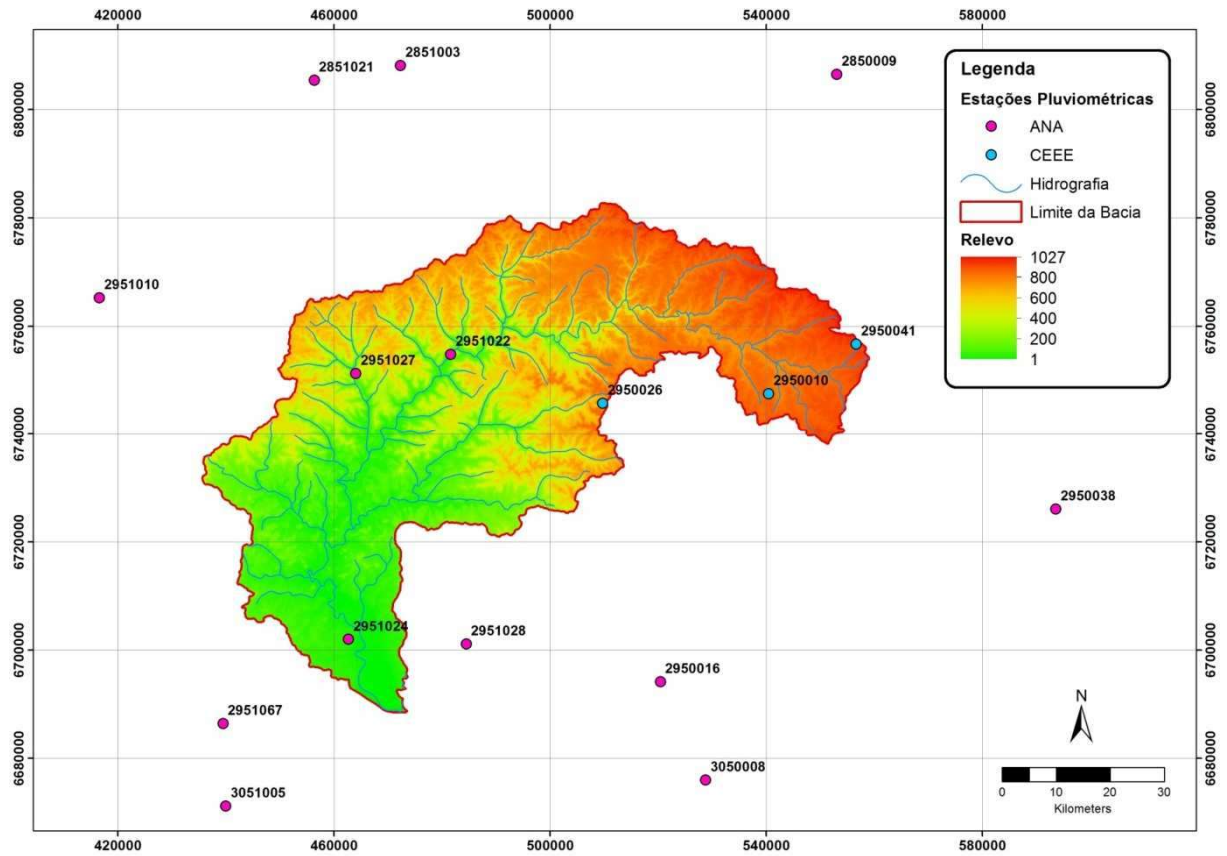


Figura 3.20: Postos Pluviométricos selecionados para análise espacial das precipitações

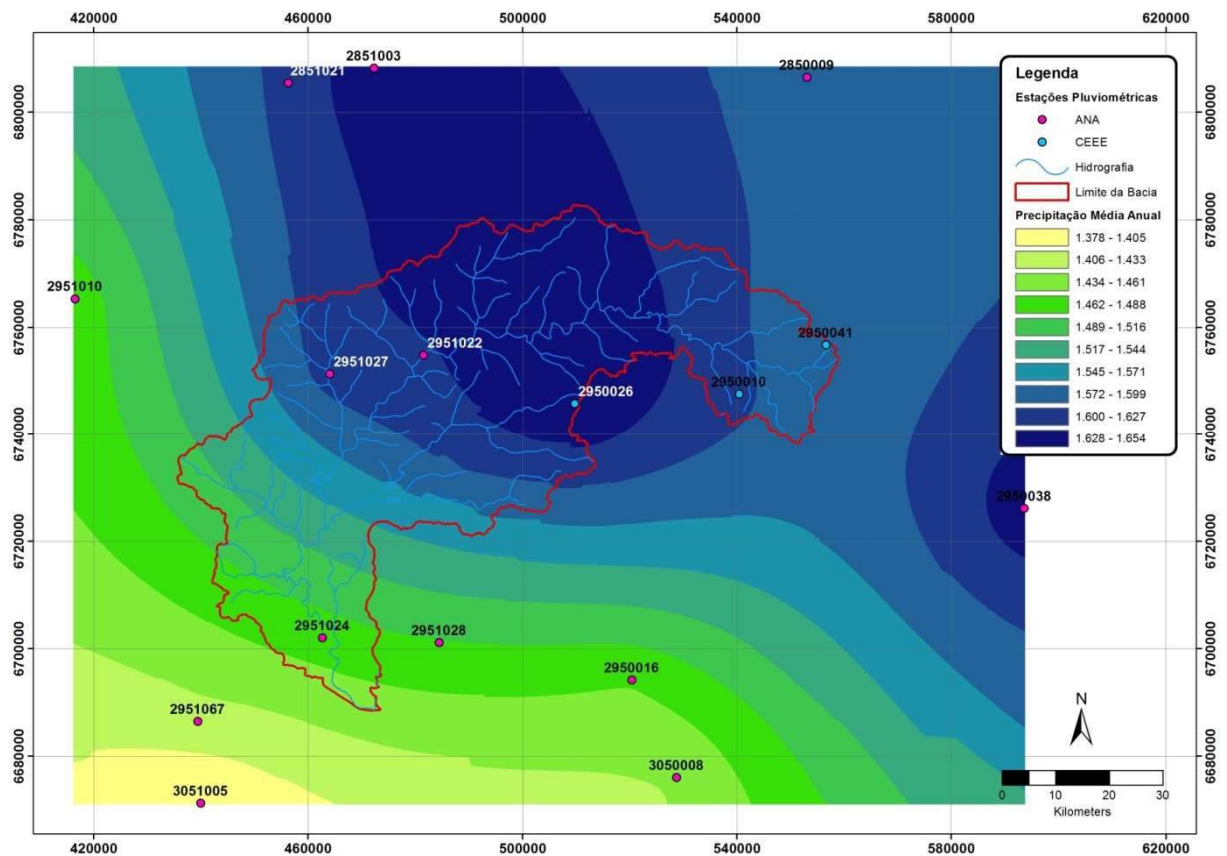


Figura 3.21: Distribuição Espacial das Precipitações Médias Anuais

Para a análise intra-anual foram selecionados os quatro postos pluviométricos mais próximos da área de interesse para o projeto, a saber: Nova Palmira (2951022), São Vendelino (2951027) e Porto Garibaldi (2951024), operados pela ANA/CPRM, e Renania (2950026), operado pela CEEE, de modo a acrescentar informações sobre a bacia do rio Cadeia, afluente ao trecho baixo do rio Caí, que deságua próximo a São Sebastião do Caí.

Para estes postos pluviométricos são apresentados os totais mensais de cada estação (Quadro 3.7), indicando que as precipitações são bem distribuídas.

Quadro 3.7: Distribuição intra-anual das Precipitações Médias (mm)

POSTO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Nova Palmira 2951022	147	140,1	113,7	111,3	103,6	146,9
São Vendelino 2951027	143,9	144,6	118,2	122,9	127,6	160,1
Porto Garibaldi 2951024	120,5	108,7	98,8	113,3	102,7	140
Renania 2950026	192,7	186,3	160,1	120,6	103,6	156
POSTO	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Nova Palmira 2951022	134,7	135,4	145,2	145,3	112,3	129,1
São Vendelino 2951027	160,2	141,2	148,4	161,3	141,9	142,8
Porto Garibaldi 2951024	155,1	132,8	135,4	130,2	121,7	113
Renania 2950026	141,4	156,6	183,6	166,7	112,6	165,4

Ainda assim é possível identificar que o trimestre entre março e maio é o menos chuvoso, e o trimestre entre junho e agosto o mais chuvoso, podendo estender este período característico até o mês de setembro. Isoladamente, também podem ser observados elevados índices pluviométricos em janeiro e fevereiro.

Para a análise interanual foram analisados os hietogramas de precipitações médias anuais, identificando-se, no passado recente (40 anos) os seguintes episódios de maiores precipitações médias anuais: 1972, 1983, 1984, 1987, 1994 e 2002. Para o Posto Nova Palmira, com série mais longa (iniciando na década de 40), também verificam-se anos de precipitações médias anuais elevadas em 1961 e 1966.

Para a análise de Precipitações Máximas, a partir dos dados de monitoramento, foi identificada a média das máximas precipitações anuais registradas nas estações selecionadas, conforme apresentado no Quadro 3.8, e especializadas na Figura 3.22. Percebe-se que as maiores precipitações na bacia do rio Caí ocorrem na vertente norte da bacia, como já havia sido verificado com as precipitações médias anuais, principalmente na região de Caxias do Sul e São Vendelino.

Quadro 3.8: Média das precipitações máximas anuais

Código	Nome	Precipitação (mm)
2850009	PASSO TAINHAS	76,20
2851003	ANTÔNIO PRADO	94,00
2851021	PASSO DO PRATA	80,40
2950010	CAPÃO DOS COXOS	75,00
2950016	GLORINHA	75,50
2950026	RENANIA	86,90
2950038	TERRA DE AREIA	91,10

Código	Nome	Precipitação (mm)
2950041	VÁRZEA SÃO JOÃO	63,60
2951010	ENCANTADO	76,00
2951022	NOVA PALMIRA	85,60
2951024	PORTO GARIBALDI	86,80
2951027	SÃO VENDELINO	94,00
2951028	SAPUCAIA DO SUL	82,60
2951067	CHARQUEADAS	80,70
3050008	LOMBAS	80,00
3051005	GUAÍBA COUNTRY CLUB	72,40

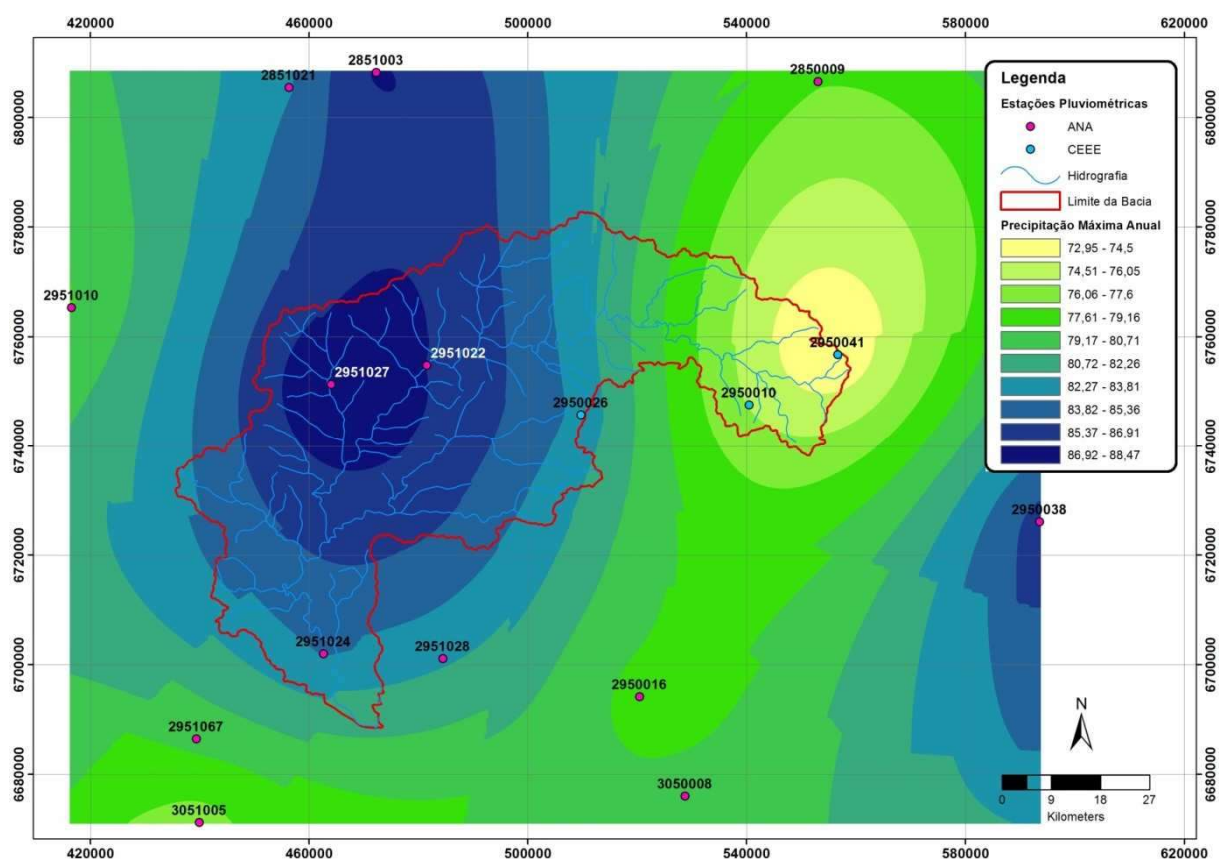


Figura 3.22: Distribuição Espacial das Precipitações Máximas

Para a análise das máximas diárias foram selecionadas as quatro estações pluviométricas localizadas próximas à área de estudo, já mencionadas anteriormente, a saber: Nova Palmira (2951022), Porto Garibaldi (2951024), São Vendelino (2951027) e Renania (2950026).

Os ajustes estatísticos de precipitações máximas de 1 dia ($P_{max.1dia}$) foram realizados utilizando-se a distribuição estatística de valores extremos de Gumbell. Os resultados do ajuste podem ser visualizados no Quadro 3.9 para todas as estações pluviométricas utilizadas na análise de distribuição espacial.

Quadro 3.9: Precipitações Máximas de 1 dia, ajustadas por Gumbell

Código	Nome	Chuva (mm) Tempos de Retorno (anos)					
		2	5	10	20	50	100
2850009	PASSO TAINHAS	72,5	87,3	97,2	106,6	118,8	128,0
2851003	ANTÔNIO PRADO	85,1	110,4	127,2	143,2	164,0	179,6
2851021	PASSO DO PRATA	75,7	92,1	103,0	113,4	126,9	137,0
2950010	CAPÃO DO COXO	71,5	82,2	89,2	96,0	104,7	111,3
29500016	GLORINHA	69,8	87,5	99,3	110,5	125,1	136,0
2950026	RENANIA	80,5	98,7	110,7	122,2	137,2	148,4
2950038	TERRA DE AREIA	85,8	105,3	118,2	130,6	146,7	158,7
2950041	VÁRZEA SÃO JOÃO	60,4	70,2	76,7	82,9	91,0	97,0
2951010	ENCANTADO	71,6	89,6	101,5	112,9	127,7	138,7
2951022	NOVA PALMIRA	80,6	99,5	112,1	124,1	139,7	151,4
2951024	PORTO GARIBALDI	81,1	101,3	114,6	127,4	144,0	156,4
2951027	SÃO VENDELINO	88,6	108,1	121,1	133,5	149,5	161,5
2951028	SAPUCAIA DO SUL	77,7	95,1	106,6	117,6	131,9	142,6
2951067	CHARQUEADAS	73,5	91,8	104,0	115,6	130,7	141,9
3050005	GUAÍBA COUNTRY CLUB	66,6	85,6	98,2	110,3	125,9	137,7

No Quadro 3.10 são apresentados os resultados do ajuste da equação IDF aos quatro postos selecionados, mais próximos a área de estudo.

Quadro 3.10: Equações IDF para os postos selecionados

Estação	a	b	c	d
Nova Palmira - 2951022	591,81	0,150	9	0,701
Porto Garibaldi - 2951024	596,29	0,156	9	0,701
São Vendelino - 2951027	650,07	0,144	9	0,701
Renania - 2950026	590,77	0,146	9	0,701

Devido ao formato muito semelhante das curvas (*c* e *d* idênticos, em função do emprego de índices regionais de relações entre durações, e *a* e *b* próximos), não se cometeria um grave erro no caso de utilização de uma única equação regional, apresentada a seguir.

$$i = \frac{607,24 \times Tr^{0,149}}{(t + 9)^{0,701}}$$

Onde: *i* é a intensidade da precipitação em milímetros por hora; *Tr* é o tempo de retorno em anos; e *t* é o tempo de duração da precipitação em minutos.

3.3 Análise de Dados Fluviométricos

A seguir apresentam-se os estudos relativos aos dados de níveis e vazões para o trecho baixo do rio Caí, com o objetivo de caracterizar a ocorrência de cheias. A utilização dos dados de níveis e vazões objetivou preparar a base de informações para as simulações hidráulicas que serão apresentadas no capítulo seguinte, caracterizando os processos de formação de cheias no rio Caí, no trecho de interesse para este estudo.

Foram trabalhados os dados de níveis e vazões, médios e máximos, de modo a observar as relações entre informação disponível nas estações, e caracterizar os valores de projeto, para a etapa de simulações.

Os dados trabalhados referem-se a 04 (quatro) estações fluviométricas, todas com dados disponíveis, e essenciais para a caracterização do trecho de interesse para o trabalho ora em desenvolvimento: Nova Palmira (87160000), Barca do Caí (87170000), Passo Montenegro (87270000) e Praça da Harmonia (87450003), esta última no lago Guaíba, e as demais no rio Caí. As características e localização das estações fluviométricas selecionadas podem ser observada no Quadro 3.11 e Figura 3.23, respectivamente.

Quadro 3.11: Estações de Monitoramento Fluviométrico

Código	87160000	87170000	87270000	87450003
Nome	NOVA PALMIRA	BARCA DO CAÍ	PASSO MONTENEGRO	PRAÇA DA HARMONIA
Rio	RIO CAÍ	RIO CAÍ	RIO CAÍ	RIO GUAÍBA
Município	CAXIAS DO SUL	S. SEBASTIÃO DO CAÍ	MONTENEGRO	PORTO ALEGRE
Responsável/ Operador	ANA/CPRM	ANA/CPRM	ANA/CPRM	DNIT/SPH
Latitude	-29:20:8	-29:35:19	-29:42:2	-30:2:0
Longitude	-51:11:18	-51:22:56	-51:26:26	-51:14:0
Altitude (m)	50	15	0,27	-
Área de Drenagem (km²)	2030	3030	4360	82500

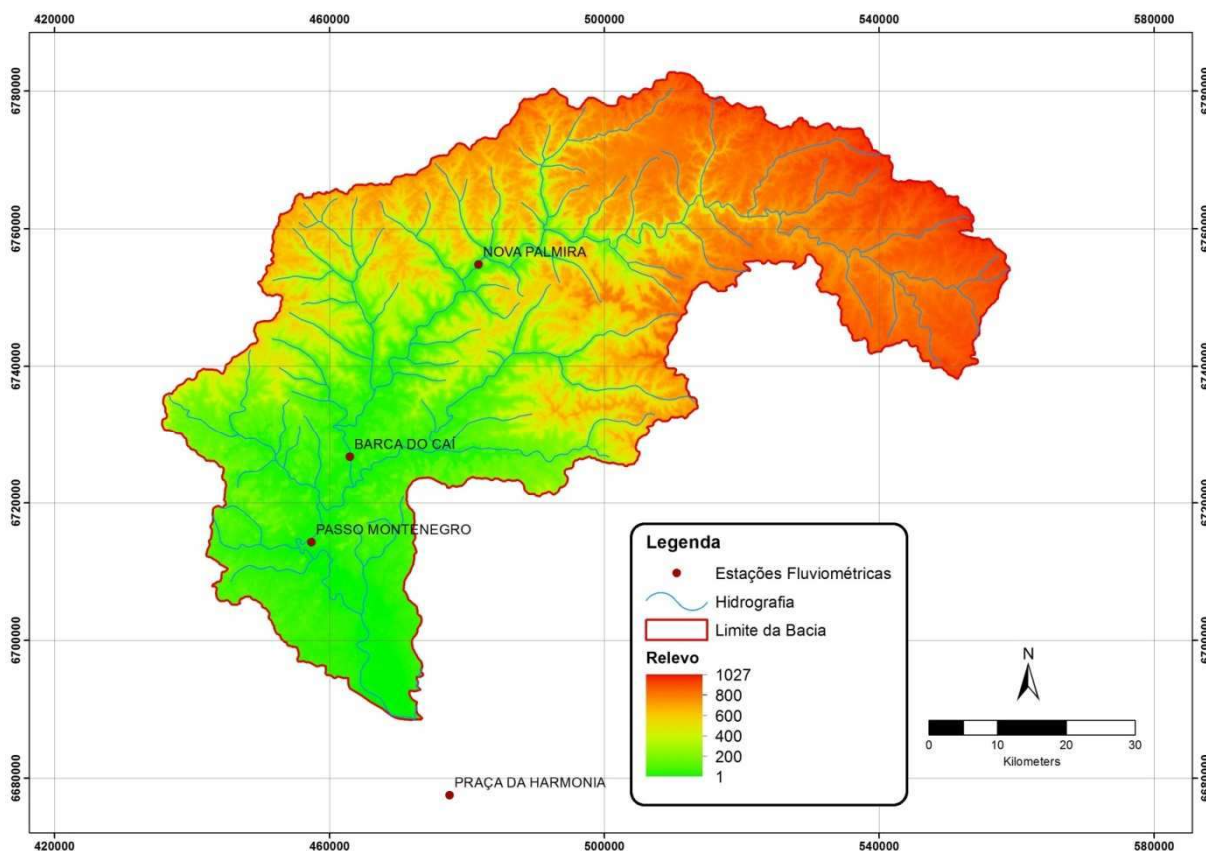


Figura 3.23: Localização das Estações Fluviométricas

Inicialmente, para possibilitar a utilização das séries de níveis, de forma compatível com os levantamentos de campo (aerofotogrametria e topobatimetria), foram necessários levantamentos topográficos para amarração entre os RNs das estações de monitoramento

com os RNs adotados no projeto, de modo a transformar os dados de níveis d'água nas réguas, em cotas verdadeiras.

Conhecendo-se a localização dos RNs das estações de monitoramento (que foram disponibilizadas pela CPRM), foi realizada a “amarração” entre os níveis nas réguas e as referências de cotas, no mesmo Datum Vertical do projeto: Imbituba-SC.

Da análise dos resultados do levantamento topográfico, pode-se concluir que nos dois casos os valores apresentados na estação (leituras das réguas) estão acima da cota verdadeira, e devem ser descontados de uma constante equivalente a:

- $9,000 - 8,671 \text{ (m)} = 0,329 \text{ m} = 32,9 \text{ cm}$, em Passo Montenegro; e
- $9,000 - 8,420 \text{ (m)} = 0,580 \text{ m} = 58,0 \text{ cm}$, em Barca do Caí.

Para a estação Praça da Harmonia (Lago Guaíba), a informação sobre a amarração entre os níveis e o Datum Vertical de Imbituba-SC foi disponibilizada pela SPH, e resultam que os dados de níveis (leituras da régua) também estão acima da cota verdadeira, devendo ser descontada a seguinte constante:

- $3,000 - 2,693 \text{ (m)} = 0,307 \text{ m} = 30,7 \text{ cm}$, em Praça da Harmonia.

Apesar do objeto deste trabalho se constituir num estudo de cheias, optou-se por analisar também valores médios como objetivo de buscar compreender como se dá o comportamento das relações entre as estações de monitoramento.

Para a análise de vazões foram selecionadas as estações fluviométricas Nova Palmira, Barca do Caí e Passo Montenegro; e para as análises de níveis, utilizam-se as estações Praça da Harmonia, Passo Montenegro e Barca do Caí. No Quadro 3.12 são apresentadas as estatísticas mensais de vazões para as três estações selecionadas.

Quadro 3.12: Estatísticas Mensais de Vazões (m³/s) para o Baixo Caí

NOVA PALMIRA – 87160000 (2.030 km²)						
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Med Med	22,0	29,1	20,3	21,0	24,0	48,3
Max Med	85,3	115,0	80,0	92,5	89,0	269,0
Med Max	94,8	125,8	98,9	117,5	132,9	300,5
Max Max	566,0	1085,0	759,0	592,0	682,0	1190,0
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Med Med	54,2	63,1	73,0	53,9	32,4	27,1
Max Med	259,0	190,0	252,0	229,0	159,0	144,0
Med Max	292,2	335,4	346,4	290,4	134,9	164,8
Max Max	1059,0	1103,0	1133,0	1290,0	612,0	1325,0
BARCA DO CAÍ – 87170000 (3.030 km²)						
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Med Med	33,8	46,5	34,6	44,0	55,3	93,6
Max Med	113,0	161,0	151,0	175,0	183,0	455,0
Med Max	136,4	199,9	156,9	203,3	291,9	452,9
Max Max	530,0	1390,0	1079,0	940,0	1012,0	1368,0
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Med Med	122,2	133,2	112,1	95,3	62,2	44,7
Max Med	399,0	397,0	404,0	305,0	221,0	215,0
Med Max	596,2	591,4	495,6	444,9	256,3	252,0
Max Max	1748,0	1619,0	1612,0	1633,0	930,0	1604,0

PASSO MONTENEGRO – 87270000 (4.360 km ²)						
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Med Med	39,7	49,9	40,6	55,7	73,8	114,6
Max Med	145,0	199,0	176,0	193,0	520,0	459,0
Med Max	128,6	153,7	133,3	189,4	235,7	367,9
Max Max	557,0	715,0	739,0	807,0	954,0	902,0
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Med Med	129,1	133,4	137,7	116,8	70,0	56,2
Max Med	412,0	378,0	413,0	358,0	293,0	221,0
Med Max	405,8	374,1	398,8	364,5	208,1	187,4
Max Max	821,0	860,0	860,0	832,0	831,0	735,0

Med Med = média das vazões médias mensais – características de condições normais

Max Med = maior média mensal – características de cheias sazonais

Med Max = média das máximas diárias observadas em cada mês – características de condições de cheias

Max Max = maior cheia diária já observada – características de grandes cheias (extremos)

No Quadro 3.13 apresenta-se uma medida do grau de correlação entre as séries de vazões médias e máximas, comparando-se as estações duas a duas. Percebe-se que para as séries de vazões médias os coeficientes de correlação (R^2) são maiores do que para as vazões máximas. Disso resulta a conclusão de que há outras variáveis que interferem nos níveis de cheias, mais do que no regime de médias.

Quadro 3.13: Correlações entre séries de vazões médias e máximas, das estações selecionadas

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO (R^2)	Vazões Médias	Vazões Máximas
Barca do Caí x Passo Montenegro	98,1%	94,2%
Nova Palmira x Barca do Caí	95,9%	90,5%
Nova Palmira x Passo Montenegro	92,6%	87,6%

Para avaliar este efeito, foi realizada a mesma análise estatística, para as séries de níveis observados, estabelecendo-se os cruzamentos entre os dados de Barca do Caí e Passo Montenegro, inserindo nesta análise a estação Praça da Harmonia, com dados de níveis do Lago Guaíba, em Porto Alegre. Os dados do linígrafo da Praça da Harmonia foram disponibilizados pela SPH. A seguir é apresentado Quadro 3.14 com as estatísticas mensais de níveis, já corrigidas para as cotas do projeto (Datum Vertical de Imbituba – SC).

Quadro 3.14: Estatísticas Mensais de Cotas (cm) para o Baixo Caí

BARCA DO CAÍ – 87170000 (3.030 km ²)						
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Med Med	39,8	54,9	44,7	65,1	85,1	133,2
Max Med	174,0	226,0	216,0	206,0	518,0	471,0
Med Max	154,9	183,1	170,2	219,4	255,1	375,8
Max Max	560,0	668,0	684,0	727,0	817,0	786,0
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Med Med	155,2	161,9	169,3	139,1	85,9	59,8
Max Med	438,0	401,0	438,0	379,0	336,0	256,0
Med Max	422,7	399,9	429,3	381,6	243,4	216,8
Max Max	798,0	796,0	796,0	743,0	742,0	805,0



PASSO MONTENEGRO – 87270000 (4.360 km ²)						
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Med Med	64,9	80,0	69,8	90,2	110,2	158,3
Max Med	199,1	251,1	241,1	231,1	543,1	496,1
Med Max	180,0	208,2	195,3	244,5	280,2	400,9
Max Max	585,1	693,1	709,1	752,1	842,1	811,1
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Med Med	180,3	187,0	194,4	164,2	111,0	84,9
Max Med	463,1	426,1	463,1	404,1	361,1	281,1
Med Max	447,8	425,0	454,4	406,7	268,5	241,9
Max Max	823,1	821,1	821,1	768,1	767,1	830,1
PRAÇA DA HARMONIA – 87450003 (82.500 km ²)						
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Med Med	20,6	23,5	28,1	38,1	47,5	60,7
Max Med	56,3	71,3	96,3	97,3	115,3	190,3
Med Max	60,4	62,9	66,1	79,6	90,4	105,2
Max Max	158,3	165,3	126,3	148,3	188,3	223,3
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Med Med	71,0	72,1	69,1	61,5	44,2	28,1
Max Med	162,3	171,3	181,3	126,3	107,3	77,3
Med Max	119,1	120,8	123,5	124,4	92,5	70,1
Max Max	209,3	224,3	251,3	216,3	179,3	191,3

Med Med = média das cotas médias mensais – características de condições normais

Max Med = maior média mensal – características de cheias sazonais

Med Max = média das máximas diárias observadas em cada mês – características de condições de cheias

Max Max = maior cheia diária já observada – características de grandes cheias (extremos)

Avaliando-se os valores do Coeficiente de Correlação (R^2) do comportamento das séries, quando combinadas duas as duas, percebe-se, nas estações do rio Caí, um comportamento semelhante a série de vazões, com alta correlação entre Barca do Caí e Passo Montenegro, porém com um pouco mais de dispersão na série de máximas.

Percebe-se, ainda que o efeito do Lago Guaíba é maior em Passo Montenegro do que em Barca do Caí, os coeficientes de correlação entre as estações do Guaíba e do Caí, da ordem de 75% para máximas, indicam que há influência do controle de jusante, mas ela não é a única que interfere na formação das cheias no baixo rio Caí.

Quadro 3.15: Correlações entre séries de cotas médias e máximas, das estações selecionadas

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO	Vazões Médias	Vazões Máximas
Barca do Caí x Passo Montenegro	97,9%	97,6%
Barca do Caí x Praça da Harmonia	76,8%	74,3%
Passo Montenegro x Praça da Harmonia	81,1%	76,0%

Para o ajuste de estatísticas anuais, foi, mais uma vez, aplicado o modelo de Gumbell, para distribuição de extremos, neste caso, máximos.

Quadro 3.16: Vazões Máximas, por Tempo de Retorno, ajustadas por Gumbell

TR	Vazões Máximas (m³/s)		
	NOVA PALMIRA 87160000 2.030 km²	BARCA DO CAÍ 87170000 3.030 km²	PASSO MONTENEGRO 87270000 4.360 km²
2	655,1	1091,2	658,4
5	900,1	1383,2	782,6
10	1062,3	1576,5	864,8
20	1217,9	1761,9	943,7
25	1267,3	1820,8	968,7
50	1419,3	2002,0	1045,8
100	1570,3	2181,9	1122,3

Quadro 3.17: Cotas Máximas, por Tempo de Retorno, ajustadas por Gumbell

TR	Cotas Máximas (cm)		
	BARCA DO CAÍ 87170000 3.030 km²	PASSO MONTENEGRO 87270000 4.360 km²	PRAÇA DA HARMONIA 87450003 82.500 km²
2	1070,2	655,1	151,9
5	1223,6	748,2	185,2
10	1325,2	809,8	207,2
20	1422,6	868,9	228,4
25	1453,5	887,7	235,1
50	1548,8	945,5	255,7
100	1643,3	1002,8	276,2

A análise destes valores indica algo que parece uma inconsistência hidrológica, pois as vazões máximas em Passo Montenegro são inferiores às vazões máximas em Barca do Caí, ainda que haja uma bacia incremental de 1330 km² entre as duas estações. Desse modo, verifica-se que há efeito de remanso do Guaíba sobre o Caí, principalmente em Passo Montenegro. A intensidade desta influência será avaliada no Modelo Hidráulico se simulação do escoamento. Ainda assim, sugere-se não trabalhar com as vazões em Passo Montenegro, utilizando, desta estação, apenas os dados de níveis.

3.4 Avaliação dos Mecanismos de Formação de Cheias no Baixo Rio Caí

Este item visa, a partir da comparação entre as séries de precipitações e vazões, verificar a correlação entre as cheias verificadas no histórico de vazões (e cotas), e a intensidade das precipitações ocorridas no período. Também será avaliado o efeito das cheias no Guaíba sobre o baixo rio Caí. Este procedimento visa avaliar:

- a influência das precipitações no fenômeno das cheias, ou
- a indicação da influência do Guaíba no comportamento deste trecho do rio Caí.

Inicialmente é apresentada uma descrição do comportamento das cheias no Lago, seguida de uma análise comparativa entre a série de níveis em Passo Montenegro e Praça da Harmonia.

Os níveis de cheias no Lago Guaíba estão associados a duas condicionantes: a influência da Laguna dos Patos ou a incidência de precipitações nas bacias dos formadores do lago. O efeito da Laguna dos Patos sobre o Lago Guaíba está condicionado à flutuação da maré, na Barra de Rio Grande, e ao efeito do vento sobre o espelho d'água de tão grande dimensão.

Utilizando-se os dados da série da Praça da Harmonia, que iniciou a operação em junho/1941 (não tendo o registro da grande cheia de maio/1941), observa-se que o maior valor registrado é de 2,51 m, em setembro de 1967, equivalente a uma cheia de 42 anos de Tempo de Retorno, conforme o ajuste realizado neste estudo.

A avaliação do efeito do Lago Guaíba sobre o fenômeno de cheias no trecho baixo do rio Caí, foi realizada com auxílio do modelo de simulação hidráulica apresentado no capítulo seguinte.

Para proceder uma análise preliminar do efeito do Lago Guaíba sobre o trecho baixo do rio Caí, foi selecionada a estação Passo Montenegro (87270000), no rio Caí, com histórico de dados consistidos entre 1943 e 2006. A estação selecionada teve sua série de níveis comparada às séries de níveis em Praça da Harmonia, com dados de 1941 a 2014.

Analisando-se os dados da estação fluviométrica Passo Montenegro, localizada no baixo rio Caí, identificou-se os anos em que ocorreram as maiores cheias naquela região, através da série de vazões máximas anuais, da qual se identificou os anos em que a cota superou os 800 cm. Os piores eventos de cheia da estação Passo Montenegro foram registrados nos anos de 1941, 1942, 1944, 1956, 1965, 1967, 1982, 1984, 1987, 1988, 1997, 2000 e 2003.

Aqui cabe uma ressalva quanto ao ano de 2007, apontado pelos moradores de Montenegro como o evento de maior cota de inundação. Acontece que de agosto a outubro de 2007 a série de dados em Passo Montenegro tem uma falha, que é acompanhada nas demais estações da bacia (Barca do Caí e Nova Palmira, nesta última abrange todo o ano de 2007). Esta falha também é verificada na bacia do Sinos (em Campo Bom), de modo que não é possível preencher a lacuna com dados de outra estação.

Um interessante registro fotográfico de um morador da localidade de Matiel (Figura 3.24), em Pareci Novo, permite avaliar a magnitude da cheia de setembro/2007 (pouco acima de cheia de junho/1982 e abaixo da cheia de julho/2011).

Também foi realizada uma análise comparativa entre a estação Passo Montenegro (87270000), no rio Caí, com histórico de dados consistidos entre 1943 e 2006, e estações de chuva do trecho de interesse, considerando-se de três estações pluviométricas:

- Nova Palmira (02951022), com dados consistidos entre 1943 e 2006;
- São Vendelino (02951027), com dados consistidos entre 1970 e 2006;
- Renania (02950026), com dados consistidos entre 1944 e 1978.

Para os mesmos anos selecionados na análise com a Praça da Harmonia, foi realizado um cruzamento dos dados de cheias de Passo Montenegro com as séries de precipitações das estações Nova Palmira, São Vendelino e Renania daquele mesmo ano, com o objetivo de analisar a coincidência, ou não, entre picos.

No Quadro 3.18 são apresentados os anos selecionados para o cruzamento dos eventos de cheias em Passo Montenegro com os dados de precipitação das estações pluviométricas selecionadas.



Figura 3.24: Registro de níveis máximos históricos na propriedade do Sr. Walter Fuhr, na localidade de Matiel, município de Pareci Novo

Quadro 3.18: Anos com eventos de cheia para a comparação entre as séries de precipitações e vazão (e cotas)

Passo Montenegro x Nova Palmira	Passo Montenegro x São Vendelino	Passo Montenegro x Renania
1944		
1956		
1965	1982	1954
1967	1984	1956
1982	1987	1959
1984	1988	1963
1987	1997	1966
1988	2000	1967
1997	2003	1971
2000		1973
2003		

Finalmente, foi realizada uma comparação entre as precipitações e vazões na bacia do Caí, registradas em Nova Palmira, e os níveis no lago Guaíba, possibilitando avaliar se estas duas variáveis possuem comportamento combinado ou atuam de forma independente.

Numa primeira análise, as séries de precipitações médias e máximas foram comparadas as séries de níveis médios e máximas, com o mesmo procedimento realizado para a comparação entre as estações de níveis e vazões. Após realizou-se o mesmo procedimento para a comparação entre vazões médias e máximas em Nova Palmira, e os níveis médios e máximos em Praça da Harmonia. O quadro a seguir ilustra o comportamento dos valores do Coeficiente de Correlação (R^2).

Quadro 3.19: Correlações entre séries de Praça da Harmonia (níveis) e Nova Palmira (precipitações e vazões), nas estações selecionadas.

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO	Valores Médios	Valores Máximos
Praça da Harmonia (níveis) x Nova Palmira (precipitações)	35,2%	34,3%
Praça da Harmonia (níveis) x Nova Palmira (vazões)	50,9%	27,3%

Percebe-se que o coeficiente de correlação entre as duas variáveis é bem baixo, porém não é nulo, de modo que se pode considerar que há alguma dependência entre os mesmos. Este grau de dependência está relacionado aos eventos de cheias no Guaíba provocados por precipitações elevadas no Jacuí e Taquari, que devem coincidir com episódios de chuvas na bacia do Caí.

Conforme os testes estatísticos que foram aplicados, conclui-se que as duas variáveis são independentes. Desse modo, quando avaliados os eventos extremos combinados, os mesmos podem ser suas probabilidades multiplicadas, como forma de se estimar a probabilidade de ocorrência do evento conjunto.

Após a análise do conjunto de resultados produzidos nos itens anteriores deste capítulo, é possível inferir as seguintes conclusões sobre o mecanismo de formação de cheias no baixo Caí:

- Percebe-se uma grande coincidência entre picos de grandes eventos de precipitações e as cheias no trecho baixo do rio Caí;
- Há episódios em que precipitações similares, em magnitude, tiveram efeito diferente nas cotas do rio Caí, indicando a interferência do remanso no Lago Guaíba;
- Episódios de precipitações não muito elevadas, por vezes, resultaram em cheias medianas, ou mesmo grandes, indicando que a capacidade de influência do remanso do lago é elevada.

- De modo análogo, subidas nos níveis do lago Guaíba nem sempre ocasionam cheias no baixo Caí, indicando que é preciso haver o evento combinado entre as duas variáveis para que sejam observadas as cheias de maior magnitude.
- O tempo de retardo (*lag time*) entre os picos dos eventos de precipitação na bacia e pico de vazões em Passo Montenegro, nos maiores eventos, é pouco superior a um dia, o que significa um baixo tempo de reação, no caso de um sistema de alerta.
- Finalmente, verificou-se que as duas variáveis que condicionam a formação das cheias no trecho em estudo (vazões em Nova Palmira na bacia e níveis no Guaíba) são independentes, ainda que ocorram, frequentemente, de modo sincronizado.

Como já foi explicado, o efeito combinado dos eventos críticos em Nova Palmira e Praça da Harmonia será avaliado e quantificado com o auxílio do modelo de simulação hidráulica na próxima etapa do estudo, submetendo-o o baixo rio Caí a cenários de análises para as duas variáveis e avaliando o efeito de cada uma nos níveis do rio Caí.

3.5 Cenários para Simulações Hidráulicas

Este item visa estabelecer as condicionantes para as simulações hidráulicas que consistem no objeto do próximo Capítulo. Em primeiro lugar, apresenta-se um diagrama esquemático das simulações, indicando todas as entradas do modelo, e os dois pontos de controle: as réguas em Barca do Caí e Passo Montenegro. A Figura 3.25 também indica a restrição de escoamento pelo efeito de remanso, a jusante.

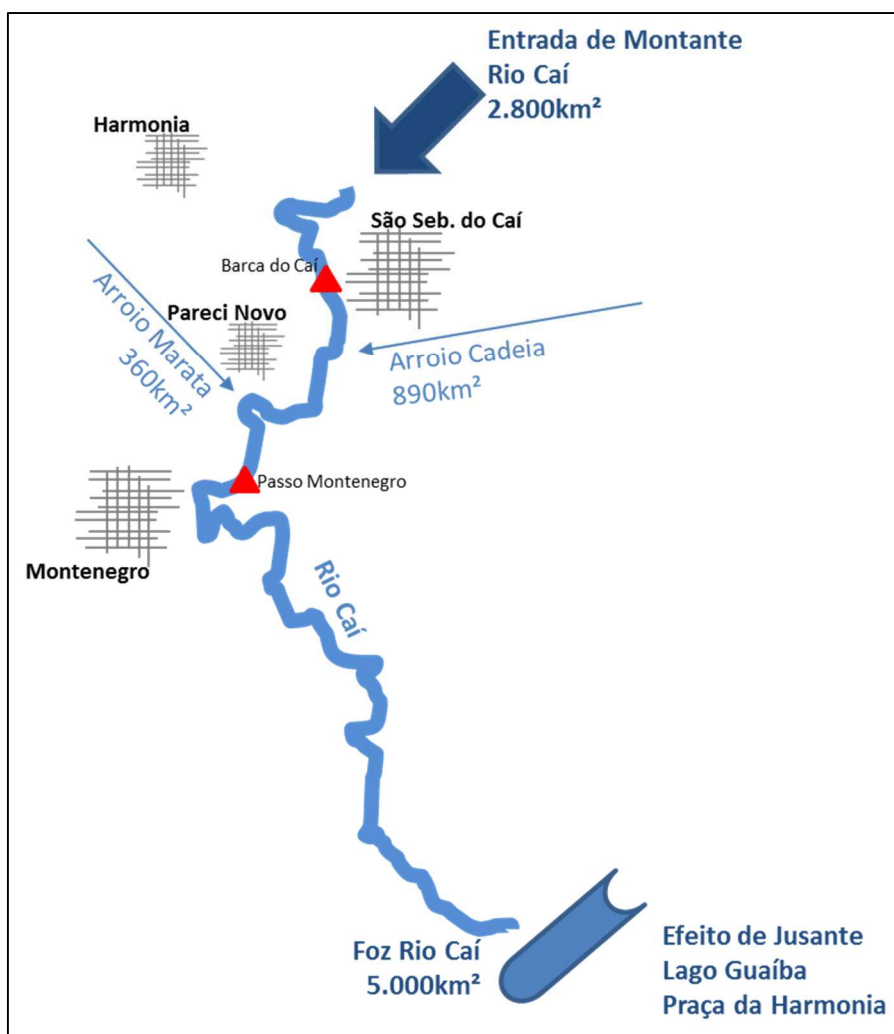


Figura 3.25: Diagrama esquemático para as simulações hidráulicas

A entrada do trecho a ser simulado, que corresponde a Seção 26, dos levantamentos topobatimétricos abrange uma bacia de drenagem de aproximadamente 2.853,28 km², o que corresponde a 57,7% da bacia do rio Caí, que totaliza 4.945,70 km² (segundo a SEMA, 2014). Assim, a bacia incremental do trecho em estudo possui área de 2.092,42 km², com extensão de 88 km.

Dentre os afluentes do rio Caí no trecho em estudo, dois se destacam: os arroios Cadeia e Maratá, com áreas de drenagem de, respectivamente, 889,67 km² e 356,15 km². Juntos, estes arroios drenam 59,5% da bacia incremental ao trecho em estudo.

Por este motivo, decidiu-se individualizá-los, e quantificar a geração de vazões nestes dois afluentes, através do modelo precipitação – vazão. As demais sub-bacias, que totalizam 846,60 km², são inseridas no modelo hidráulico como contribuição lateral ao trecho em estudo. O Arroio Cadeia aflui ao rio Caí próximo ao município de São Sebastião do Caí, cruzando parte de sua área urbana, a jusante da Estação Barca do Caí. O Arroio Maratá aflui ao rio Caí, a jusante do município de Pareci Novo, a montante da Estação Passo Montenegro.

O mapa da Figura 3.26 ilustra a divisão o Baixo Caí em sub-bacias, conforme o Plano de Bacia do Caí (Profill, 2007), com destaque para as duas sub-bacias que serão detalhadas neste item. A partir da caracterização fisiográfica destas duas sub-bacias, é possível a utilização de uma metodologia que permite a estimativa da geração de vazões, considerando-se as precipitações obtidas com as IDF estimadas para a região.

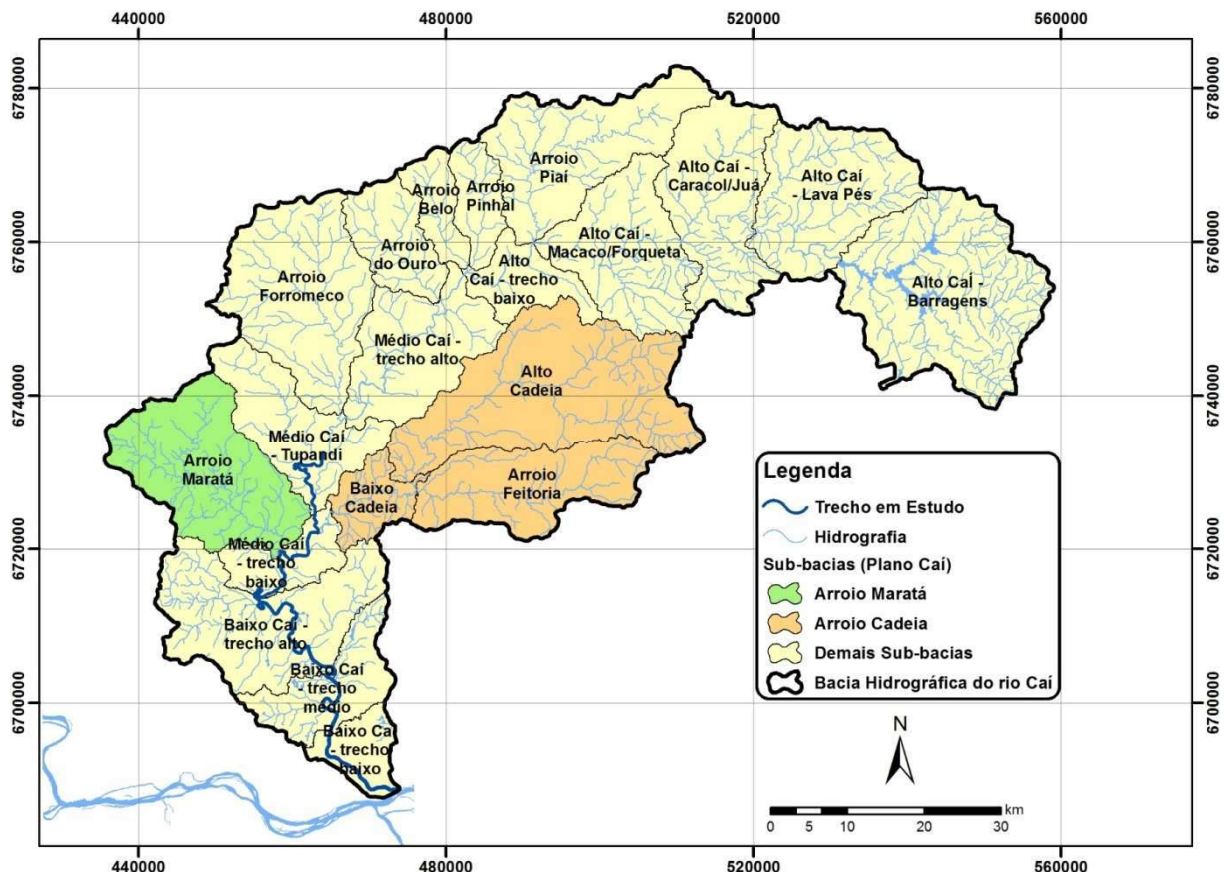


Figura 3.26: Sub-bacias do Baixo Caí, com destaque para as sub-bacias dos Arroios Cadeia e Maratá

Os quadros e figuras a seguir ilustram os resultados finais das estimativas de vazões nas duas sub-bacias.

Quadro 3.20: Vazões máximas, em função do tempo de retorno, para as sub-bacias

Tempo de Retorno (anos)	Vazão Máxima (m ³ /s)	
	Arroio Cadeia	Arroio Maratá
2	361,5	153,6
5	466,2	205,1
10	554,6	248,9
20	657,8	300,8
25	672,2	316,0
50	759,9	369,4
100	860,4	420,0

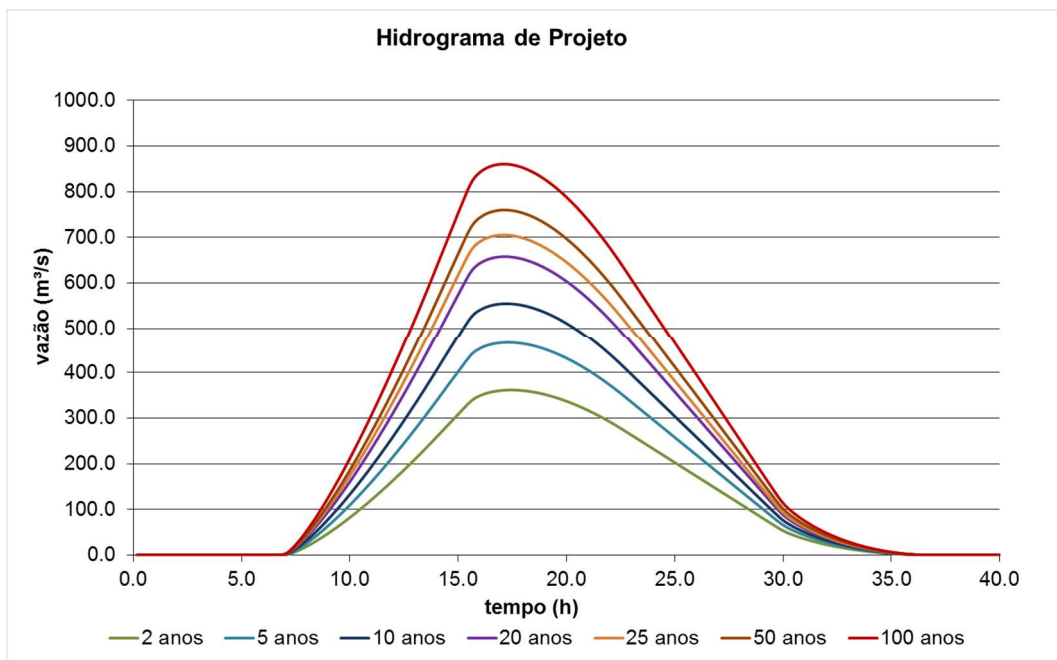


Figura 3.27: Hidrogramas de Projeto para a sub-bacia do Arroio Cadeia

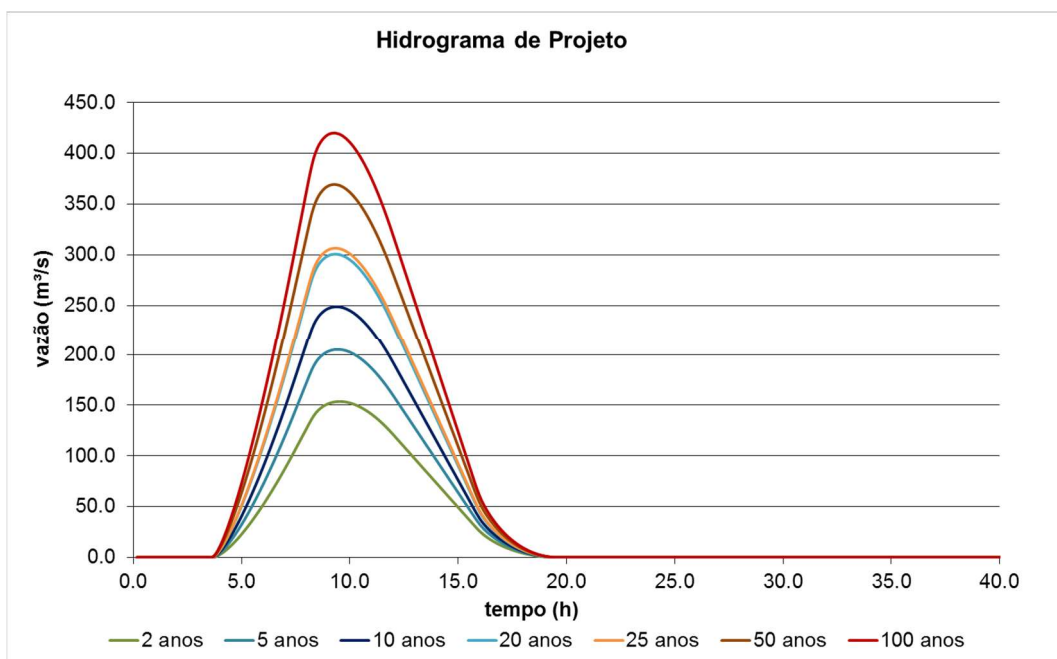


Figura 3.28: Hidrogramas de Projeto para a sub-bacia do Arroio Maratá

Em função das análises realizadas e conforme estabelecido nas reuniões de acompanhamento do trabalho, na Metroplan, é possível estabelecer as seguintes diretrizes para as simulações hidráulicas:

- Vazões de montante: três cenários, referentes a TRs 2, 25 e 100 anos, estimadas pela interpolação dos dados referentes a Nova Palmira e Barca do Cai, apresentados no Quadro 3.21.

Quadro 3.21: Vazões Máximas para a bacia do rio Cai, na S-26, através da interpolação entre Barca do Cai e Nova Palmira.

Tempo de Retorno (anos)	Vazão Máxima (m ³ /s)
2	1014,1
5	1297,8
10	1485,6
20	1665,8
25	1723,0
50	1899,0
100	2073,8

- Vazões de contribuição lateral: estimadas durante o procedimento de simulação, como variável de calibração do modelo a dados observados, considerando as estimativas apresentadas no item anterior, para as sub-bacias dos arroios Cadeia e Maratá. Os resultados para estas duas bacias vão orientar o incremento de vazões de contribuição lateral no trecho considerado.
- Níveis no Guaíba: três cenários, referentes a condições de cotas médias, altas e intermediárias para o lago, correspondem aos seguintes valores (Quadro 3.22), conforme a série de dados da estação Praça da Harmonia.

Quadro 3.22: Níveis característicos do Lago Guaíba, para cenários de simulação.

Condição	Descrição da Referência	Cota (m)
Cotas médias	Média de longo período.	0,47
Cotas Intermediárias	Média das máximas, equivalente ao TR 02 anos.	1,58
Cotas Altas	TR de 25 anos.	2,35



4 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS E MAPAS DE INUNDAÇÕES

4 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS E MAPAS DE INUNDAÇÕES

Partindo-se dos resultados dos Estudos Hidrológicos, principalmente os cenários do item 3.5, foram realizadas uma série de simulações, buscando representar o comportamento das cheias no trecho em estudo. Tais simulações e seus resultados foram apresentados no Relatório R6, e são recuperados neste capítulo.

O modelo aqui apresentado possibilitou a avaliação hidráulica do funcionamento das medidas propostas, contribuindo na análise das alternativas para seleção das obras a serem implantadas para proteção e minimização do efeito das cheias na bacia.

Inicialmente é apresentada uma breve descrição do modelo, o HEC-RAS, seguido da calibração do mesmo para as condições atuais. E, na sequência, são apresentados os mapas de inundação gerados a partir dos resultados do modelo.

4.1 Simulações Hidrológicas

Para avaliar o efeito da passagem dos hidrogramas de enchentes foram realizadas simulações destinadas a espacialização dos fenômenos de extravasão do rio Caí, especialmente nas áreas de maior ocupação populacional, como é o caso dos municípios de Montenegro e São Sebastião do Caí.

Estas simulações hidráulicas também permitiram que fossem formuladas hipóteses/alternativas de intervenções, no sentido de minimizar os problemas, diminuindo ou, até mesmo, erradicando os transtornos para as pessoas afetadas.

Conforme definido no Plano de Trabalho, a Simulação Hidráulico-Hidrológica do escoamento no baixo trecho do rio Caí se constitui na principal ferramenta de análise deste estudo de alternativas para minimização do efeito das cheias na bacia.

Assim, com esta ferramenta, é possível avaliar a propagação das vazões máximas registradas no rio Cai, levando-se em conta obstruções ao escoamento, geometria da calha principal, extravasamentos para a planície de inundação e efeitos de jusante.

Para isso foi utilizado um modelo hidrodinâmico capaz de avaliar a propagação da onda de cheia ao longo do trecho inferior do rio Caí. As simulações tiveram por fundamento o levantamento aerofotogramétrico e topobatimétrico, que resultaram nas informações disponíveis no Modelo Digital do Terreno (MDT), alimentando a discretização do sistema real no modelo matemático a ser utilizado. As obstruções ao escoamento, tais como pontes, também foram incorporadas ao modelo.

A propagação do efeito de remanso para montante no rio Caí, como condição de contorno, foi avaliada, a partir dos dados da estação Praça da Harmonia, no Lago Guaíba.

O modelo foi calibrado para bem representar os eventos extremos máximos, utilizando-se para isso, as informações disponíveis nas estações fluviométricas existentes no rio Caí, conforme descrito a seguir.

4.1.1 Modelo Hidrodinâmico Utilizado

O modelo hidráulico utilizado foi o HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers, USACE – Hydrologic Engineering Center, 2010), que é um modelo hidrodinâmico com uma interface gráfica para visualização de resultados, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA.

Trata-se de um programa computacional gratuito e que vem sendo continuamente desenvolvido. Pode ser utilizado para análise de escoamento permanente (curvas de remanso) ou não-permanente, e recentemente foi incorporado um módulo para transporte de sedimentos.

No módulo de escoamento não-permanente, o modelo resolve as equações de continuidade e de momento na forma de equações diferenciais parciais: equação da continuidade ou de conservação de massa e equação da conservação de momento, que são resolvidas por um esquema numérico de diferenças finitas utilizando-se o método de Newton-Raphson.

A resolução das equações exige que as condições do escoamento sejam conhecidas nos extremos do problema. Como condições de contorno de montante podem ser inseridas séries de vazão ou de nível na seção mais a montante. As condições de contorno de jusante podem ser vazões, níveis, ou uma relação entre vazões e níveis tal como uma curva-chave ou a equação de Manning para uma dada declividade da linha d'água. Mais detalhes do modelo HEC-RAS podem ser encontrados em U.S. Corps of Engineers (2010).

O programa subdivide o escoamento em escoamento no canal principal e escoamento nas margens (ou planícies de inundação), conforme apresentado na Figura 4.1 a seguir.

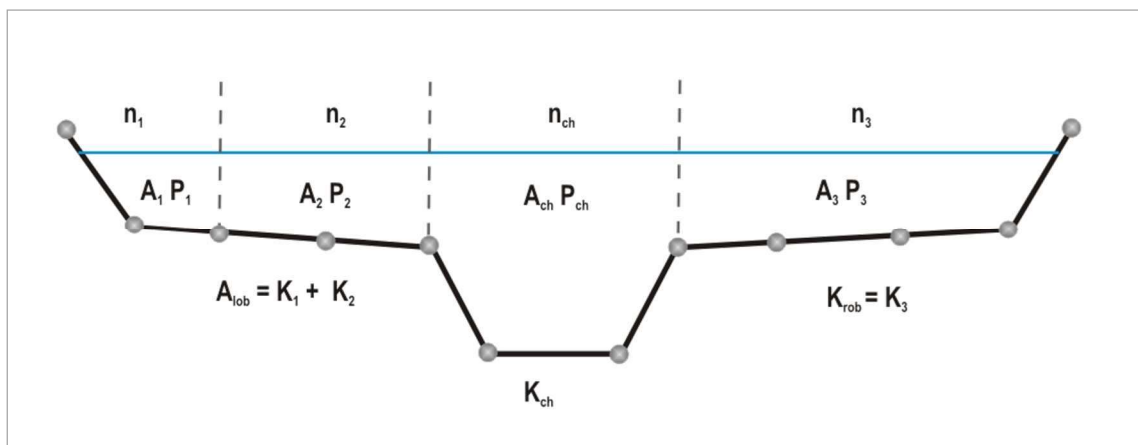


Figura 4.1: Subdivisão das seções para o cálculo da condutância (Fonte: HEC-RAS, 2010).

Usando Manning, a condutância hidráulica é calculada para cada subdivisão. A condutância total da seção é soma das condutâncias K_{lob} , K_{ch} , K_{rob} . Do mesmo modo, devem ser adotados valores de coeficientes de rugosidade de Manning (n) para as subdivisões, e assim podem ser calculadas as vazões. As demais variáveis correspondem às áreas e condutâncias nas subdivisões.

O procedimento de cálculo iterativo segue os passos descritos abaixo, para o caso do escoamento supercrítico:

1. É assumida uma cota da linha d'água na seção de montante;
2. Com base na cota assumida no passo 1, a condutância e a taquicarga totais correspondentes são determinadas;
3. Com os valores do passo 2, calcula-se a declividade de atrito;
4. Com os valores dos passos 2 e 3, resolve-se a Equação de Energia para a cota na seção de montante;
5. Os valores calculados no passo 4 e assumidos no passo 1 são comparados;
6. Repetem-se os passos do 1 ao 5 até que a diferença entre o calculado e o assumido seja menor que 0,01 ft (ou 0,003 m), ou outra tolerância definida pelo usuário.

A grande vantagem do HEC-RAS é que ele está associado a outro programa, denominado HEC-GeoRAS, que apresenta uma série de rotinas e ferramentas que processam dados geoespaciais no software ArcGIS, usando GUI, e os preparam para usar no HEC-RAS. O HEC-GeoRAS também faz a interface entre os resultados das simulações hidráulicas obtidas no HEC-RAS com o ArcGIS. Para isso, é necessário se dispor de um modelo digital do terreno da região em estudo. A ideia, que introduz agilidade e flexibilidade nos estudos, é caracterizar todo o sistema fluvial previamente no ArcGIS, como canal principal, seções topobatimétricas, rugosidade hidráulica do terreno, bem como, adicionar barragens, áreas

de reservatórios, diques, de modo a facilitar a entrada de dados, e, posterior, executar as simulações no HEC-RAS, e representar de modo espacial os resultados obtidos (ACKERMAN, 2005).

4.1.2 Condições de Contorno

O modelo matemático elaborado para avaliação das cheias nos Trechos Médio e Baixo do Rio Caí possui as seguintes condições de contorno: (a) vazão na seção de cabeceira ou de montante, (b) contribuições incrementais laterais dos principais afluentes e (c) nível na seção de jusante.

Na condição de montante define-se o hidrograma de cheia observado ou a vazão de pico para um determinado tempo de retorno, conforme registro fluviométrico ou estimada com base em uma relação Intensidade x Duração x Frequência (curvas IDF).

Nas avaliações realizadas no presente estudo foram consideradas essas duas abordagens. Na etapa de calibração do modelo – isto é, momento no qual por meio de ajustes dos parâmetros do modelo consegue-se reproduzir o comportamento do sistema real – foram adotados hidrogramas observados de cheias ocorridas na bacia. Posteriormente, com o modelo ajustado ou calibrado, as medidas de proteção contra cheias serão testadas para vazões máximas com tempos de recorrências de 5, 20, 25, 50 e 100 anos.

Dessa forma, no modelo HEC-RAS, a calibração foi procedida por uma simulação hidrodinâmica (*unsteady flow*), enquanto que para a elaboração dos mapas de cheias e para a simulação das medidas foi adotada uma simulação em regime permanente (*steady flow*) (Figura 4.2).

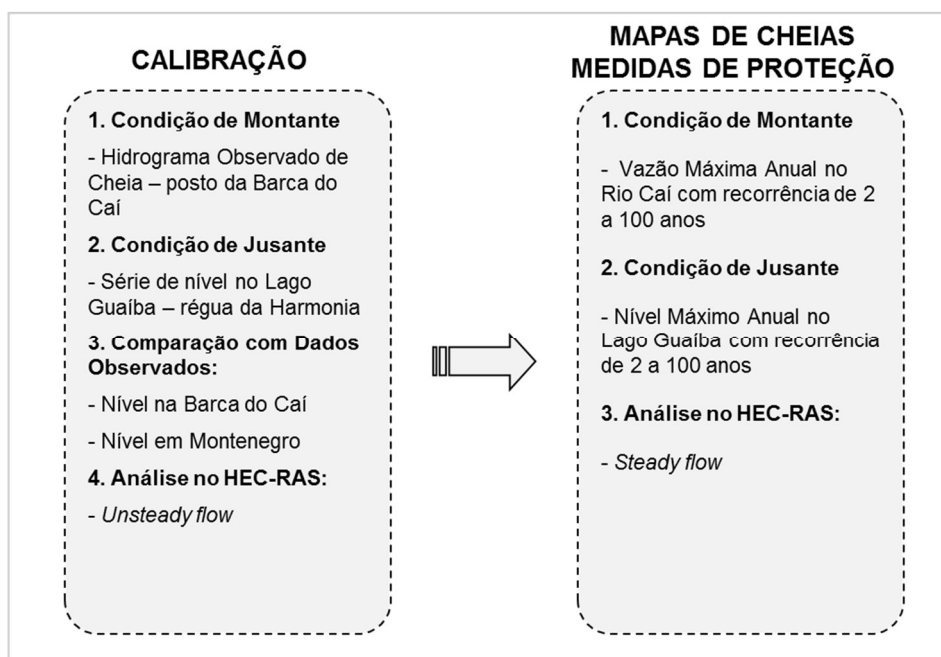


Figura 4.2: Visão geral da metodologia adotada na modelagem matemática

Sendo assim, na etapa de calibração, utilizou-se as vazões diárias observadas no posto fluviométrico de Barca do Caí. A estação possui uma série de vazões diárias entre 1942 e 2012. É importante destacar que o trecho do Rio Caí entre o posto de Barca do Caí e a seção de montante do modelo não possui contribuições relevantes.

Como condição de jusante, a modelagem seguiu a mesma abordagem adotada para a condição de montante, ou seja: (a) calibração: foram utilizados os dados de nível diário observados na régua da Harmonia situada no Lago Guaíba, para o mesmo período, e (b) nível máximos anuais no Lago Guaíba com recorrência igual a vazão de montante.

Na sequência, são detalhados os eventos de cheia adotados para calibração do modelo (séries de vazão e nível), bem como os parâmetros alvo da calibração. No item sobre os dados de entrada são apresentadas as recorrências das vazões e níveis máximos no Rio Caí e Lago Guaíba, respectivamente.

4.1.3 Dados de Entrada Considerados

Este item descreve as informações que alimentam o modelo utilizado, com destaque para a morfologia do trecho simulado, obtida na base cartográfica e topográfica do projeto.

A base cartográfica e topográfica utilizada para a elaboração do Modelo Numérico do Terreno (MNT) foi a restituição aerofotogramétrica, desenvolvida no estudo, em formato *dwg* (software AutoCAD) com curvas de níveis espaçadas em metro em metro e pontos cotados. A partir dessas informações foi gerado um arquivo *raster*.

O MNT obtido através da restituição não considera a conformação da calha do rio. Essa informação é de suma importância visto que, a profundidade do rio e as cotas do relevo são determinantes para as simulações referentes a esse estudo.

Para se obter esse novo MNT foi necessário definir uma conformação da calha do rio Caí ao longo de 85,7 km a jusante da seção batimétrica ST26 - considerada como ponto de partida do modelo - a qual foi obtido da seguinte forma:

- Primeiramente foram geradas seções batimétricas, equidistantes 30 m, ao longo do trecho em estudo a partir da interpolação linear das 27 seções batimétricas geradas em campo.
- Com essas novas seções extraíram-se pontos das mesmas e agregou as informações da restituição aerofotogramétrica (curvas e pontos) e gerou um novo raster utilizando as ferramentas do software ArGIS (spatial analyst).

As informações hidrológicas já apresentadas no capítulo anterior, serviram para a definição dos Tempos de Retorno a serem considerados nas simulações hidráulicas desta etapa do projeto. Para as vazões afluentes ao trecho de montante destacam-se os valores anteriormente apresentados no Quadro 3.21, para os TRs: 5, 20, 25, 50 e 100 anos. Outros resultados podem ser facilmente determinados, uma vez que na etapa de estudos hidrológicos todos os TRs de interesse foram determinados.

As vazões de contribuição lateral foram estimadas durante o procedimento de simulação, como variável de calibração do modelo a dados observados, considerando as estimativas de hidrogramas de cheias já apresentadas para as sub-bacias dos arroios Cadeia e Maratá. Os resultados para estas duas bacias orientaram o incremento de vazões de contribuição lateral no trecho considerado.

Finalmente, para os níveis no Guaíba, foram considerados três cenários, referentes a condições de cotas médias, altas e intermediárias para o lago, que correspondem aos valores do Quadro 3.22, conforme a série de dados da estação Praça da Harmonia.

Também é possível trabalhar com o mesmo Tempo de Retorno da vazão de montante, conforme valores apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1: Níveis máximos para a estação Praça de Harmonia

TR (anos)	Cota (m)
2	1,52
5	1,85
10	2,07
25	2,35
50	2,56
100	2,76

Para a representação da geometria do trecho a ser simulado no modelo HEC-RAS foram consideradas 523 seções transversais e 4 pontes ao longo do rio Caí, conforme é apresentado na Figura 4.3.

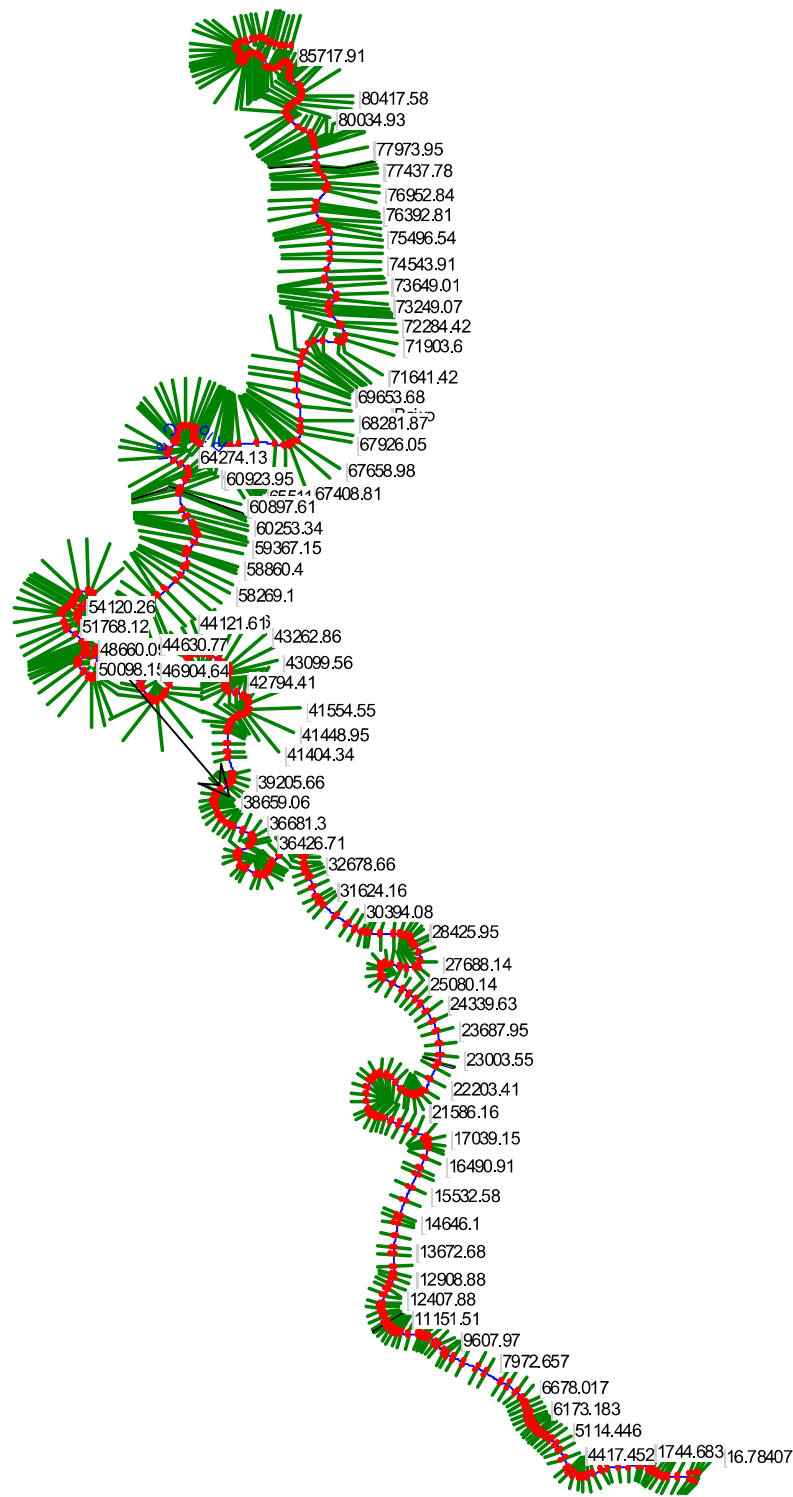
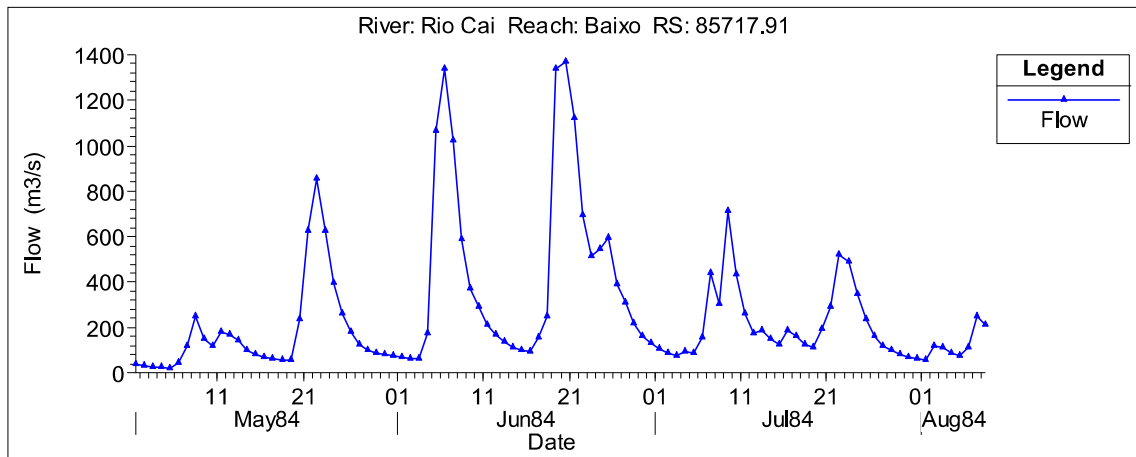


Figura 4.3: Representação do trecho do rio Caí utilizado para simulação no modelo

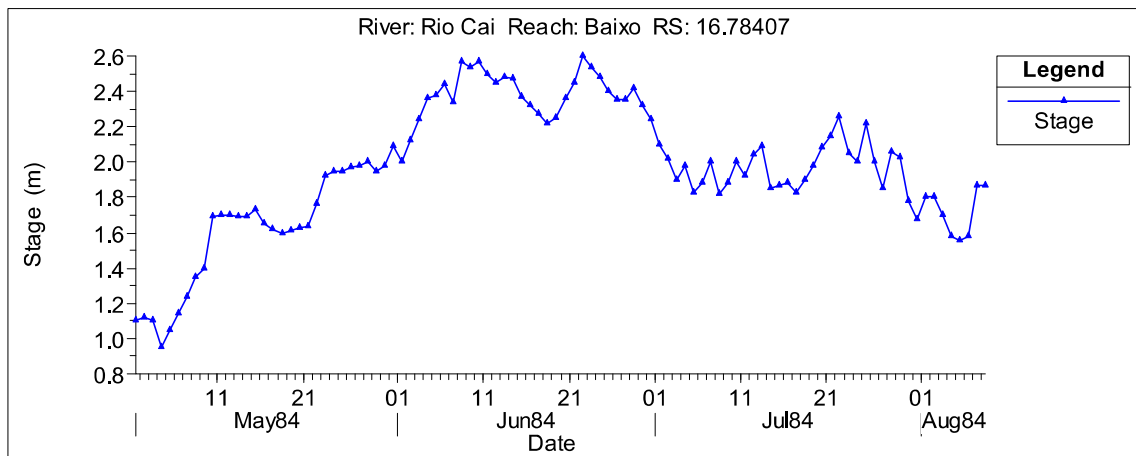
4.1.4 Calibração do Modelo

A calibração foi realizada para as cheias ocorridas em junho de 1984 e setembro de 1988. Em 1984 a vazão máxima no rio Caí foi de 1400 m³/s, enquanto que o Lago Guaíba alcançou a cota de 2,0 m. No evento de 1988 os valores máximos das condições de contorno foram de 1600 m³/s e 2,6 m.

As figuras a seguir (Figura 4.4 e Figura 4.5) apresentam as séries de vazões e cotas observadas adotadas como condição de contorno para simulação das cheias de 1984 e 1988, respectivamente.



(a)



(b)

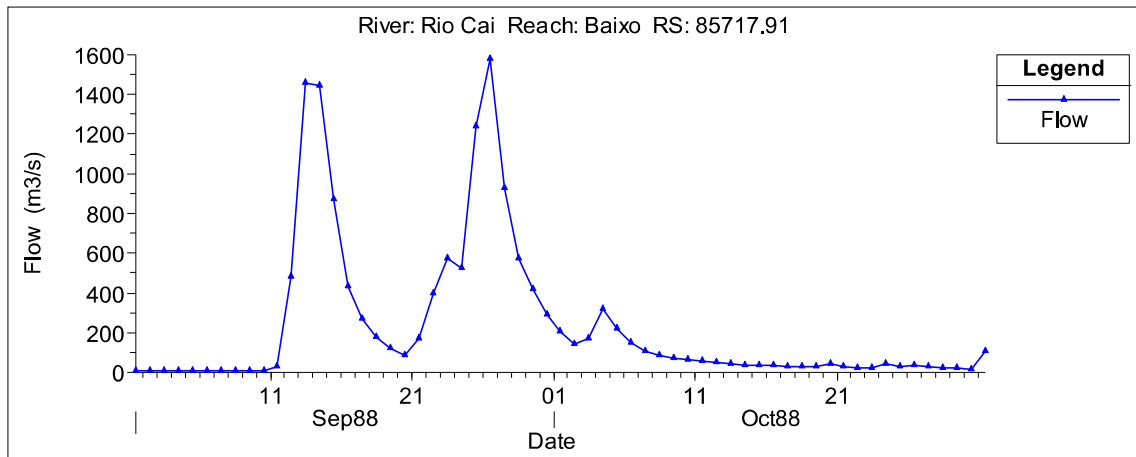
Figura 4.4: Séries de vazões diárias em Barca do Caí (a) e níveis diários na Praça da Harmonia (b) durante a cheia de 1984

A calibração foi realizada manualmente através da comparação visual da série de níveis observados e calculados na Barca do Caí e em Montenegro. Testes iniciais no modelo revelaram que o coeficiente de Manning definido no canal principal e na sua planície de inundação (atrito de fundo) representa o parâmetro mais sensível para o ajuste do nível nas seções com dados observados.

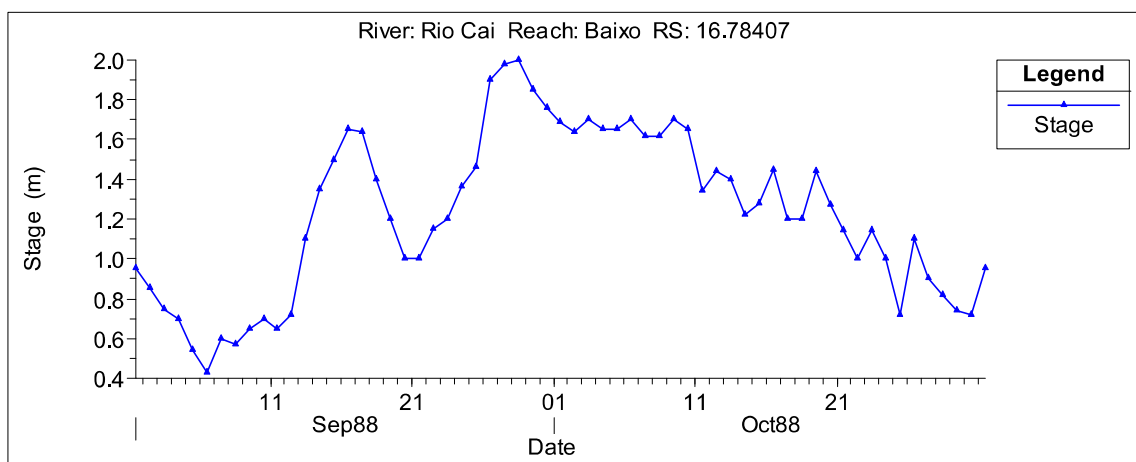
Outros parâmetros hidráulicos disponíveis no modelo ou são pouco sensíveis sobre a oscilação do nível d'água durante um evento de cheia ou há uma carência de dados observados para avaliação desses coeficientes de maneira mais exata como, por exemplo, ocorre no caso das pontes.

Para o ajuste do coeficiente de Manning foram utilizadas as recomendações apresentadas em tabelas da literatura, a partir do estudo das imagens de satélite disponíveis e do levantamento aerofotogramétrico realizado. Assim, procurou-se atribuir valores de Manning compatíveis com as distintas tipologias de cobertura do solo na planície de inundação e de características de revestimento na calha (vegetação e seixos).

Vale destacar que o principal norteador desse processo foi a comparação dos níveis simulados e observados nas seções com dados.



(a)

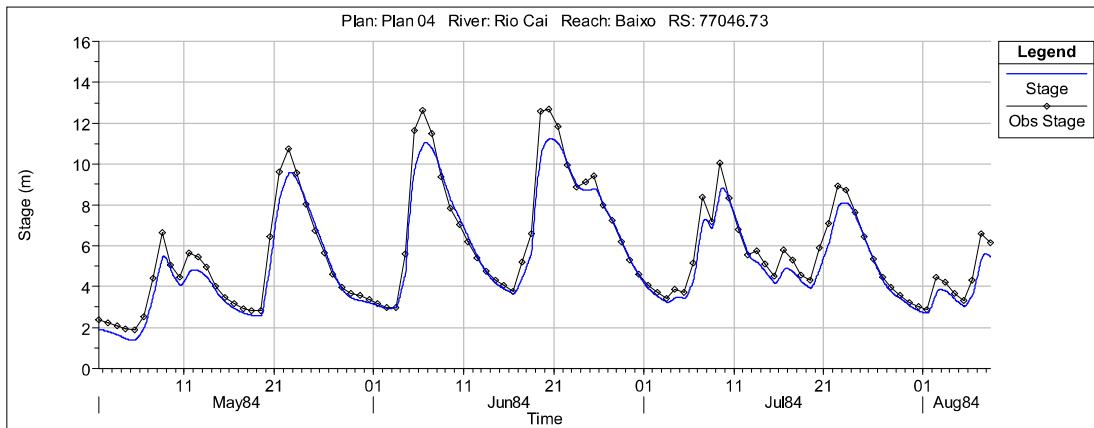


(b)

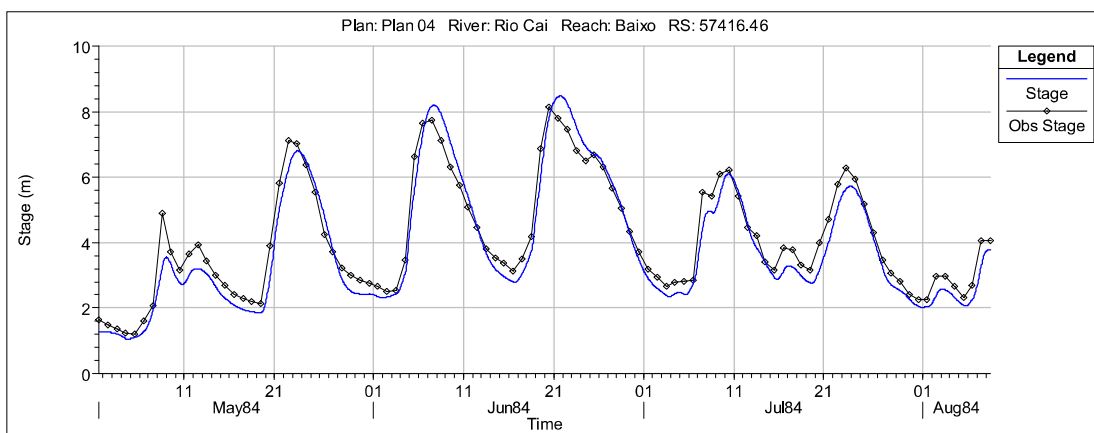
Figura 4.5: Séries de vazões diárias em Barca do Caí (a) e níveis diários na Praça da Harmonia (b) durante a cheia de 1988

4.1.4.1 Resultado para a Cheia de 1984

A Figura 4.6 apresenta a comparação entre os níveis observados e simulados nas seções de Barca do Caí e Montenegro para o evento de cheia de 1984. De uma maneira geral o modelo foi capaz de reproduzir as oscilações de nível do Rio Caí no período simulado. Na seção de montante, Barca do Caí, o modelo obteve um bom desempenho para os níveis mínimos e médios, porém mostrou uma tendência em subestimar os picos. Por outro lado, em Montenegro, o modelo superestimou alguns picos e subestimou os valores mínimos, observados entre eventos. Na sequência, é apresentado o perfil de fundo e da linha d'água simulado no momento da vazão máxima (Figura 4.7). Os resultados evidenciam que durante a cheia a condição de jusante não influencia os níveis em Montenegro.



(a)



(b)

Figura 4.6: Comparação entre os níveis diários observados e calculados em Barca do Cai (a) e Montenegro (b) – Cheia de 1984

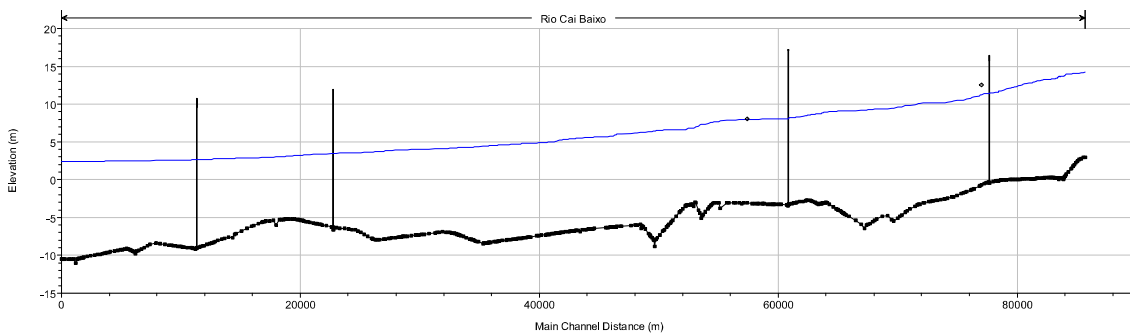
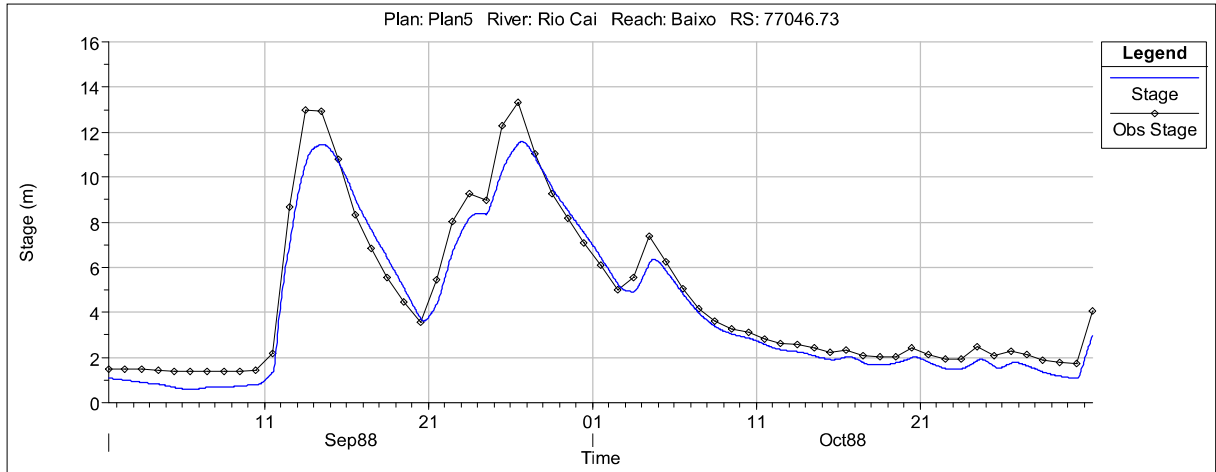


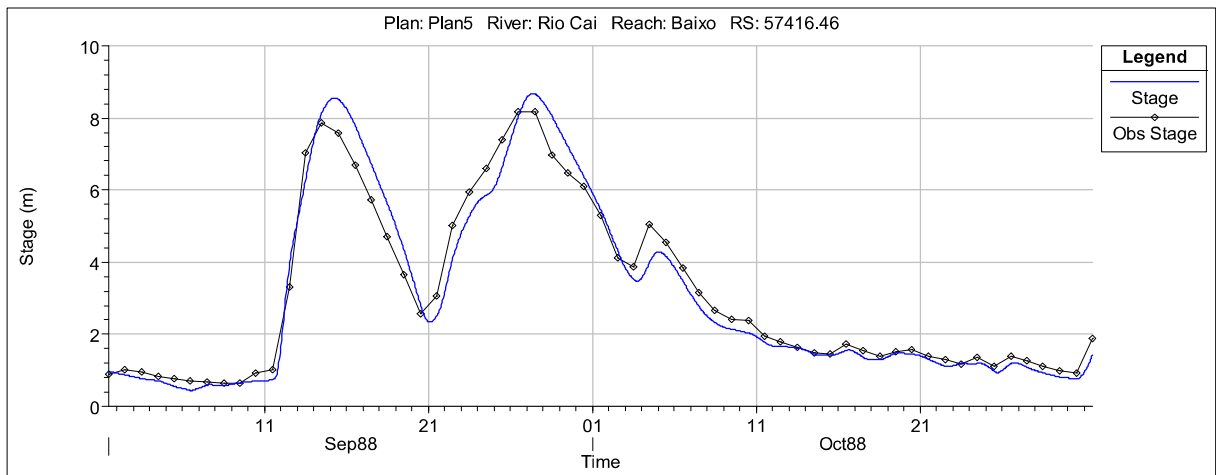
Figura 4.7: Perfil longitudinal de níveis no trecho simulado durante a vazão de pico observada na cheia de 1984. Os pontos identificam o nível observado em Barca do Cai (montante) e Montenegro (jusante)

4.1.4.2 Resultado para a Cheia de 1988

A Figura 4.8 apresenta a comparação entre os níveis observados e simulados nas seções de Barca do Cai e Montenegro para o evento de cheia de 1988. De uma maneira geral o modelo também foi capaz de reproduzir as oscilações de nível do Rio Cai no período simulado, no entanto na avaliação de cada seção de controle o mesmo comportamento observado na cheia de 1984 foi reproduzido para a cheia de 1988, ou seja: a) Barca do Cai: bom desempenho para os níveis mínimos e médios, com tendência para subestimar os picos, b) Montenegro: o modelo superestimou os picos e subestimou os valores mínimos ou eventos menos intensos.



(a)



(b)

Figura 4.8: Comparação entre os níveis diários observados e calculados em Barca do Caí (a) e Montenegro (b) – Cheia de 1988.

Na sequência, é apresentado o perfil de fundo e da linha d'água simulado no momento da vazão máxima (Figura 4.9). Os resultados evidenciam que durante a cheia a condição de jusante não influencia os níveis em Montenegro.

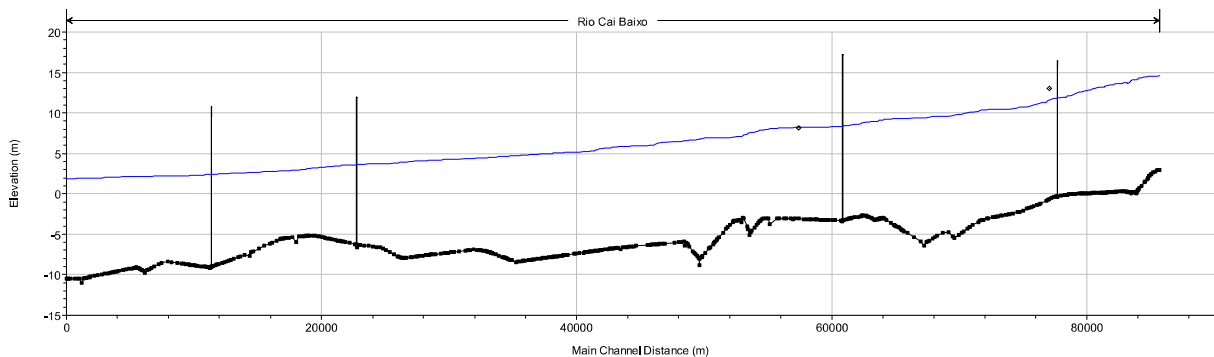


Figura 4.9: Perfil longitudinal de níveis no trecho simulado durante a vazão de pico observada na cheia de 1988. Os pontos identificam o nível observado em Barca do Caí (montante) e Montenegro (jusante)

4.2 Mapas de Inundações

Os mapas aqui apresentados constituem-se no resultado e no produto final desta etapa do projeto, e foram elaborados conforme os Tempos de Retorno indicados anteriormente: 5, 20, 50 e 100 anos.

Tais mapas permitem o zoneamento das áreas de inundação, uma vez que apresentam os requisitos para esta tarefa, que abrange as seguintes etapas:

- a) determinação dos riscos das enchentes;
- b) mapeamento das áreas de inundação;
- c) zoneamento.

No primeiro item (a), são utilizados os resultados das simulações hidrológicas nos quais foram ajustadas as relações entre vazões e níveis, associando-as a um determinado tempo de retorno.

Os mapas de inundação podem ser de dois tipos: mapas de planejamento, que definem as áreas atingidas por cheias de tempos de retorno escolhido e os mapas de alerta, que é um mapa de operação, e informa em cada esquina ou ponto de controle, o nível da régua no qual inicia a inundação. No caso deste trabalho, busca-se a elaboração do primeiro tipo de mapa.

Na etapa de planejamento do empreendimento, deve-se definir o risco hidrológico com o qual se deseja trabalhar. Neste contexto, deve-se definir o risco de um projeto de acordo com os objetivos do projeto e, dentro destas condições de risco, explorar as situações mais desfavoráveis. Em hidrologia, é comum associar aos eventos extremos um tempo de retorno.

Os resultados da modelagem hidráulica com o utilitário HEC-RAS, foram exportados para o HEC-GeoRAS, onde, mediante a ferramenta PostRAS se processa e combina as informações geográfica e hidráulica para gerar os mapas de elevação da superfície da água e classificação das zonas susceptíveis a inundação de acordo com a metodologia proposta.

São apresentados em anexo 06 mapas de inundação, todos abrangendo os TRs: 5, 25 e 100 anos.

- 01 mapa do trecho do baixo rio Caí de Harmonia até Montenegro;
- 01 mapa do trecho do baixo rio Caí de Montenegro até a foz no rio Jacuí;
- 04 mapas das zonas urbanas:
 - Montenegro
 - Pareci Novo;
 - São Sebastião do Caí. e
 - Harmonia.