



**UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS**  
**DA TERRA E DO MAR**  
**Curso de Engenharia Ambiental**

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE HIDROLÓGICA NO MUNICÍPIO DE  
NOVA TRENTO (SC)**

Ac: Mateus Davino Ferreira

Orientador: Júlio Cesar Leão, MSc.

Itajaí, novembro/2016

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE HIDROLÓGICA NO MUNICÍPIO DE  
NOVA TRENTO (SC)**

Mateus Davino Ferreira

Monografia apresentada à banca examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Itajaí, novembro/2016

UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA TERRA E DO MAR  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

MATEUS DAVINO FERREIRA

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE HIDROLÓGICA NO MUNICÍPIO DE NOVA TRENTO, SC

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental,  
para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Aprovado em 21/11/2016.

Prof. Júlio César Leão, MSc. (Orientador)  
CTTMar

Prof. Franklin Misael Pacheco Tena, Dr.  
CTTMar

Prof. Héctor Raúl Muñoz Espinosa, MSc.

CTTMar

Itajaí, SC

---

## DEDICATÓRIA

Ao meu avô paterno Davino Ferreira (*In memorian*) e a minha madrinha Meri Pedrotti (*In memorian*) que não puderam acompanhar o fim dessa etapa. Aos meus pais, Airton e Eliani que possibilitaram todas as minhas oportunidades de estudos.

## AGRADECIMENTOS

Aos amigos Iago Matheus Dalbosco Rachadel, formando de Engenharia Florestal e Luiz Augusto Voltolini, acadêmico de Direito, pela amizade e disposição para auxiliar as saídas de campo para aquisição de dados.

Ao colega e amigo, Arquiteto Cleber Battisti Archer, pelo companheirismo, pela colaboração nas saídas de campo para aquisição de dados e empréstimo de equipamentos de segurança.

Ao amigo Paulo Henrique de Souza, formando de Engenharia Industrial Mecânica, em função dos auxílios e por compartilhar seus conhecimentos em eletrônica, programação e calibração de equipamentos.

A Defesa Civil do município de Nova Trento, pelo empréstimo de trena a laser e intermédio junto Diretoria de Recursos Hídricos (DRHI – SDS) na aquisição dos dados espaciais da área de estudo.

Ao meu pai Airton Ferreira, meu irmão Marcos Vinícius Ferreira e minha companheira Amanda Elisa Dell'Antonia pelo auxílio nas saídas de campo para aquisição de dados.

Ao professor MSc. Delamar Heleno Schumacher, por doar seu tempo e equipamentos para realização da primeira saída de campo para aquisição de dados topográficos da seção transversal de estudo.

Aos professores Dr. Franklin Misael Pacheco Tena e MSc. Héctor Raul Muñoz Espinosa pelo privilégio de realizarem a avaliação deste trabalho.

Aos professores Dr. Franklin Misael Pacheco Tena e MSc. Júlio Cesar Leão pela oportunidade de monitoria no Laboratório de Hidráulica e pela convivência ao longo do período de 24 meses.

Ao professor MSc. Júlio Cesar Leão, por todo seu tempo e dedicação iniciados desde o 5º período, pelas orientações de estágio obrigatório, conselhos e encaminhamentos profissionais, pelas conversas e pela amizade.

## RESUMO

O centro urbano do município de Nova Trento está localizado em uma planície aluvial, a qual é transpassada pelo rio do Braço, onde periodicamente ocorrem enchentes e inundações que causam problemas ambientais e econômicos. O registro histórico de eventos pluviométricos, já comprova a necessidade de um planejamento do crescimento urbano levando em consideração as características hidrológicas da bacia. Para auxiliar tal planejamento este trabalho propõe determinar as áreas de inundaçāo no perímetro urbano. Para tanto, foi efetuado um levantamento de dados pluviométricos e fluviométricos, os quais foram submetidos a tratamento estatístico e de modelagem hidráulica de eventos extremos, bem como a um sistema de informação geográfica. A partir de métodos estatísticos e aplicação do modelo hidráulico HEC-RAS, foram simulados cenários de inundaçāo correspondentes a cheias de diferentes tempos de retorno, incluindo as causadoras de inundações frequentes e as de grandes inundações. A partir do modelo digital do terreno, modelo digital de superfície, ortofotos de cor natural e o software ArcGIS, foram obtidos dados para caracterizar a morfologia da sub-bacia e uso do solo, auxiliando a interpretação espacial da área de estudo. Por fim, foram elaboradas cartas temáticas das áreas inundáveis nos cenários simulados com diferentes vazões, em um meio de visualização digital, além de gerar informações sobre as características da bacia hidrográfica da área de estudo.

**Palavras-chaves:** Bacia hidrográfica, inundaçāo, Nova Trento.

## ABSTRACT

The Nova Trento downtown is located in a flood plain, which is pierced by the Braço River, which occur periodically floods that cause environmental and economic problems. The historical record of rainfall events, as proof of the need for planning of urban growth taking into account the hydrological characteristics of the basin. To assist such planning this work proposes to determine the flood areas in the urban area. It will be made a survey of rainfall and streamflow data, which were submitted to statistical analysis and hydraulic modeling of extreme events, as well as a geographic information system. Statistical methods and hydraulic model HEC-RAS were used to simulated flood scenarios for floods with different return times, including causing frequent floods and large floods. From the digital terrain model, digital surface model, natural color orthophotos and ArcGIS software, data were obtained to characterize the morphology of the sub-basin and land use, helping the spatial interpretation of the study area. Finally, were produced thematic maps of the flooded areas in the simulated scenarios, with different flow rates in an environment of digital display, also generating information about the characteristics of the hydrographic basin of the study area.

**Keywords:** Hydrographic basin, flood, Nova Trento.

## SUMÁRIO

Dedicatória .....	i
Agradecimentos.....	iii
Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Sumário .....	vi
Lista de Figuras .....	ix
Lista de Tabelas .....	xiii
Lista de Equações .....	xiv
Lista de Abreviaturas .....	xv
1    Introdução.....	1
1.1    Objetivos .....	2
1.1.1    Geral .....	2
1.1.2    Específicos .....	2
2    Fundamentação Teórica .....	3
2.1    Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica .....	3
2.2    Características Morfológicas e Morfométricas .....	5
2.2.1    Características da Bacia Hidrográfica .....	6
2.3    Características do Relevo.....	9
2.3.1    Características da Bacia Hidrográfica .....	9
2.3.2    Geomorfologia da bacia hidrográfica .....	10
2.3.2.1    Textura .....	11
2.4    Análise Hidrológica .....	12

---

2.4.1	Escoamento Superficial .....	12
2.4.1.1	Curva de Permanência .....	13
2.4.1.2	Curva Chave .....	13
2.4.1.3	Tempo de Concentração .....	14
2.4.1.4	Hidrograma.....	14
2.4.1.5	Modelos Precipitação-Vazão .....	16
2.4.1.6	Distribuição Estatística de Eventos extremos .....	18
2.4.2	Modelagem.....	20
2.5	Área de Estudo.....	24
3	Metodologia .....	28
3.1	Levantamento de Dados.....	28
3.1.1	Dados Pluviométricos .....	28
3.1.2	Dados de Nível .....	29
3.1.3	Estimativa de Vazão .....	29
3.1.3.1	Montagem e Calibração do Molinete .....	31
3.2	Características Morfológicas e Morfométricas .....	33
3.3	Características do Relevo.....	34
3.4	Área da Modelagem .....	35
3.4.1	Uso e Ocupação do Solo.....	36
3.5	Precipitação Máxima .....	37
3.6	Escoamento Superficial .....	38
3.7	Modelagem.....	38
3.7.1	Análise da Modelagem Hidráulica.....	42

---

4	Resultados e Discussão .....	43
4.1	Caracterização da Sub-bacia Hidrográfica do Rio do Braço .....	43
4.2	Estimativa de Eventos Extremos .....	48
4.3	Levantamento de Seção Transversal.....	49
4.4	Hidrograma.....	54
4.5	Modelagem Hidráulica .....	55
5	Considerações Finais .....	63
6	Referências .....	66
	Anexos .....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Extensão média do escoamento superficial. Fonte: Villela (1975 apud STUDART).8	8
Figura 2: Tipo de solo encontrados na sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço. Adaptado de: EPAGRI (2008).....	11
Figura 3: Pontos de coleta de amostras. Coleta 01 material argiloso; Coleta 02 material cascalhoso; Coleta 03 material arenoso. Fonte: GGES (2014).....	12
Figura 4: Diferença entre hidrogramas. Fonte: Adaptado de CHOW (1994). ..	15
Figura 5: Representação matricial da convolução de hidrograma. Fonte: Adaptado de CHOW (1994).....	18
Figura 6: Representação do Teorema de Bernoulli. Fonte: Adaptado de CAMPOS (2011)..	21
Figura 7: Influência da interação do fluido com as paredes do canal sob a velocidade ao longo da coluna de água. ..	24
Figura 8: Delimitação e localização da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.....	25
Figura 9: Análise de correlação do número de habitantes do município de Leoberto Leal. ..	26
Figura 10: Análise de correlação do número de habitantes do município de Nova Trento. ..	26
Figura 11: Representação do método de cálculo de vazão por área média. ..	30
Figura 12: Vista do sensor de vazão.....	31
Figura 13: Vista total do molinete.....	32
Figura 14: Calibração do molinete utilizando bomba de recalque. ..	32
Figura 15: Curva de calibração do molinete.....	33
Figura 16: Delimitação da área para aplicação do modelo hidráulico.....	35
Figura 17: Amostragem de assinaturas espectrais para classes de uso e ocupação do solo. ..	37
Figura 18: Exemplos de assinaturas digitais de distintos usos e ocupações de solo. ..	37
Figura 19: Fluxograma das principais etapas de processamento de dados para entrada e execução da modelagem.....	39
Figura 20: Modelo digital tridimensional da área a ser aplicada a modelagem hidráulica....	40
Figura 21: Feições de entrada para o modelo hidráulico.....	41
Figura 22: Hipsometria da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.....	44

---

Figura 23: Perfil altimétrico do principal curso da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.	45
Figura 24: Declividades da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.....	45
Figura 25: Hierarquização de ordens dos cursos de água na região da desembocadura do Rio do Braço. ....	46
Figura 26: Uso e ocupação do solo da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.....	47
Figura 27: Curva de permanência de vazões.....	48
Figura 28: Comparativo entre modelos de estimativa de precipitações extremas e observadas. ....	49
Figura 29: Vista da localização do marco georreferenciado.....	50
Figura 30: Croqui da seção transversal obtida a partir do levantamento topográfico realizado em 06 de agosto de 2016. ....	50
Figura 31: Mapa de localização dos pontos de referência e seção transversal.....	51
Figura 32: Realização de medições de profundidade e velocidade ao longo da referência transversal. ....	52
Figura 33: Correlação entre vazão e nível observados. ....	53
Figura 34: Comparativo entre perfil transversal observado em levantamento topográfico e perfil transversal estimado por modelo digital de elevação. ....	54
Figura 35: Hidrograma da área de estudo.....	54
Figura 36: Exemplo de filtragem de pontos em seção transversal. ....	56
Figura 37: Simulação hidráulica de vazão normal sobreposta ao modelo de geometria. ....	57
Figura 38: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de condição normal, Tr de 10 e 25 anos com enfoque no ponto crítico 1.....	59
Figura 39: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de Tr 75, 100 e 200 anos com enfoque no ponto crítico 1.....	59
Figura 40: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de condição normal, Tr de 10 e 25 anos com enfoque no ponto crítico 2.....	60
Figura 41: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de Tr 75, 100 e 200 anos com enfoque no ponto crítico 2.....	60
Figura 42: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de condição normal, Tr de 10 e 25 anos com enfoque no ponto crítico 3. ....	61

---

Figura 43: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de Tr 75, 100 e 200 anos com enfoque no ponto crítico 3.....	61
Figura 44: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de condição normal, Tr de 10 e 25 anos com enfoque no ponto crítico 4 .....	62
Figura 45: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de Tr 75, 100 e 200 anos com enfoque no ponto crítico 4.....	62
Figura A 1: Croqui da seção transversal obtida na 1 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	69
Figura A 2: Croqui da seção transversal obtida na 2 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	69
Figura A 3: Croqui da seção transversal obtida na 3 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	69
Figura A 4: Croqui da seção transversal obtida na 4 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	70
Figura A 5: Croqui da seção transversal obtida na 5 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	70
Figura A 6: Croqui da seção transversal obtida na 6 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	70
Figura A 7: Croqui da seção transversal obtida na 7 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	71
Figura A 8: Croqui da seção transversal obtida na 8 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	71
Figura A 9: Croqui da seção transversal obtida na 9 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	71
Figura A 10: Croqui da seção transversal obtida na 10 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	72
Figura A 11: Croqui da seção transversal obtida na 11 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	72
Figura A 12: Croqui da seção transversal obtida na 12 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	72
Figura A 13: Croqui da seção transversal obtida na 13 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	73
Figura A 14: Croqui da seção transversal obtida na 14 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	73
Figura A 15: Croqui da seção transversal obtida na 15 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	73
Figura A 16: Croqui da seção transversal obtida na 16 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	74
Figura A 17: Croqui da seção transversal obtida na 17 <sup>a</sup> campanha e dados resumidos. ....	74
Figura D 1: Panorama completo do cenário de modelagem de inundação com tempo de retorno de 2 anos.....	77
Figura D 2: Panorama completo do cenário de modelagem de inundação com tempo de retorno de 5 anos.....	77
Figura D 3: Panorama completo do cenário de modelagem de inundação com tempo de retorno de 10 anos.....	78

---

Figura D 4: Panorama completo do cenário de modelagem de inundaço com tempo de retorno de 25 anos.....	78
Figura D 5: Panorama completo do cenário de modelagem de inundaço com tempo de retorno de 50 anos.....	79
Figura D 6: Panorama completo do cenário de modelagem de inundaço com tempo de retorno de 75 anos.....	79
Figura D 7: Panorama completo do cenário de modelagem de inundaço com tempo de retorno de 100 anos.....	80
Figura D 8: Panorama completo do cenário de modelagem de inundaço com tempo de retorno de 200 anos.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equações de tempo de concentração. Fonte: Adaptado de SILVEIRA, 2005.....	14
Tabela 2: Relação de classe de solo e características do terreno. Fonte: Adaptado de TUCCI (1994).....	16
Tabela 3: Identificação das estações pluviométricas.....	29
Tabela 4: Identificação das estações de nível.....	29
Tabela 5: Classificação do relevo. Fonte: Adaptado de EMBRAPA (1979). .....	34
Tabela 6: Valores utilizados para estimativa do CN médio da área de estudo. ....	47
Tabela 7: Estimativa de eventos de precipitações extremas através do modelo Log-Pearson III. .....	49
Tabela 8: Histórico de medições de vazão.....	52
Tabela 9: Vetor unitário estimado para a precipitação unitária ocorrida entre 05/09 (23h01min) e 06/09 (09h00min).....	55
Tabela 10: Vazões de pico utilizadas para simulação hidráulica e respectivos riscos de ocorrência dentro dos horizontes de tempo. ....	56
Tabela 11: Áreas e percentuais de inundação para os cenários modelados.....	58

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Densidade de drenagem.....	7
Equação 2: Coeficiente de compacidade.....	7
Equação 3: Fator de forma.....	8
Equação 4: Extensão média de escoamento superficial.....	8
Equação 5: Sinuosidade dos cursos de água.....	9
Equação 6: Probabilidade empírica de Weibull.....	13
Equação 7: Modelo de curva chave para estimativa de vazão.....	13
Equação 8: Estimativa de CN médio.....	16
Equação 9: Potencial máximo de retenção do modelo SCS.....	17
Equação 10: Perdas iniciais do modelo SCS.....	17
Equação 11: Equação de precipitação efetiva do modelo SCS.....	17
Equação 12: Equação de tempo de pico do modelo SCS.....	17
Equação 13: Equação de vazão de pico do modelo SCS.....	18
Equação 14: Distribuição Gumbell.....	19
Equação 15: Distribuição log-Pearson do tipo III.....	19
Equação 16: Risco de enchentes em "n" anos.....	20
Equação 17: Teorema de Bernoulli.....	21
Equação 18: Número de Froude.....	22
Equação 19: Número de Reynolds.....	22
Equação 20: Equação de velocidade de fluidos em canais abertos de Chézy.....	23
Equação 21: Equação de velocidade de fluidos em canais abertos de Manning.....	23
Equação 22: Cálculo das áreas por aproximação geométrica.....	30
Equação 23: Equação de governo do molinete.....	33
Equação 24: Curva chave estimada para a seção transversal de estudo.....	53

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ANA – Agência Nacional das Águas

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

ESRI – Environmental Systems Research Institute

MDE – Modelo Digital e Elevação

NRCS – Natural Resources Conservation Service

SCS – Soil Conservation Service

SDS – Secretaria de Desenvolvimento Sustentável

SIG – Sistema de Informação Geográfica

USGS – Serviço Geológico dos Estados Unidos

## 1 INTRODUÇÃO

A ocupação urbana foi associada a áreas próximas aos rios desde os primeiros tempos da história da humanidade, seus entornos têm sido ocupados pela oferta de água para abastecimento humano, transporte, produção de energia, além de outras atividades que acabaram estimulando cada vez mais a ocupação de tais áreas, as quais são conhecidas como fundos de vale, várzeas ou planícies de inundação, nomes atribuídos em função de estarem periodicamente sujeitas a inundação. Conforme Muñoz-Espinosa (1984), as inundações que ocorrem em função das cheias devem ser consideradas como eventos naturais, porém a ocupação do homem nessas áreas vulneráveis faz com que ocorra um conflito, tornando o episódio natural em um evento de dimensões potencialmente catastróficas, ocasionando danos ambientais, econômicos e sociais.

Estudos revelam que alterações no clima acrescentam a amplitude das variáveis meteorológicas, destacando-se a temperatura e precipitação, que causam episódios de estiagens, tempestades e inundações (EPAGRI/CIRAM, 2014). Essas ocorrências podem incidir em perdas econômicas, de vidas humanas, de biodiversidade, aumento do nível dos oceanos, perdas na agricultura e na geração de energia hidroelétrica, afetando algumas regiões do Brasil. Visto os sinais mencionados, se faz necessário o estudo dos processos e consequentes alterações sob os sistemas hidrológicos na sua unidade mais elementar (bacia hidrográfica), para ser possível atuar na prevenção através de medidas mitigatórias, buscando assegurar o direito fundamental e constitucional do cidadão que é a segurança à vida, delegando para a Defesa Civil o planejamento de ações que possam promover a defesa permanente contra as situações emergenciais, garantindo a execução das ações de socorro, assistência às vítimas e restabelecimento dos serviços essenciais quando homologado a situação de emergência ou de calamidade pública, bem como para as ações de reconstrução e de prevenção.

O município de Nova Trento teve o início de seu povoamento em 1875 às margens do Rio do Braço, possui população de 12.179 habitantes (IBGE, 2010) e tem como municípios limítrofes Botuverá, Brusque, Canelinha, Leoberto Leal, Major Gercino, São João Batista. Está inserido na bacia hidrográfica do Rio Tijucas que abrange os municípios de Angelina, Biguaçu, Canelinha, Leoberto Leal, Major Gercino, Nova Trento, Rancho Queimado, São João Batista e Tijucas, a qual possui área de drenagem de 2.371 km<sup>2</sup>, densidade de drenagem de 1,68 km/km<sup>2</sup> e vazão mensal de permanência de 98% do tempo de 16,6 m<sup>3</sup>/s no posto fluviométrico de São João Batista (latitude 27°16'00" e longitude 48°51'00"), cuja área de drenagem é de 936,75km<sup>2</sup>.

Dentro dos limites da bacia hidrográfica do Rio Tijucas, encontra-se a sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço, correspondendo a 675,72 km<sup>2</sup> (28,50%) da área total da bacia hidrográfica na qual está inserida. Atualmente a situação de ocupação da área de entorno do Rio do Braço ocorre de forma lenta, porém sem qualquer critério. Considerando que eventos hidrológicos extremos podem provocar catástrofes sobre os meios ambientais, econômicos e sociais, é necessário compreender os mecanismos de formação e estimativas de intensidade dos eventos para avaliação de possíveis áreas de risco para posterior planejamento, possibilitando a convivência pacífica da sociedade e desses eventos de elevado índice hídrico.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Determinar as áreas inundáveis em caso de eventos extremos no município de Nova Trento (SC), considerando cenários fluviométricos de diversos períodos de retorno.

### 1.1.2 Específicos

- a) Analisar série histórica de dados fluviométricos e pluviométricos.
- b) Gerar perfis transversais de vazão do rio do Braço (Nova Trento-SC) no trecho a montante e a jusante da cidade.
- c) Analisar a relação entre cota e vazão do rio do Braço (Nova Trento-SC) na região do posto fluviométrico do CEMADEN.
- d) Modelar cenários para diferentes tempos de retorno de inundações recorrentes; de inundações pouco frequentes; e de grandes inundações.
- e) Analisar os cenários modelados, o mapa de uso real do solo e áreas suscetíveis a inundações.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A bacia hidrográfica consiste na área de captação natural de precipitação, que converge todos os escoamentos para o ponto exutório, sendo delimitada pelos divisores de água, constituídos pelas regiões mais elevadas do seu entorno. É sobre a bacia hidrográfica que irá ser desenvolvido o ciclo hidrológico, que será influenciado pelo aquecimento do ar, solo e água através da energia do sol, resultando nos processos de evaporação, nos movimentos de massas de ar, formação de nuvens, chuvas, transpiração vegetal, infiltração e escoamentos. Considera-se que em escala global o ciclo hidrológico seja fechado, dessa forma se pode concluir que desde a formação do planeta Terra até o presente existe a mesma quantidade de água, porém verifica-se que o ciclo hidrológico pode apresentar subciclos em escala regional, tornando a distribuição do volume total de água na hidrosfera variável em função do tempo e do espaço (COLLISCHONN, 2008). As entradas e saídas de água em uma bacia hidrográfica refletem o balanço hídrico, o qual depende de características peculiares de cada bacia, como a capacidade de infiltração de água no solo, cobertura vegetal e outros.

### 2.1 CICLO HIDROLÓGICO E A BACIA HIDROGRÁFICA

O ciclo hidrológico consiste no fenômeno de circulação fechada da água entre a superfície da Terra até a atmosfera que é iniciado através da radiação emanada pelo sol, em conjunto com a rotação do planeta Terra e a gravidade. Entende-se por superfície terrestre a camada que cobre os continentes e o reservatório constituído pelos oceanos. Por outro lado, compreende-se na atmosfera uma camada de gases que envolve um planeta e que é retida pela sua atração gravitacional, abrigando uma grande diversidade de condições físicas. Para o estudo e aplicação da hidrologia, a camada que concentra a maior parcela dos fenômenos meteorológicos de interesse de estudo é a troposfera, que possui espessura aproximada de 6 a 18 km e concentra a maior parte da umidade.

A circulação de água pode ocorrer com sentido da superfície terrestre para a atmosfera ou de forma contraria. O primeiro tipo refere-se ao fluxo onde a água se encontra em estado líquido ou sólido na superfície e em função dos fenômenos de evaporação ou de transpiração biológica, influenciados pela radiação solar, transforma-se em vapor e migra para a atmosfera. Por outro lado, quando ocorre em sentido inverso o fluxo pode se dar através dos estados líquido ou sólido da água, precipitada através de chuva, granizo, neve, orvalho, neblina ou geada. Considerando os elementos de evaporação e transpiração é possível afirmar que o ciclo hidrológico é um acontecimento fechado apenas a nível global, pois as características físicas e geográficas de cada local dependem de cada região, dessa forma, as precipitações são diferenciadas e quando observado em escala menor, esse fenômeno fica evidente.

O ciclo hidrológico tem início com a formação de vapor de água, originado das massas de água terrestres que são aquecidas pela radiação solar. Visto que o vapor de água está contido na atmosfera e submisso às condições meteorológicas da troposfera, o mesmo pode se aglutinar em particular maiores que se matem em suspensão na coluna de ar. O continuo agrupamento de partículas de água formam as nuvens, dessa forma quando o tamanho e massa das partículas aglutinadas forem suficientemente maiores do que a força da gravidade e superem os movimentos de turbulência ascendentes, irá ocorrer o fenômeno da precipitação na forma de neve ou granizo, quando as partículas aglutinadas estiverem no estado sólido ou na tradicional forma de chuva, quando em estado líquido. A chuva é a causa mais importante dos processos hidrológicos de interesse da engenharia, sendo marcada por uma grande aleatoriedade espacial e temporal (COLLISCHONN, 2008), caracterizada pelas variáveis da sua altura (lâmina precipitada), intensidade, duração e frequência. Pelo termo duração, entende-se o tempo durante o qual a chuva cai, a altura expressa à espessura média da lâmina de água que cobriria a região atingida se esta fosse plana e impermeável. A intensidade de uma chuva é a razão de sua altura precipitada pela sua duração, é expressa em mm/hora. Por outro lado, a frequência é o número de ocorrência de eventos iguais ou superiores a um determinado evento de chuva, normalmente, chuvas muito intensas têm frequência baixa, isto é, de rara ocorrência, pois, à medida que uma chuva aumenta sua intensidade, a frequência de ocorrência diminui. Dessa forma a estimativa do período de tempo em que um evento pluviométrico seja superado ou igualado, se pode determinar por meio do tempo de retorno ( $T_r$ ), sendo expresso pelo inverso da probabilidade de ocorrência de um determinado evento em um ano qualquer. Ressalva-se que a chuva está sujeita a variabilidade espacial, associada à movimentação de massas de ar, relevos acentuados e outros fatores, de modo que durante um evento de precipitação se pode registrar chuva em um dado ponto, enquanto em outro não se verifique sua ocorrência. A chuva também pode variar conforme a sazonalidade, ou seja, os eventos serão influenciados pelas estações do ano, muito secas ou muito úmidas.

A medida que a precipitação ocorre e antes de atingir o solo já existem perdas por evaporação, podendo ser tão significativas que em certas localidades o precipitado é totalmente vaporizado. Evidentemente, na maioria dos casos o precipitado cai sobre o solo ou sobre as plantas, que interceptam o evento através de suas folhas e caules, onde podem acumular ou evaporar a água. Quando a precipitação excede a capacidade de carga vegetal a mesma é direcionada para o solo. A passagem da água por todo o perfil do solo preenche os espaços que eram originalmente ocupados pelo ar e a transição desde a superfície até as camadas mais inferiores pode ser considerada como infiltração. Esse processo é importante para a recarga de aquíferos, manter o fluxo nos rios durante períodos de estiagem, reduzir o

escoamento superficial, implicando em menos erosão e minimização de cheias, além de propiciar umidade para o crescimento vegetal, que irá influenciar o escoamento através da interceptação do seu dossel arbóreo e oportunizar a infiltração através dos espaços de vazios ocasionados pelas suas raízes. Quando há volume água retido nas plantas e no solo atinge o seu limiar de saturação o excedente se torna o escoamento superficial que equivale a ação ou efeito de escoar fluidos, os quais são regidos pela força da gravidade e fricção.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E MORFOMÉTRICAS

Conforme Ventura (2011) as características físicas e geográficas da bacia são decisivas para a propensão a enchentes, sendo os eventos hidrológicos e o escoamento superficial diretamente influenciado pelas particularidades físicas de cada bacia hidrográfica, compreendendo sua área de drenagem, forma e características do relevo (BORSATO, 2005).

Para Collischonn (2008) a área de drenagem é um dado fundamental para definir a potencialidade hídrica de uma bacia, uma vez que a bacia é a região de captação da água da chuva, pela relação entre a área da bacia hidrográfica e pela lâmina precipitada ao longo de um determinado intervalo de tempo irá definir o volume de água recebido ao longo deste período.

Segundo Collischonn (2008) o comprimento da drenagem principal é um atributo básico para se determinar o tempo de viagem da água que atinge todo o sistema, sendo essa velocidade influenciada pelo relevo, que irá acentuar ou minimizar esse fator em função do grau de declividade da área da bacia hidrográfica, onde altas declividades irão acarretar uma maior velocidade em função da baixa oportunidade de infiltração da água no solo. Por outro lado, tipos de solo, formação geológica, vegetação, usos e ocupação do solo, também são fatores importantes na determinação do volume de água precipitada que vai infiltrar ou que vai escoar pela superfície. Os usos e ocupações na área da bacia hidrográfica podem alterar as características naturais a partir da impermeabilização do solo por meio de ambientes urbanos.

Durante eventos de excesso hídrico em decorrência de chuvas intensas ocorre um acréscimo ao escoamento superficial, gerando um fluxo de água atípico na calha do rio, pois a vazão de uma determinada seção será o resultado da maior parte da chuva que não conseguiu infiltrar no solo e escoou instantaneamente para os rios, provocando inundações em locais que geralmente não são suscetíveis a tal fenômeno. Isso se deve, pois inicialmente a precipitação será absorvida totalmente pelo solo que está em uma condição seca, porém ao passo em que os poros vazios são ocupados pela água, à infiltração tenderá a diminuir, limitada pela capacidade do solo em transferir a água para camadas mais profundas (COLLISCHONN, 2008).

Para Muñoz-Espinosa (1984) as cheias com maior potencial de ocorrência na região sul do Brasil, são as de origem climatológicas, geradas por precipitações muito intensas ou prolongadas, ou pela combinação de ambos os efeitos. Ainda se pode considerar como uma característica básica de uma cheia, o estudo do seu hidrograma, pelo qual se pode compreender a sequência cronológica dos volumes de água que atravessam uma determinada seção transversal de um curso de água em cada unidade de tempo.

Até que o nível do rio não extrapole a calha fluvial, temos o que se conhece apenas por cheia, no entanto, como os fenômenos de cheia estão geralmente associados a fortes chuvas, o limite físico desse termo é facilmente ultrapassado, fazendo com que as águas vazem para as áreas fora da calha (várzeas), consistindo em uma inundação. Para Muñoz-Espinosa (1984) não basta apenas que seja destacada a magnitude de uma cheia, também se faz necessário conhecer as condições agravantes existentes no local, ocasionadas pelo relevo, vegetação, saturação do solo, impermeabilização do solo entre outros. Conhecidas as variáveis de estudo e as possíveis ameaças que suas combinações de eventos podem oferecer, podemos atuar sobre elas, através de medidas para reduzir a probabilidade de que um evento adverso ocorra, ou para que no mínimo, a sua intensidade seja minimizada. Nem sempre se pode diminuir a frequência, magnitude ou intensidade de eventos que tem potencial de ocasionar desastres naturais, porém mensurar os riscos através da observação da recorrência de tais eventos é razoável para mapear as áreas geográficas que estão mais propensas a os efeitos adversos do acontecimento, conseguindo reduzir as consequências que estes poderiam acarretar, sendo importante pontuar que, a diminuição dos desastres está associada à minimização dos danos e prejuízos, e não sobre a redução dos eventos propriamente ditos.

### **2.2.1 Características da Bacia Hidrográfica**

Área de drenagem consiste na área de captação natural de precipitação, delimitada pelos topos de morros, divisores de água, além de que as águas drenadas devem convergir a um mesmo ponto comum, o exutório (LIMA, 2008).

Determina-se a densidade de drenagem como sendo a razão entre o comprimento total dos canais e a área da bacia hidrográfica. É um índice importante, pois reflete a influência da geologia, topografia, do solo e da vegetação da bacia hidrográfica, e está relacionado com o tempo gasto para a saída do escoamento superficial da bacia. Pode ser estimado a através da equação:

**Equação 1: Densidade de drenagem.**

$$DD = \frac{A}{L_{total}}$$

Onde:  $DD$  = densidade de drenagem ( $km/km^2$ )  
 $L$  total = comprimento total de todos os canais ( $km$ )  
 $A$  = área da bacia hidrográfica ( $km^2$ )

As bacias podem ser classificadas como de baixa densidade de drenagem (menor que 5,0  $km/km^2$ ), média densidade de drenagem (entre 5,0 e 13,5  $km/km^2$ ), alta densidade de drenagem (entre 13,5 e 155,5  $km/km^2$ ) ou muito alta densidade de drenagem (maior que 155,5  $km/km^2$ ) (STRAHLER, 1957 *apud* LIMA). Assim, a rocha e o solo desempenham papel fundamental, pois determinam a maior ou menor resistência à erosão. Em geral, uma bacia de geologia dominada por argilitos apresenta alta densidade de drenagem, enquanto que outra com substrato predominante de arenitos apresenta baixa densidade de drenagem (MORISAWA, 1968 *apud* LIMA). Dessa forma podemos considerar que baixas de densidade de drenagem estão associadas a regiões de rochas permeáveis e de regime pluviométrico caracterizado por chuvas de baixa intensidade.

A forma atua sobre os processos e comportamentos hidrológicos da bacia. Ocorre que em bacias hidrográficas de forma alongada o escoamento superficial não se concentra tão rapidamente como em bacias hidrográficas circulares, além do fato de que bacias longas e estreitas como são mais facilmente atingidas integralmente por chuvas intensas, indicando sobre a tendência a inundações (SCHWAB *et al.*, 1966 *apud* LIMA). Os índices que seguem, podem dar ideia sobre a forma da bacia.

A relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de mesma área que a bacia traduz o coeficiente de compacidade. Considerando que o coeficiente possui valor sempre superior a unidade (correspondendo a um círculo perfeito), sabe-se que quanto menor o seja mais circular é a bacia. Como consequência, menor é o tempo de retenção hidráulica da água e maior a tendência de haver picos de enchente.

**Equação 2: Coeficiente de compacidade.**

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Onde:  $Kc$  = coeficiente de compacidade  
 $P$  = perímetro da bacia hidrográfica ( $km$ )  
 $A$  = área da bacia hidrográfica ( $km^2$ )

O fator de forma consiste na razão entre a largura média da bacia ( $L'$ ) e o comprimento do eixo da bacia ( $L$ ). Considerando que a largura média é equivalente a razão entre a área da bacia e o comprimento da drenagem principal. Temos que:

**Equação 3: Fator de forma.**

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

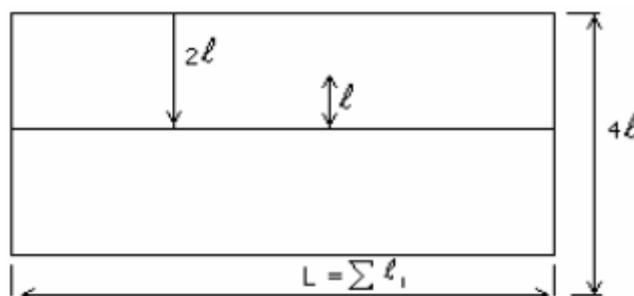
Onde:  $Kf = \text{fator de forma}$

$A = \text{área da bacia hidrográfica (km}^2)$

$L = \text{Comprimento do rio principal (km)}$

A partir dessa relação, se abstrai que quanto menor o fator de forma, mais alongada é a bacia e, portanto, menos sujeita a picos de enchente, pois o tempo de retenção hidráulica é maior. Além disso, é menos provável que um mesmo evento de pluviosidade intensa abranja toda área da bacia.

Este parâmetro indica a distância média ( $l$ ) que a água de chuva interceptada em um determinado ponto escoaria em linha reta até o curso d'água mais próximo. Para tal a bacia em estudo é transformada em retângulo de mesma área, onde o lado maior é a soma dos comprimentos dos rios da bacia ( $L = \sum L$  total).



**Figura 1: Extensão média do escoamento superficial. Fonte: Villela (1975 apud STUDART).**

Observando a figura 1, é possível determinar que a extensão média de escoamento ( $l$ ) conforme a equação 4, tendo em vista que a área do retângulo é o produto entre  $\sum L$  total e  $4l$ . Dessa forma:

**Equação 4: Extensão média de escoamento superficial.**

$$l = \frac{A}{4L \text{ total}}$$

Onde:  $l = \text{Extensão média do escoamento superficial (km)}$

$A = \text{área da bacia hidrográfica (km}^2)$

$L \text{ total} = \text{comprimento total de todos os canais (km)}$

A relação de razão entre o comprimento do rio principal (L) e o comprimento do talvegue (Lt) (medida em linha reta entre os pontos inicial e final do curso de água principal), se refere a sinuosidade do curso de água. Esta característica corresponde de forma proporcional ao contrário da velocidade, resultando em suscetibilidade de inundações nas áreas de várzea quando esse parâmetro for alto. A sinuosidade do curso d'água é determinada através da equação abaixo.

**Equação 5: Sinuosidade dos cursos de água.**

$$Sin = \frac{L}{L_{talvegue}}$$

Onde:  $Sin$  = sinuosidade do rio principal

$L$  = comprimento do rio principal (km)

$L_{talvegue}$  = comprimento do talvegue do rio principal (km)

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DO RELEVO

O relevo de uma bacia hidrográfica tem grande influência sob os processos hidrológicos que nela ocorrem. Exemplo disso é a velocidade do escoamento superficial, determinada pela declividade do terreno. Temperatura, precipitação e evaporação são fatores que dependem um do outro e podem variar em função da altitude da bacia. Dessa forma as características do relevo refletem as diferenças topográficas da bacia, as quais são regidas pelos processos de erosão, infiltração escoamento e percolação.

### 2.3.1 Características da Bacia Hidrográfica

A representação das distintas cotas que ocorrem na área de drenagem, é conhecida como hipsometria. A análise dos dados de elevação pode possibilitar o conhecimento da cota máxima e mínima que permite determinar a amplitude altimétrica, além de permitir que se trace o perfil longitudinal do relevo ou outras feições.

A declividade de uma bacia hidrográfica tem relação importante com vários processos hidrológicos, tais como a infiltração, o escoamento superficial, a umidade do solo. Consiste em um dos fatores principais que regulam o tempo de duração do escoamento superficial e de concentração da precipitação nos leitos dos cursos de água. Dividindo-se a amplitude altimétrica pelo comprimento da bacia obtém-se uma medida do gradiente ou da declividade geral da bacia, que guarda relação com o processo erosivo.

Grandes diferenças altimétricas em bacias hidrográficas podem acarretar em alterações da temperatura média, consequentemente influenciando as variações na evapotranspiração, contribuindo para formação de eventos de chuvas orográficas e convectivas, sendo a segunda, correspondente a eventos de curtas durações com grande volume precipitado.

A declividade do canal é a relação entre a diferença de altitude com o comprimento do respectivo trecho do rio. A declividade afeta a velocidade de escoamento de um rio, quanto maior a declividade, maior a velocidade de fluxo.

A relação entre a cotas altimétricas que o canal possui nos trechos diferentes permite que seja construída a curva ou perfil hipsométrico do canal, que corresponde aos respectivos valores de cotas que o atribuídos a todos os pontos da origem do rio até o exutório.

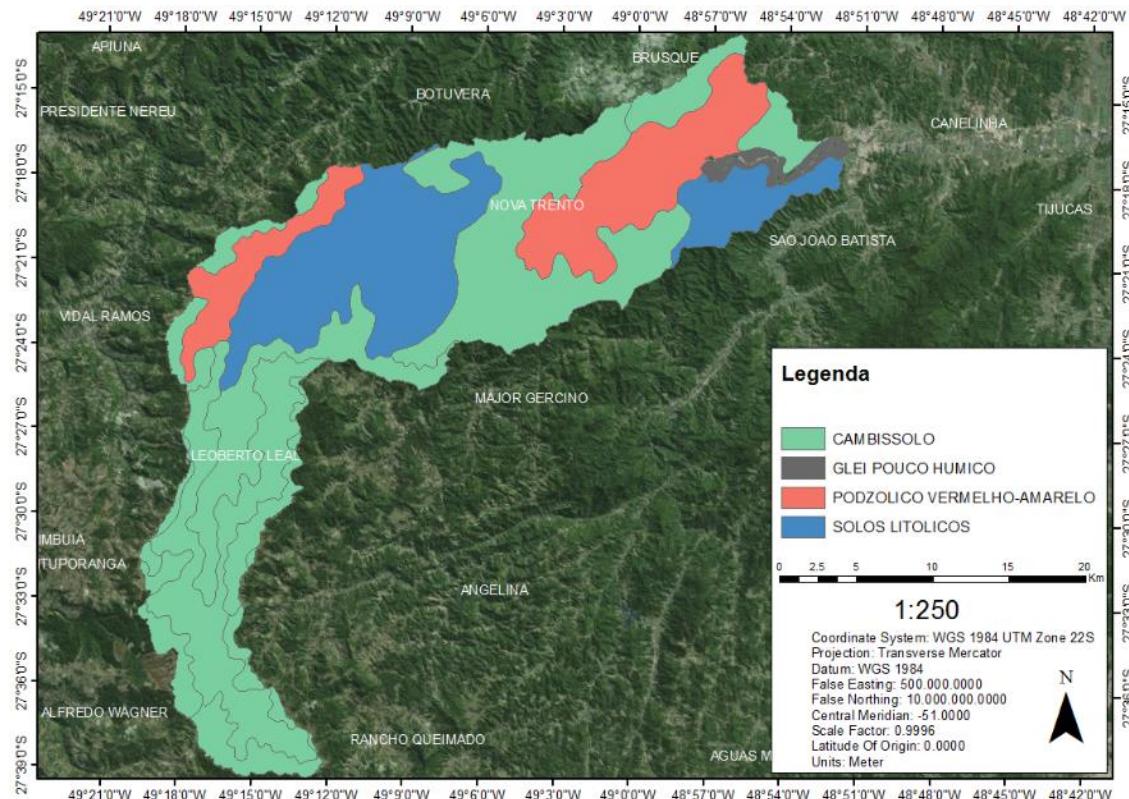
### **2.3.2 Geomorfologia da bacia hidrográfica**

Segundo Uberti (2005), a sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço está contida na região edafo homogênea de Nova Trento, que abrange os municípios de Nova Trento e Major Gercino e na região edafo homogênea de Ituporanga, que abrange o município de Leoberto Leal.

Segundo a EPAGRI (2008) o perfil geológico encontrado no município de Nova Trento é marcado por perfis que tem como característica principal um horizonte de acumulação de argila, sendo típicos de Argissolos Vermelho-Amarelo, desenvolvidos das rochas cristalinas, possuindo textura variável de areia de média granulometria a textura argilosa. Acrescenta-se ainda que esses solos podem apresentar horizontes coesos, que ao serem umedecidos, tornam-se facilmente fragmentados.

Além disso, existe a presença de Cambissolo que possue composição principalmente de argilas. Por outro lado, próximo da região dos limites municipais de Nova Trento e Leoberto Leal existe a ocorrência de solos Litólicos, encontrados em áreas de afloramentos rochosos da Bacia do Paraná. Esses solos são geralmente rasos, não possuem grande presença de água, apresentando horizonte A diretamente sobre a rocha, normalmente possuem granulometria pedregosa e/ou rochosa, moderadamente drenados e com textura predominantemente média, podendo também ocorrer solos de textura arenosa, siltosa ou argilosa. (EPAGRI, 2008).

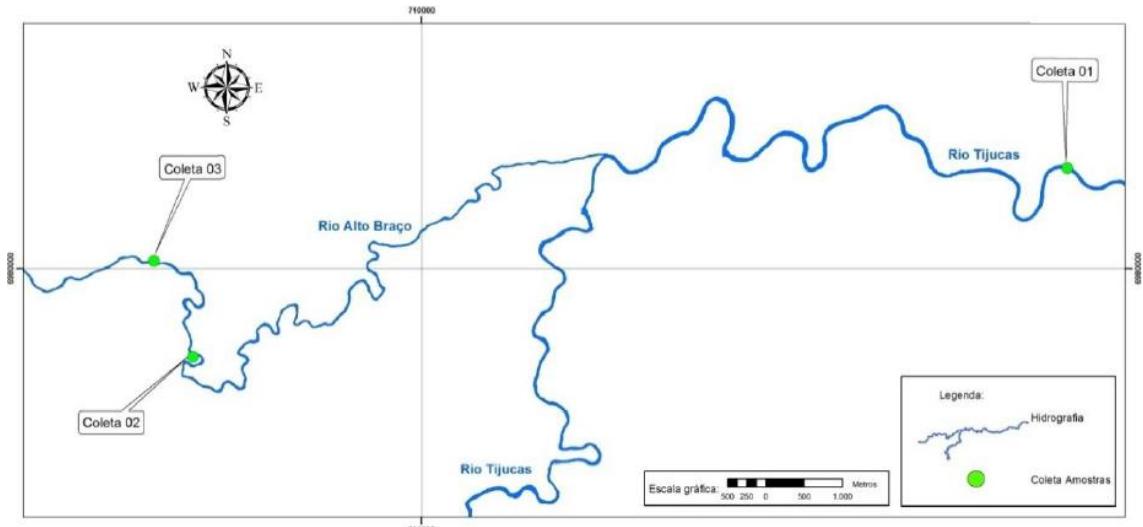
A região edafo homogênea contida no município de Leoberto Leal possui conteúdo de solos Litólicos junto aos limites de Nova Trento, entretanto a maior ocorrência se deve ao solo do tipo Cambissolo, que possui alto teor de argila, dificultando a lixiviação de partículas da sua estrutura. Além disso, devido a sua classe textural, na presença de água demonstra forte grau de plasticidade, em contrapartida, quando seco exibe grande dureza. Em função da capacidade de retenção de umidade devido a sua associação argilosa, os Cambissolos mostram fortes indícios de drenagem deficiente em períodos prolongados de pluviosidade (EPAGRI, 2008).



**Figura 2: Tipo de solo encontrados na sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço. Adaptado de: EPAGRI (2008).**

### 2.3.2.1 Textura

A consultoria GGES (2014) em estudo de estabilidade dos taludes dos rios Alto Braço e Tijucas realizou ensaios para determinação da granulometria do solo da área de estudo. A definição dos locais de coletas de amostras foi feita após a análise dos diferentes tipos de solo encontrados durante a etapa de vistoria. Foram definidos três tipos de solos, separados de acordo com sua granulometria e, por sua vez, considerados representativos da área de estudo. Segundo mesmo estudo a composição granulométrica média entre os pontos de interesse da área de estudo desse trabalho (amostra 1 e 2) correspondem a fração 1,23% de areia/silte, 14,01% de areia fina, 44,35% de areia média, 20,20% de areia grossa, 14,13% de pedregulhos e 6,07% de rochas. Os pontos de amostragem seguem apresentados na imagem seguinte:



**Figura 3: Pontos de coleta de amostras. Coleta 01 material argiloso; Coleta 02 material cascalhoso; Coleta 03 material arenoso. Fonte: GGES (2014).**

## 2.4 ANÁLISE HIDROLÓGICA

O comportamento hidrológico de um curso de água pode ser caracterizado através do volume e variabilidade da vazão, considerando que essa é diretamente proporcional ao índice pluviométrico. Dessa maneira se destaca a importância de séries históricas de dados de medições de vazão e precipitação, que por meio de tratamentos estatísticos possibilitam a estimativa de ocorrência de eventos extremos.

A análise da série histórica de vazões permite a estimativa da permanência das vazões em determinada seção de um rio. Quando além do volume de água houver o registro do nível, é possível ser estabelecida uma relação direta entre essas duas variáveis através de uma equação que represente a vazão em função da altura da coluna de água. Além disso a análise de vazões pode predizer o risco de ocorrência de enchentes com variados tempos de retorno de anos variados.

### 2.4.1 Escoamento Superficial

A precipitação excedente, não captada pelas plantas ou infiltrada no solo, resulta no escoamento sobre a superfície terrestre, chamada de chuva efetiva, que pode ser alterada quando o solo se apresentar compactado ou impermeabilizado, sendo influenciado também pela declividade do terreno, que acarreta em maior velocidade de escoamento, reduzindo a oportunidade de infiltração da água no solo. O escoamento superficial em uma bacia hidrográfica pode ser representado pelo hidrograma, que consiste no perfil da vazão ao longo do tempo, que quando relacionado a ocorrência de um evento de precipitação resulta no volume precipitado.

#### 2.4.1.1 Curva de Permanência

A curva de permanência expressa a relação entre a vazão e a frequência com que esta vazão é superada ou igualada. Pode ser estimada considerando uma série histórica de vazões sem valores repetidos, sendo aproximada a probabilidade de ocorrência dos valores através da ordem “ $m_i$ ” dividido pelo número de elementos da série  $n$ . Seguindo essa regra a chance de ocorrência de elementos com valor inferior ou superiores do que elementos da amostra seria nula. Para corrigir esse a probabilidade pode ser estimada através de equações empíricas como a de Weibull.

**Equação 6: Probabilidade empírica de Weibull.**

$$P = \frac{m_i}{n + 1}$$

Onde:  $P$  = probabilidade de ocorrência (%)

$n$  = tamanho amostral

$m_i$  = elemento amostral de ordem “ $i$ ”

#### 2.4.1.2 Curva Chave

Outro comportamento possível de ser relacionado consiste na relação entre a vazão de e o nível de um rio, sendo um proporcionalmente direto ao outro. Para representar o comportamento hidrológico de um curso e água de melhor forma, as medições devem compreender períodos de cheias e estiagens, acompanhando essas mudanças ao longo de um período de tempo que pode se estender por vários anos. Outro fator determinante para qualidade dessa relação está ligado a escolha do local onde serão medidas as vazões, considera-se que seja escolhido dentre todos os trechos de um rio, o trecho que apresentar-se reto e com fundo uniforme. Além disso, pelas dificuldades de medição em situações de alta vazão, podem comprometer o entendimento do comportamento do escoamento em função do baixo número de medições de vazões altas. Essa ausência pode acarretar na extrapolação de estimativas de vazão no uso de uma curva chave, podendo incidir em grandes erros. A relação da estimativa de vazão pode ser representada seguinte equação:

**Equação 7: Modelo de curva chave para estimativa de vazão.**

$$Q_{est} = a \cdot (h - h_0)^b$$

Onde:  $Q_{est}$  = vazão estimada ( $m^3/s$ )

$h$  = nível de água (m)

$a = 10^{a'}$

$a'$ ,  $b$  e  $h_0$  = parâmetros de ajuste

Para determinar os parâmetros de ajuste a partir dos pares ( $Q$ ,  $h$ ), a expressão geral é linearizada, determinando-se  $a'$  e  $b$  por regressão linear. Tendo em vista que as cotas são

tomadas com relação a um referencial arbitrário,  $h_0$  constitui um parâmetro desconhecido, que poderia ser entendido como sendo a cota para o qual a vazão é nula. Assim,  $h_0$  pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo da escala com relação ao fundo do rio.

#### 2.4.1.3 Tempo de Concentração

É definido como tempo de concentração o tempo necessário para que toda a chuva que ocorre sobre uma bacia hidrográfica escoe para o exutório. Para sua determinação os modelos levam em consideração certos atributos físicos da bacia, como o comprimento do canal principal, amplitudes altimétricas, declividade média e área da bacia hidrográfica.

Segundo estudo de Silveira (2005) as equações de Kirpich, Ven te Chow e *Corps of Engineers* obtiveram os melhores resultados de estimativa de tempos de concentração para bacias hidrográficas de grandes áreas e predominantemente rurais. A primeira, abrange validade teórica em bacias com área entre 150 e 12.000 km<sup>2</sup>, com cerca -9 % de erro padrão reduzido. No mesmo estudo, a equação de Ven te Chow demonstrou erro médio de -7% enquanto que a equação de *Corps of Engineers*, indicam que pode ocorrer uma superestima do tempo. As últimas duas apresentaram resultados semelhantes, considerando que a primeira delas deve ser usada com cautela em bacias hidrográficas com área maior do que 400 km<sup>2</sup>.

**Tabela 1: Equações de tempo de concentração. Fonte: Adaptado de SILVEIRA, 2005.**

Kirpich	$tc = 0,0663 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385}$
Ven te Chow	$tc = 0,160 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32}$
Corps Engineers	$tc = 0,191 \cdot L^{0,76} \cdot S^{-0,19}$

Onde:  $tc$  = tempo de concentração (horas)

$L$  = comprimento do canal principal (km)

$S$  = declividade do canal principal (m/m)

#### 2.4.1.4 Hidrograma

O hidrograma constitui a representação gráfica da vazão ao longo de um determinado tempo em que pode ocorrer um evento de chuva, o qual é responsável pelo acréscimo da vazão de um rio. Em uma bacia hidrográfica como o fenômeno de precipitação pode apresentar diferentes distribuições espaciais, nem toda chuva efetiva chegará ao mesmo corpo hídrico e tão pouco ao mesmo tempo, pois isso dependerá das características físicas da bacia. Com a ocorrência de precipitação a vazão no ponto exutório da bacia aumenta, refletindo inicialmente a precipitação que incidiu sob as áreas mais próximas, porém, o volume continua a aumentar até que os volumes precipitados nos pontos mais longínquos da bacia cheguem ao exutório, só então que o volume retorna ao originalmente influenciado pelo escoamento subterrâneo.

Além das características físicas da bacia hidrográfica, outros fatores influenciadores do hidrograma correspondem as propriedades do evento de precipitação, pois sua intensidade e duração irão gerar respostas diferentes, de modo que chuvas mais intensas tendem a gerar maior escoamento e consequentemente hidrogramas mais pronunciados, enquanto que chuvas menos intensas propiciam a formação de hidrogramas mais suaves, sem grande pico de vazão. Conforme a figura abaixo, é possível verificar duas vazões, sendo a linha tracejada representada pelo escoamento superficial gerado em uma bacia com alto de grau de impermeabilização ou declividade, assim volume que escoava lentamente pela superfície do solo e ficava retido pelas plantas, com a urbanização ou grandes declividades, passa a escoar muito mais rápido para o canal.

Outro fator importante é a forma da bacia, formas circulares tendem a possuir vários tributários que em eventos extremos tendem a mandar o volume de água muito mais rápido para o exutório da bacia. Por outro lado, a linha de cor sólida demonstra como que o processo de infiltração é presente, tornando o escoamento superficial menor por meio da interceptação dos outros processos, fazendo com que a onda de pico seja mais suave e tardia, esse comportamento é geralmente característico de bacias hidrográficas planas, rurais ou de forma mais alongada.

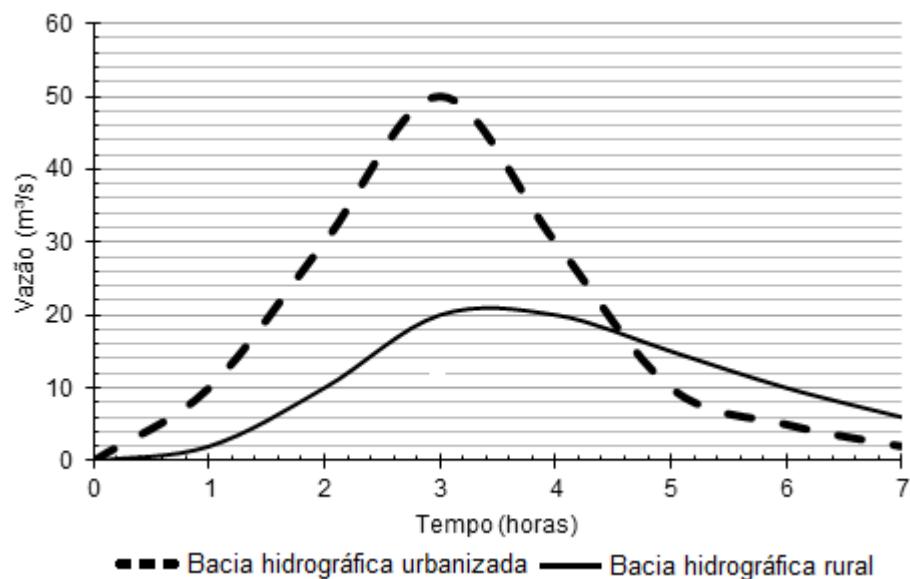


Figura 4: Diferença entre hidrogramas. Fonte: Adaptado de CHOW (1994).

Para geração do hidrograma unitário necessita-se de dados históricos de vazão e precipitação. Como normalmente essa demanda não é atendida, se utilizam hidrogramas unitários sintéticos, obtido a partir da análise do relevo, também denominado hidrograma unitário geomorfológico (COLLISCHONN, 2008). Hidrogramas sintéticos tiveram sua origem em dados de bacias anteriormente analisadas, sanando a necessidade de dados de chuva e vazão simultaneamente.

#### 2.4.1.5 Modelos Precipitação-Vazão

O método SCS foi desenvolvido inicialmente para estimar o volume de escoamento superficial em bacias hidrográficas rurais e consiste em determinar a chuva que se transforma em vazão, utilizando os conceitos do hidrograma unitário. O escoamento superficial no método SCS é representado pelo índice  $CN$ , que equivale a combinação empírica do grupo do solo, cobertura do solo e condições de umidade do solo. Assim, existem tabelas do número  $CN$  para bacias rurais e urbanas e os valores obtidos para o índice podem ser posteriormente ajustados por um coeficiente médio, levando em conta os diversos usos do solo e áreas de abrangência.

**Equação 8: Estimativa de CN médio.**

$$CN_{médio} = \frac{\sum A_i \cdot CN_i}{\sum A_i}$$

Onde:  $CN_{médio}$  = índice de escoamento superficial médio

$A_i$  = área com determinado uso e ocupação do solo ( $km^2$ )

$CN_i$  = índice de escoamento superficial determinado uso e ocupação do solo

As classes de solo podem ser divididas em quatro grupos, sendo eles:

**Tabela 2: Relação de classe de solo e características do terreno. Fonte: Adaptado de TUCCI (1994).**

Classe de solo	Características do solo
A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração, arenosos com pouco silte e argila.
B	Solos menos permeáveis que o anterior, arenosos, menos profundos que do tipo A e com permeabilidade superior à média.
C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo porcentagem considerável de argila.
D	Solos argilosos, pouco profundos e com baixa capacidade de infiltração, gerando maior escoamento superficial.

Considerando as condições de uso e ocupação do solo, e corrigindo o coeficiente para um valor mais representativo de toda área da bacia, obtém-se o potencial máximo de retenção ( $S$ ), a partir da equação abaixo.

**Equação 9: Potencial máximo de retenção do modelo SCS.**

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Onde:  $S$  = potencial máximo de retenção

$CN$  = índice de escoamento superficial

Com base em estudos experimentais em bacias hidrográficas, o SCS propôs que as perdas iniciais, fossem aproximadas por 20% da capacidade máxima de retenção de água na bacia hidrográfica, dessa forma (TOMAZ, 2013):

**Equação 10: Perdas iniciais do modelo SCS.**

$$Ia = 0,2 \cdot S$$

Onde:  $Ia$  = perdas iniciais

$S$  = potencial máximo de retenção

Por fim a determinação da chuva efetiva, seguindo o método SCS é determinada por meio da equação abaixo:

**Equação 11: Equação de precipitação efetiva do modelo SCS.**

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P + 0,8 \cdot S}$$

Onde:  $Pe$  = precipitação efetiva (mm)

$P$  = precipitação acumulada (mm)

$Ia$  = perdas iniciais

A chuva acumulada entre os intervalos de tempo deve ser avaliada até o momento em que for maior do que as perdas iniciais, assim o cálculo é validade, caso contrário, o valor da precipitação efetiva é considerado nulo. Ao fim é feito a diferença da precipitação excedente acumulada nos intervalos de duração do evento de chuva, obtendo-se assim o hidrograma da precipitação excedente.

Para efetuar a transformação da precipitação excedente em vazão, define-se, inicialmente, o hidrograma unitário triangular característico da bacia, valendo-se da seguinte relação o cálculo do tempo de pico pode ser representado por:

**Equação 12: Equação de tempo de pico do modelo SCS.**

$$tp = tc \cdot 0,6 + \frac{td}{2}$$

Onde:  $tp$  = tempo de pico do hidrograma (horas)

$td$  = duração efetiva da chuva unitária (horas)

$tc$  = tempo de concentração (horas)

Segundo Tomaz (2013) a determinação da vazão de pico é de grande importância para estudos hidrológicos aplicados a dimensionamento de redes de drenagem, dimensionamento de bacias de detenção, bacias de contenção e pode servir também como dado de entrada para modelos hidráulicos com a finalidade de analisar áreas suscetíveis a inundações.

**Equação 13: Equação de vazão de pico do modelo SCS.**

$$Qp = \frac{2,08 \cdot A}{ta}$$

Onde:  $Qp$  = vazão de pico do hidrograma unitário ( $m^3/s$ )

$A$  = área da bacia hidrográfica ( $km^2$ )

$$ta = \text{tempo de ascensão do hidrograma unitário (horas)} = \frac{td}{2}$$

Outro método para estimativa de escoamento superficial consiste em conhecer o comportamento da área de estudo frente a ocorrência de uma chuva efetiva por meio do hidrograma unitário. Assim se pode decompor o evento de chuva em intervalos para representar a convolução da precipitação (P) e do hidrograma unitário (U), gerando a função da vazão (Q). Assim, conhecidos o evento de precipitação e vazão, a determinação do hidrograma unitário fica condicionada a resolução do sistema de equações de cada relação  $[P].[U] = [Q]$ . Quando a convolução é demonstrada de forma matricial, temos que:

$$\begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ P_2 & P_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ P_3 & P_2 & P_1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_M & P_{M-1} & P_{M-2} & \dots & P_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & P_M & P_{M-1} & \dots & P_2 & P_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & P_M & P_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & P_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_{N-M+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ \vdots \\ Q_M \\ Q_{M+1} \\ \vdots \\ Q_{N-1} \\ Q_N \end{bmatrix}$$

**Figura 5: Representação matricial da convolução de hidrograma. Fonte: Adaptado de CHOW (1994).**

#### 2.4.1.6 Distribuição Estatística de Eventos extremos

Considerando o interesse no estudo das cheias a análise de frequência busca-se utilizar séries históricas de vários anos, geralmente reduzidos a uma série anual dos valores máximos registrados em cada ano, para que os dados sejam estatisticamente independentes. Por se tratarem de variáveis hidrológicas aleatórias é possível efetuar uma análise da distribuição de probabilidades, estimando a possibilidade de que uma variável (aleatória) pertença a uma

determinada faixa de valores. Para essa estimativa se utilizam parâmetros estatísticos que caracterizam a série de dados, como a média, desvio padrão e assimetria.

Para análise de frequência de enchentes e chuvas máximas é comum o emprego da distribuição de Gumbell, na qual são utilizados os parâmetros amostrais  $y$  e  $u$  na composição da distribuição. Sendo a função da distribuição Gumbell de probabilidades:

**Equação 14: Distribuição Gumbell.**

$$f(x) = y \cdot e^{-y \cdot (x-u) - e^{-y \cdot (x-u)}}$$

Onde:  $x = \text{variável aleatória}$

$$y = \frac{\pi}{s\sqrt{6}}$$

$s = \text{desvio padrão amostral}$

$m = \text{média amostral}$

$$u = m - 0,45 \cdot s$$

Similar a distribuição de Gumbell existe a distribuição de log-Pearson do tipo III, a qual possui um terceiro parâmetro amostral e devido a sua melhor representação de distribuição das variáveis aleatórias hidrológicas é recomendada pelo Conselho de Recursos Hídricos dos Estados Unidos como padrão aplicável a séries de máximas anuais.

**Equação 15: Distribuição log-Pearson do tipo III.**

$$f(x) = \frac{v^b \cdot (\log x - r)^{b-1} e^{-v \cdot (\log x - r)}}{x \cdot \Gamma(b)}$$

Onde:  $x = \text{variável aleatória}$

$$b = \frac{4}{G_L^2}$$

$$G_L = \frac{n \sum (\log x - m_L)^2}{(n-1)(n-2)}$$

$$v = \frac{G_L}{\sqrt{b}}$$

$$r = m_L - S_L \cdot \sqrt{b}$$

$m_L = \text{logaritmo da média amostral}$

$S_L = \text{logaritmo do desvio padrão amostral}$

$\Gamma(b) = \text{função gama de } "b"$

Associado os eventos extremos é possível ser estimado o risco de enchentes de variados tempos de retorno em um determinado horizonte de tempo. Sabendo que o tempo de retorno consiste no inverso da probabilidade  $\left(\frac{1}{Tr}\right)$ , e que o risco de não ocorrência de um evento seja

$1 - P$ , a chance de que um evento ocorra dentro de (n) quaisquer anos do período de retorno pode ser estimada por:

**Equação 16: Risco de enchentes em "n" anos.**

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^n$$

Onde:  $Tr$  = tempo de retorno (em anos)

$n$  = tempo (em anos)

#### 2.4.2 Modelagem

A modelagem tem o objetivo realizar uma representação numéricas dos fenômenos, o que permite geração de cenários supondo diferentes condições para um determinado evento, para o objeto de estudo de cheias, podem ser demonstrados as alterações ocasionadas por diferentes chuvas, cobertura vegetal e outros.

As grandes inundações geralmente não são analisadas e quando vem a ocorrer suas consequências são dificilmente toleráveis, acarretando danos ambientais, materiais e econômicos. Para auxiliar a capacidade de resposta e o ordenamento urbano, a previsão destes eventos através de simulações matemáticas e representações cartográficas, pode ser considerada importante ferramenta para o atendimento às repostas desses sinistros, bem como propor medidas estruturais para mitigar riscos oferecidos por esses eventos.

O modelo de simulação hidráulica HEC-RAS foi desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos, através do Centro de Engenharia Hidrológica. É constituído de um conjunto de aplicativos, compreendido de uma interface gráfica, componentes de análise de dados hidráulicos, armazenamento e capacidade de gerenciamento de gráficos e exportação de dados. O HEC-RAS permite o cálculo para escoamento unidimensional permanente e não-permanente em canais naturais e artificiais. O mesmo desenvolvedor, com intuito de representar os dados modelados em uma ferramenta mais versátil, criou em parceria com a ESRI, uma extensão chamada HEC-GeoRAS, sendo esse um módulo a ser instalado no software GIS. Por um conjunto de procedimentos e ferramentas, esse módulo permite que sejam extraídas as geometrias de relevo, calha do rio, margens, seções transversais e os limites da malha a ser modelada, para posterior aplicação do modelo hidráulico e sua representação final em GIS (HEC-GeoRas, 2011).

Já as ferramentas de geoprocessamento permitem a coleta de dados morfométricos e a localização espacial dos elementos. O ArcGIS®, produzido pela ESRI é capaz de fornecer ferramentas para realizar gerar mapas, realizar análise espacial; armazenamento, manipulação, processamento de dados geográficos e mapeamento, apresentação de dados

As simulações hidráulicas podem balizar as políticas de uso e ocupação de solo nas cidades, pois relevam áreas afetadas por eventos extremos, possibilitando um vislumbre do futuro quando associadas a tendências de impermeabilização de áreas e definição de novos usos e ocupações do solo.

Para o escoamento em rios e canais, o HEC-RAS utiliza as equações de Chézy e de Manning, possibilitando o cálculo de escoamentos com características de vazão, nível e velocidade constantes tanto no tempo como ao longo do trecho analisado, além de considerar o fluxo unidirecional. Entretanto, a modelagem de cenários de inundações é caracterizada por um regime de escoamento não-permanente, pois as vazões e profundidades variam em função do tempo e da área do canal. Desse modo, esse tipo de modelagem envolve a utilização das equações de Saint Venant, as quais consistem nas formas diferenciais parciais dos princípios da continuidade e conservação do *momentum*.

Conforme HEC (2010) o software calcula os perfis de superfície de água e linhas de energia em função da equação de energia de Bernoulli. Porém antes de sua aplicação o modelo matemático requer que sejam assumidas algumas hipóteses, bem como na premissa de que as pressões hidrostáticas e a energia cinética sejam uniformes por toda seção do rio e que todos os componentes da velocidade possuem mesma direção.

**Equação 17: Teorema de Bernoulli.**

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + hl$$

Onde:  $Z$  = cota de referência (m)

$P$  = pressão ao longo da linha de corrente ( $N/m^2$ )

$\gamma$  = peso específico do fluido ( $N/m^3$ )

$V$  = velocidade do fluido ( $m/s$ )

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$hl$  = perda de carga (m)

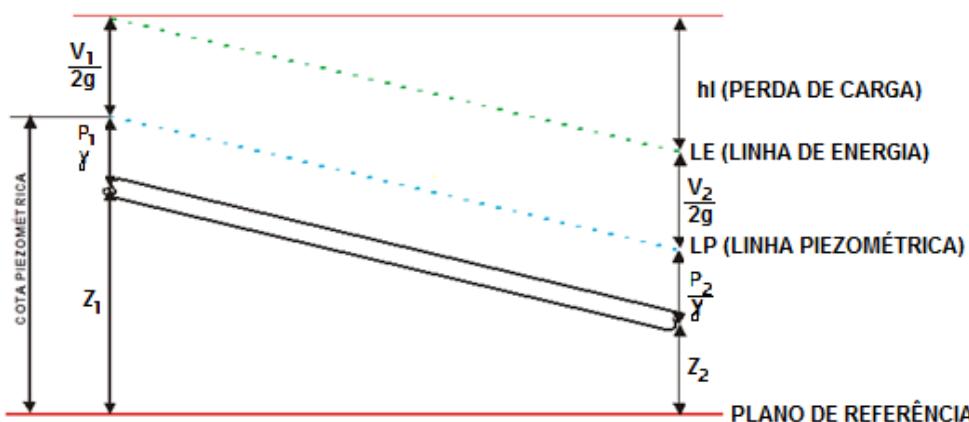


Figura 6: Representação do Teorema de Bernoulli. Fonte: Adaptado de CAMPOS (2011).

Para analisar similaridades de diferentes seções pode-se empregar o número de Froude, esse coeficiente relaciona a quantidade de energia, tomando como referência a distância vertical de um ponto em plano horizontal até sua linha de energia, sendo relacionada também com a largura do canal, sendo essa relação afetada por contrações e expansões das linhas de corrente de um fluido.

A análise do número de Froude permite conhecer a energia cinética associada ao escoamento no canal, podendo ser classificado como subcrítico ( $Fr < 1$ ), geralmente associados a trechos de rio com baixa declividade. Fluxo supercrítico ( $Fr > 1$ ), característico de trechos de grande amplitude altimétrica, grande declividade, alta velocidade e turbulência. Por outro lado, quando o  $Fr$  for igual a 1, considera-se que o regime de escoamento é crítico.

**Equação 18: Número de Froude.**

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}}$$

Onde:  $Fr = \text{número de Froude}$

$V = \text{velocidade do fluxo (m/s)}$

$g = \text{aceleração da gravidade (m/s}^2)$

$y = \text{profundidade (m)}$

Conforme Netto (1998) a grande maioria dos escoamentos em canais ocorre com regime turbulento e o número de Reynolds pode ser assemelhado aos tubos de seção circular, sendo que para o cálculo desse adimensional, como dimensão linear característica se adota que o diâmetro seja equivalente a  $4R_H$ , assim considerando uma seção circular cheia esse valor coincidirá com o valor do diâmetro (CHOW, 1994). Usualmente temos que o número de Reynolds pode ser calculado por:

**Equação 19: Número de Reynolds.**

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot (4R_H)}{\mu}$$

Onde:  $Re = \text{número de Reynolds}$

$\rho = \text{densidade do fluido (kg/m}^3)$

$R_H = \text{raio hidráulico (m)}$

$\mu = \text{viscosidade dinâmica (m}^2/\text{s)}$

Conforme Chow (1994) a grande maioria dos escoamentos considerados em hidráulica podem assumir valores de Reynolds superiores a  $10^5$ , entretanto muitos experimentos demonstram que quando se toma o raio hidráulico como característica na definição do número de Reynolds o alcance corresponde desde 500 a 12500 sendo configurado como laminar quando  $R_e < 500$  e turbulento quando  $R_e > 12500$ .

Conforme Chow (1994), Chézy concluiu que a força resistente em um canal era exercida pelas suas paredes, expressas por unidade de área do leito do canal, assim determinou o raio hidráulico, consistindo na razão da área molhada pelo escoamento e perímetro. Logo, também prescreveu que a unidade de área de leito do canal, é proporcional ao quadrado da velocidade, média na seção transversal ( $K.v^2$ ), onde  $K$  é uma constante de proporcionalidade. Dessa maneira, postulou que a força resistente que influencia na velocidade do fluido pode ser representada por  $C$ :

**Equação 20: Equação de velocidade de fluidos em canais abertos de Chézy.**

$$V = C \cdot \sqrt{Rh \cdot S}$$

Onde:  $V$  = velocidade média do escoamento (m/s)

$C$  = coeficiente de Chézy

$Rh$  = raio hidráulico (m)

$S$  = declividade de fundo do canal (m/m)

Para estimar o coeficiente de Chézy vários pesquisadores introduziram o efeito da declividade e diferentes atritos com materiais. Manning propôs que o coeficiente de rugosidade fosse igual à  $\frac{1}{n} \cdot Rh^{1/6}$  (CHOW, 1994). Substituindo da equação de Chézy, temos que a velocidade pode ser dada por:

**Equação 21: Equação de velocidade de fluidos em canais abertos de Manning.**

$$V = \frac{1}{n} \cdot Rh^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

Onde:  $V$  = velocidade do fluido (m/s)

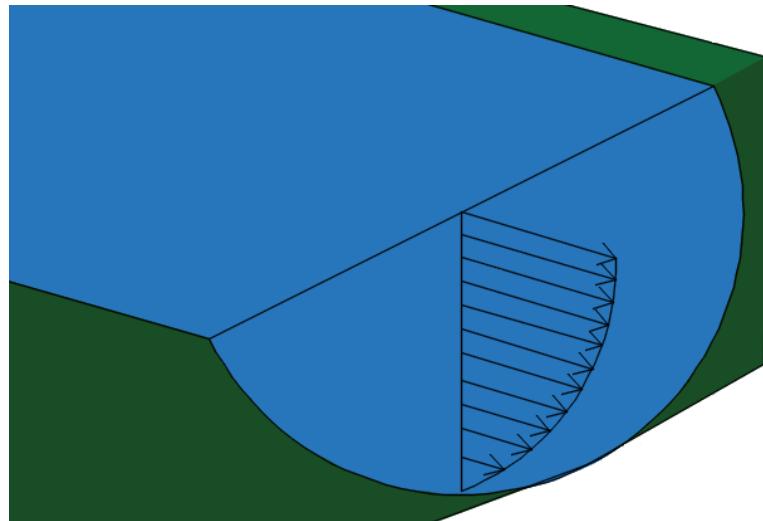
$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning

$Rh$  = raio hidráulico (m)

$S$  = declividade (m/m)

Durante o escoamento de um fluido em canais observa-se a interação entre suas partículas e as paredes do canal, resultando atrito entre as mesmas. O grau de resistência do fluido à força cisalhante e resistência à deformação é determinado pelas propriedades de viscosidade, rugosidade do canal ou pela presença de curvas (CHOW, 1994).

Logo em um perfil transversal é possível notar que a velocidade da água é maior tanto na porção central do rio, quanto mais perto for um determinado ponto na coluna de água próximo da superfície, sendo o contrário verdadeiro, nos extremos das margens e do fundo do rio, a velocidade do escoamento tende a ser nula, aumentando gradativamente à medida que se aproxima das áreas de alta velocidade já comentadas.

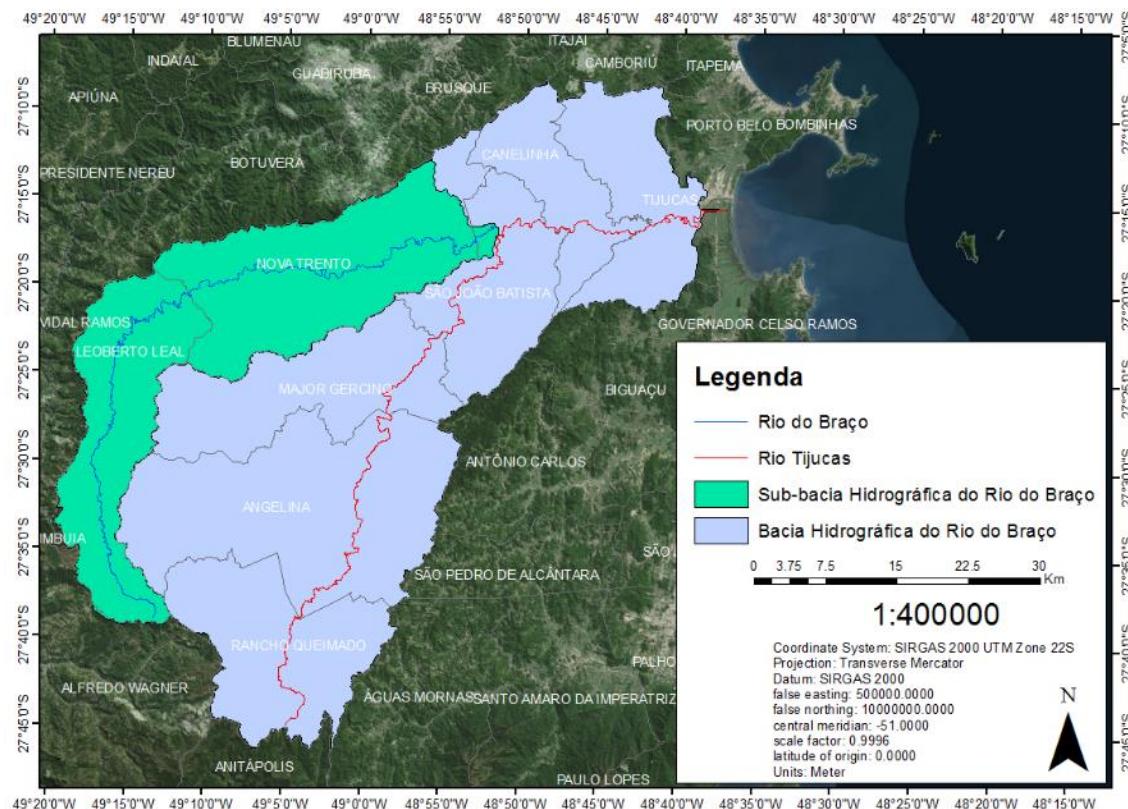


**Figura 7: Influência da interação do fluido com as paredes do canal sob a velocidade ao longo da coluna de água.**

Ao final, o processamento dos dados no modelo de escoamento permanente do software HEC-RAS apresenta algumas condições de contorno pré-determinadas, sendo uma de níveis de água conhecidos atingidos em determinado evento, neste caso entra-se com os dados de níveis e respectivas vazões, ambos conhecidos. Outra possibilidade é da estimativa da profundidade crítica do canal, que o software pondera com base na geometria do canal. Outra opção consiste na declividade da linha de energia, que segundo o manual de uso do software é a solução mais recomendada, aconselhando-se adotar a declividade do fundo do canal como sendo equivalente a declividade da linha de energia (HEC, 2010).

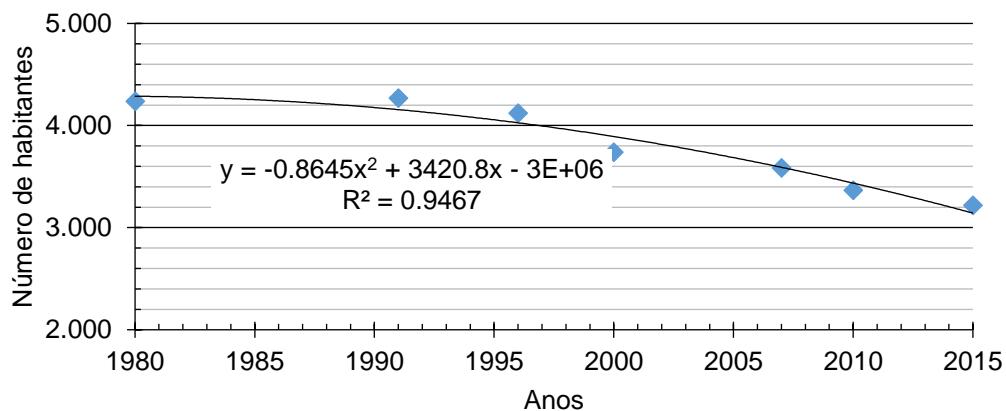
## 2.5 ÁREA DE ESTUDO

A área de interesse do estudo desse trabalho consiste na sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço, que está contida na bacia hidrográfica do Rio Tijucas, sendo ambas localizadas na região hidrográfica do Litoral Centro, que consiste na região hidrográfica n.º 8, conforme subdivisão prevista pela Lei Estadual n.º 10.949/98. A sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço, abrange os municípios de Leoberto Leal, Nova Trento e uma pequena parte do município de São João Batista, onde fica localizado o exutório da sub-bacia que desemboca no Rio Tijucas já em uma ínfima parte do território desse município.



**Figura 8: Delimitação e localização da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.**

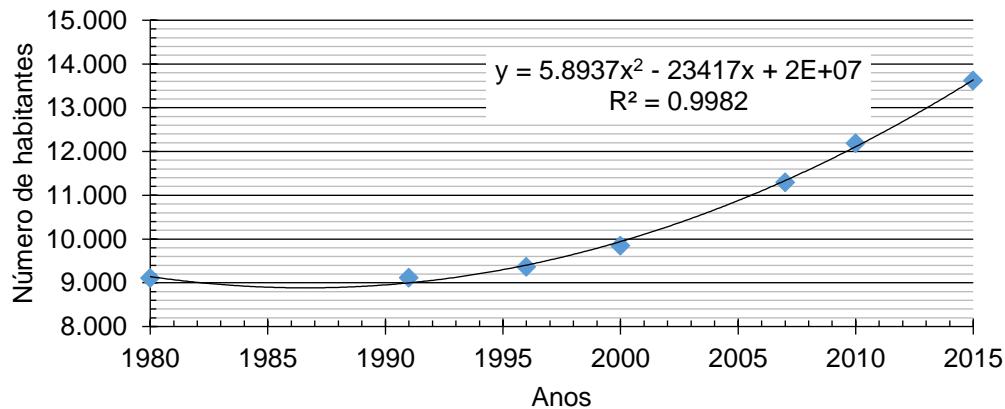
Leoberto Leal é um município predominantemente rural desde seu estabelecimento em 17 de fevereiro de 1963, consistindo em uma população rural de 2.545 habitantes rurais e apenas 820 habitantes urbanos, totalizando assim 3.365 moradores (IBGE, 2010), que convivem em uma área total de 291,21 km<sup>2</sup>. Uma análise das amostras populacionais fornecidas pelo IBGE revela que o município sofre um lento declive populacional, ocasionado por uma taxa de decrescimento anual de -0,87%, que pode estar relacionada ao fenômeno de êxodo rural. Dentre os cultivos temporários desempenhados pelos habitantes das zonas rurais, se destacam a produção de cebola, fumo, mandioca e milho, além de outros frutos. Além da cultura agrícola, o setor é composto pela criação de animais, são os bovinos, aves e suínos os rebanhos como mais representatividade dentre esse setor.



**Figura 9: Análise de correlação do número de habitantes do município de Leoberto Leal.**

Segundo o IBGE o município foi instalado em 01 de janeiro de 1939 e em 2010 tinha sua população na ordem de 12.190 habitantes, sendo residentes da parte urbana 9.129 pessoas e 3.061 na extensão rural, com área de 402,887 km<sup>2</sup>. Analisando os censos demográficos, estimativas e contagens populacionais realizadas pelo IBGE desde o ano de 1980, estima-se que o município de Nova Trento apresente uma taxa de crescimento populacional de 1,14% ao ano.

A agricultura faz parte das atividades econômicas de Nova Trento, sendo de ocorrência mais expressiva o cultivo de fumo, milho, feijão, mandioca e a produção de uva, sendo essa considerada como lavoura permanente, que alimenta a indústria de fabricação e a comercialização do vinho colonial. Visto o potencial agrário da cidade, a mesma ainda conta com um setor agropecuário que consiste em rebanhos bovinos, suíños e de aves. Vale a pena destacar que a economia da cidade ainda é complementada pelas atividades de turismo religioso e o turismo ecológico, oriundos dos turistas que visitam o Santuário de Santa Paulina e o Santuário de Nossa Senhora do Bom Socorro.



**Figura 10: Análise de correlação do número de habitantes do município de Nova Trento.**

A sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço é composta também Rio Alto Braço, que possui comprimento de 91,74 km, até se tornar o Rio do Braço, que percorre mais 24,17 km até

desembocar no Rio Tijucas. A sub-bacia possui área de drenagem de 675,72 km<sup>2</sup> que correspondem a 28,50% da área da bacia principal na qual está inserida, além disso, possui perímetro de 197,25 km, em seu interior a maior altura encontrada é de 1.126,61 m, enquanto a menor cota verificada é de 10,30 m em relação ao nível do mar.

Seu relevo é caracterizado por grande amplitude altimétrica, alto gradiente de declividade e por se encontrar em uma região de montante se comparado ao restante da bacia na qual está inserida é uma região com perfil topográfico em forma de vale, ocorrendo a existência de planícies apenas na região da cidade de Nova Trento, que fica a poucos quilômetros do fim da sub-bacia.

Dos principais usos preponderantes do solo descritos acima podem ser destacados a urbanização, cultura de fumo, mandioca, hortaliças, frutíferas, florestas de eucalipto e criação de rebanhos bovinos. Essas informações são importantes pois irão auxiliar na estimativa de escoamento superficial, visto que cada uso do solo pode aumentar ou diminuir esse parâmetro.

Atualmente as áreas com maior tendência de expansão da malha urbana ficam localizadas nas planícies adjacentes do Rio do Braço, próximas da cidade de Nova Tento. Essas áreas são caracterizadas por planícies aluviais e periodicamente sofrem com enchentes e inundações, que até o momento geram problemas ambientais e econômicos ainda em níveis toleráveis pela população do entorno. Porém registro histórico de eventos pluviométricos, já demonstra a necessidade de maior atenção ao planejamento da expansão urbana levando em consideração as características hidrológicas da bacia.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Para realização desse estudo a base de dados pluviométricos empregado no modelo precipitação-vazão e análise de distribuição de probabilidades, foram obtidos da série histórica da estação pluviométrica de Nova Trento, acessadas por meio do HidroWeb, que consiste em um sistema de informações hidrológicas da ANA. A estação pluviométrica instalada na cidade de Nova Trento possui código de referência número 2748002. Além disso, foram selecionados eventos pluviométricos e de nível do Rio do Braço extraídos da base de dados do CEMADEN.

Os dados espaciais consistem em imagens do aerolevantamento, cujo período de voo foi de abril/2010 a maio/2013, executado pela empresa Engemap Geoinformação. As informações geradas por esse trabalho compreendem aerofotografias e um modelo digital do terreno (MDT), determinados por meio de tecnologia LIDAR que desempenhou a função de escâner da superfície, ambos os dados possuem resolução máxima de pixels de 1 m por 1 m.

Esses arquivos espaciais associados ao software ArcGis 10, irão fornecer as informações necessárias para caracterizar a morfologia da sub-bacia, classificar o uso do solo, determinar a hipsometria, rede hidrografia, declividades. A associação do MDT a extensão HEC-GeoRAS terá a função de extrair os elementos de geometria do canal, para posterior simulação no software HEC-RAS, proporcionando a representação e interpretação espacial da área das áreas inundáveis.

##### 3.1.1 Dados Pluviométricos

Foram selecionados dados pluviométricos com objetivo de analisar a distribuição de frequência de eventos de pluviosidade, extraídos da estação pluviométrica instalada na cidade de Nova Trento, operada pela ANA, que disponibiliza os totais de precipitação diário. Em paralelo serão organizados dados onde se verificou a ocorrência de algum evento pluviométrico unitário, cujas informações foram retiradas a partir da estação pluviométrica do CEMADEN, os quais possuem medição horária, dessa forma é possível relacionar esses dados com a vazão para produzir um hidrograma unitário da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço. Esse hidrograma terá como propósito demonstrar o comportamento da distribuição de chuva ao longo de um período de tempo, que posteriormente poderá ser replicado para estimar as vazões produzidas por eventos de precipitação.

**Tabela 3: Identificação das estações pluviométricas.**

Código	Operadora	Município	Latitude	Longitude	Altitude	Período de dados	
						Inicial	Final
02748002	ANA	Nova Trento	27°10'15"S	48°33'36"W	28 m	01/10/1945	01/10/2015
421150407H	CEMADEN	Nova Trento	27°17'47.8"S	48°58'14.2"W	36 m	21/04/2016	28/10/2016

### 3.1.2 Dados de Nível

No escopo do Plano Nacional de Gestão de Riscos e Respostas a Desastres, o CEMADEN monitora, atualmente, 957 municípios em todas as regiões brasileiras. Os municípios monitorados têm histórico de registros de desastres naturais decorrentes de movimentos de massa ou inundações. Para o constante monitoramento esses municípios foram contemplados com estações hidrológicas, as quais estação realizam a medição de dados pluviométricos e dados de nível do Rio do Braço, coletados de hora em hora.

**Tabela 4: Identificação das estações de nível.**

Código	Operadora	Município	Latitude	Longitude	Altitude	Período de dados	
						Inicial	Final
421150407H	CEMADEN	Nova Trento	27°17'47.8"S	48°58'14.2"W	36 m	21/04/2016	28/10/2016
84095000	ANA	Nova Trento	27°10'15"S	48°33'36"W	28 m	01/07/1944	30/04/2006

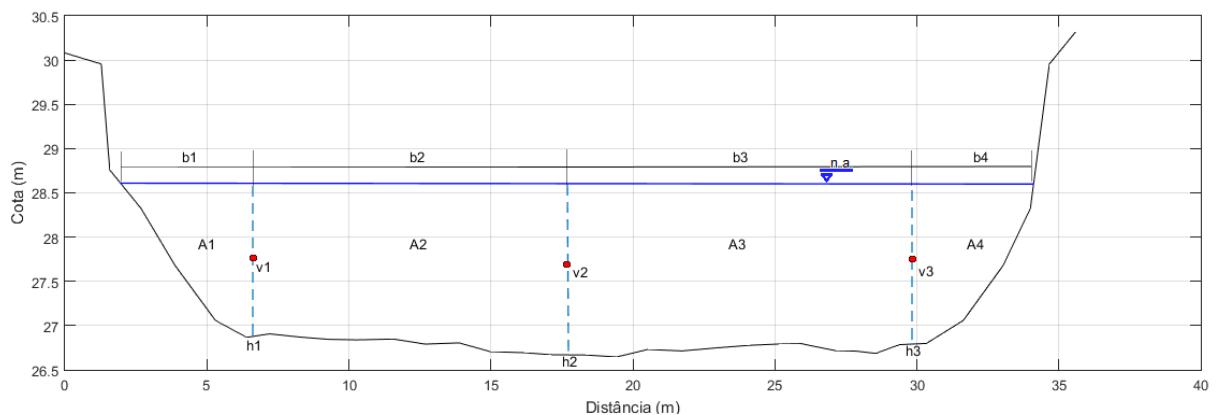
Selecionados um determinado período de dias com chuvas, se buscou sua relação com a vazão que transpassa na seção transversal onde ocorre a leitura de nível do rio. Dessa maneira foram coletados os níveis do canal no mesmo período de tempo do evento pluviométrico e esse nível foi convertido em vazão por meio da relação da curva chave.

### 3.1.3 Estimativa de Vazão

Os instrumentos hidrométricos mais comuns para medição de velocidade da água em rios são os molinetes, equipamentos dotados de um hélice sob eixo livre que gira quando impulsionada pela passagem da água. Outra opção se baseia na utilização de flutuadores, que boiam entre um intervalo de distância conhecida em um tempo a ser cronometrado, tornando possível estimar a velocidade, porém de forma menos precisa. A área da seção deverá ser estimada com auxílio de réguas, dessa forma o operador deverá estipular a medição entre diversas distâncias ao longo da seção transversal do rio, buscando manter um intervalo equidistante. Em cada vertical onde o nível de água for medido deverá ser estimada a velocidade na altura média, contudo caso o nível de água seja superior a 1 m, deverão ser mensuradas as

velocidades correspondente a 20%, 60% e 80% da coluna de água, conforme recomendação do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), pois segundo a mesma entidade, a velocidade média em uma determinada vertical corresponde de 80 a 90% da velocidade superficial, porém para o escoamento em canais abertos é a profundidade seis décimos que representa a melhor aproximação da velocidade média, assim recomendasse as medições nas outras alturas para determinação de uma média ponderada. Dessa forma a vazão será estimada a partir do somatório do produto entre as áreas e velocidades médias.

Conforme a figura abaixo, para cálculo das áreas ocorre por meio da aproximação das formas do relevo topográfico com as formas geométricas, sendo considerados a aproximação de triângulos para as áreas extremas e trapézios para as áreas centrais.



**Figura 11: Representação do método de cálculo de vazão por área média.**

Logo, temos que:

**Equação 22: Cálculo das áreas por aproximação geométrica.**

$$A_1 = \frac{b_1 \cdot h_1}{2}; \quad A_2 = \frac{(h_1 + h_2) \cdot b_2}{2}; \quad A_3 = \frac{(h_2 + h_3) \cdot b_3}{2}; \quad A_4 = \frac{b_4 \cdot h_3}{2}$$

A fim de serem tomadas as velocidades de uma mesma seção transversal será necessário georreferenciar pontos em cada um dos lados da margem, garantindo a realização das medições sempre no mesmo local. Para tal foram inseridos três piquetes de madeira, sendo dois posicionados próximos das margens opostas do rio, de forma a formarem uma reta ortogonal ao fluxo, onde posteriormente será transpassada uma corda que irá servir como baliza para as medições de nível de água e velocidade. Outro piquete será posicionado de forma mais retirada na margem direita do rio, esse terá a função de ser um intermédio entre os demais piquetes e um marco topográfico já georreferenciado, o qual é associado a um pluviômetro nas proximidades.

Além da proposta de medições de vazão em campo serão utilizados dados de vazões estimadas a partir da tomada de nível pela ANA para que se possa fazer juízo quanto a

ocorrência de vazões na região do posto da estação de nível de código 84095000 operada pela ANA.

### 3.1.3.1 *Montagem e Calibração do Molinete*

O equipamento é constituído por um sensor de vazão, que funciona através de uma hélice e um mecanismo que quantifica o número de giros em função da frequência. A contagem de giros ocorre devido ao efeito Hall, que consiste na diferença de potencial em um condutor elétrico transversal ao fluxo de corrente e um campo magnético perpendicular à corrente. O campo magnético é induzido por imãs previamente instalados em uma parte fixa da capa do sensor e em uma das hélices, promovendo diferentes alterações magnéticas de acordo com o número de giros do eixo que contém a hélice. Dessa maneira podemos relacionar um fenômeno natural, como a velocidade de um rio, à reposta de um sinal, que por sua vez é passível de ser estudado e gerar uma relação que possa ser empregada na análise de algum fenômeno físico natural.

Considerando que existe uma relação direta e linear entre o número de giros e a velocidade de um rio, a velocidade pode ser dada pela função do tipo,  $V = a \cdot n + b$ , onde “ $n$ ” corresponde ao número de rotações por tempo, e os coeficientes “ $a$ ” e “ $b$ ”, oriundos da análise de regressão, representam a inércia do sistema.

Para construção da haste foi utilizado um cabo telescópico de alumínio com comprimento de 4 metros, tipicamente utilizado para manutenção de piscinas. A essa haste foi colado um molde de adesivos com graduações em escala em centímetros, posteriormente a haste foi pintada com tinta específica na cor preta e após a secagem o molde de adesivo foi retirado, revelando a graduação pintada na haste. A etapa seguinte estabeleceu a ligação entre o sensor e a haste, onde pelo auxílio de uma placa de aço inox conformada nas dimensões do sensor o mesmo foi acoplado a ponta da haste em forma ortogonal ao seu eixo.



**Figura 12: Vista do sensor de vazão.**

Considerando que a haste possuía interior vazado, seu contato na coluna de água poderia comprometer o funcionamento da fiação que transpassa seu interior. Para solucionar a questão foi empregada uma rolha de silicone com diâmetro um pouco maior do que o da haste para garantir o máximo de vedação. Visto que o sensor se encontra acoplado a haste e que essa já possui a fiação transpassada por seu interior, no extremo oposto foi alocado um sensor controlador arduino, associado a um display de LCD para visualização dos dados obtidos. A utilização desse equipamento requer uma bateria de 9 volts para alimentação do sistema que é controlado por um algoritmo.



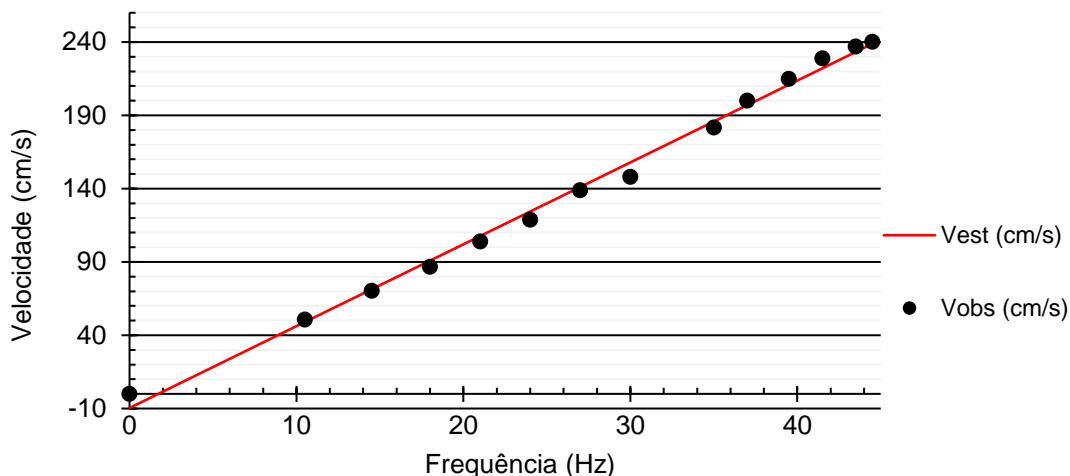
**Figura 13: Vista total do molinete.**

Para garantir que a estimativa de velocidade seja correta o molinete foi calibrado com uma bomba de recalque de precisão no Laboratório de Hidráulica (UNIVALI/Latec). Considerando que as vazões escolhidas na bomba eram já conhecidas, foi determinada a relação de frequência (número de giros) do molinete e respectivas vazões conhecidas.



**Figura 14: Calibração do molinete utilizando bomba de recalque.**

Assumindo a que a vazão observada e a frequência de rotações sejam diretamente proporcionais e tenham uma relação linear, a estimativa do coeficiente angular (a) foi de 5,584 e o coeficiente linear (b) de -9,641.



**Figura 15: Curva de calibração do molinete.**

Após os ensaios verificou-se uma boa correlação, cujo valor de  $r$  foi de 0,9977. A validade dessa equação pode ser confirmada pela correlação entre as variáveis amostrais, sendo que o coeficiente de determinação  $R^2$ , que mediu o ajustamento desse modelo estatístico linear foi avaliado em 0,9952.

**Equação 23: Equação de governo do molinete.**

$$V = 5,584 \cdot x - 9,641$$

Onde:  $V$  = velocidade estimada (cm/s)  
 $x$  = frequência (Hz)

### 3.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E MORFOMÉTRICAS

A área foi definida com a relação de ponto na foz do rio do Braço, que desemboca no rio Tijucas, que ocorre na área político-administrativa do município de São João Batista. Para delimitação foi utilizado o modelo digital do terreno, representado por meio de uma matriz ou grade com quadrados de tamanhos iguais, associado ao software ArcMap 10 do Pacote ArcGIS® desenvolvido pelo ESRI. As etapas principais desta delimitação consistiram na determinação da direção do fluxo, geração do fluxo acumulado, delimitar as drenagens extraídas do modelo e considerando um ponto como exutório da sub-bacia.

O processo de acumulação de fluxo onde irá ocorrer a acumulação do fluxo considerando a direção das vertentes, determinado os talvegues, assim é possível extrair e mensurar toda a rede hidrográfica, possibilitando o cálculo da densidade de drenagem. Também com a delimitação da bacia hidrográfica se torna possível determinar a forma da sub-bacia hidrográfica através do coeficiente de compacidade e fator de forma, que envolvem entrada

de dados de área, perímetro da sub-bacia, além do comprimento do rio principal, já detido. Com as extensões da rede de drenagem ainda é possível determinar a extensão média do escoamento superficial e a sinuosidade dos cursos de água, considerando a aplicação das respectivas equações.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DO RELEVO

Para caracterizar o relevo da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço o MDT foi a ferramenta base para essa etapa. Essa ferramenta por de entendida com a representação matemática da distribuição espacial da característica de uma superfície real, interpretada por coordenadas x, y e z.

A análise dos dados de elevação possibilitou a geração das curvas de nível e a criação de um modelo tridimensional do terreno, através do método de Redes Irregulares de Triângulos (TIN). A partir da distribuição de frequência de ocorrência das cotas extraídas foi possível obter a elevação média da bacia, além de traçar o perfil hipsométrico do canal principal que se inicia com o Rio Alto Braço e desemboca como Rio do Braço. O conhecimento das cotas da sub-bacia permitiu que fosse determinada a amplitude altimétrica.

Para fins de descrição das declividades na sub-bacia hidrográfica, foram utilizadas as classes recomendadas pela EMBRAPA (1979).

**Tabela 5: Classificação do relevo. Fonte: Adaptado de EMBRAPA (1979).**

Declividade	Relevo
00 – 03%	Plano, onde as superfícies possuem expressiva ocorrência de desnívelamentos muito pequenos.
03 – 08%	Suave ondulado, ocorrência de conjuntos de morros com declives suaves.
08 – 20%	Ondulado, superfície topográfica constituída por morros com expressiva declividade.
20 – 45%	Forte ondulado, onde a superfície é expressivamente dominada por morros de declividade acentuada.
45 – 75%	Montanhoso, predominância de formas accidentadas e grandes desnívelamentos.
> 75%	Escarpado, regiões onde predominam formas abruptas.

A geomorfologia e geologia dos solos correspondentes a área de estudo foram baseados no relatório técnico do mapeamento temático geral do estado de SC, que foi desenvolvido para a EPAGRI em 2008. Os dados foram adquiridos por meio de uma biblioteca digital mantida

no endereço virtual da mesma entidade e consistem em sistemas de informações geográficas representadas por meio de classificação em mapas. Esses dados foram processados e reduzidos para informações apenas da área de interesse desse estudo.

### 3.4 ÁREA DA MODELAGEM

Tendo em vista que a área que se deseja aplicar o modelo hidráulico consiste na área onde o Rio do Braço transpassa o perímetro urbano do município de Nova Trento, se deve considerar essa área como sendo o alvo de aplicação da modelagem. Porém as condições de contorno do modelo irão estar baseadas na área a montante da qual se deseja aplicar o modelo, pois baseada em suas características morfológicas consistirá na origem do escoamento superficial que irá atingir a seção de início da aplicação do modelo.

A área escolhida para início da aplicação do modelo foi determinada a partir dos limites peri-urbanos oficiais, delimitados pelo plano diretor municipal, considerando uma faixa de um quilômetro ortogonais para dois lados a partir do centro do canal, totalizando uma área de 24,38 km<sup>2</sup>. Essa escolha se deu pelo fato que a partir desse ponto já se verificam ocupações recorrentes nas áreas adjacentes ao rio.

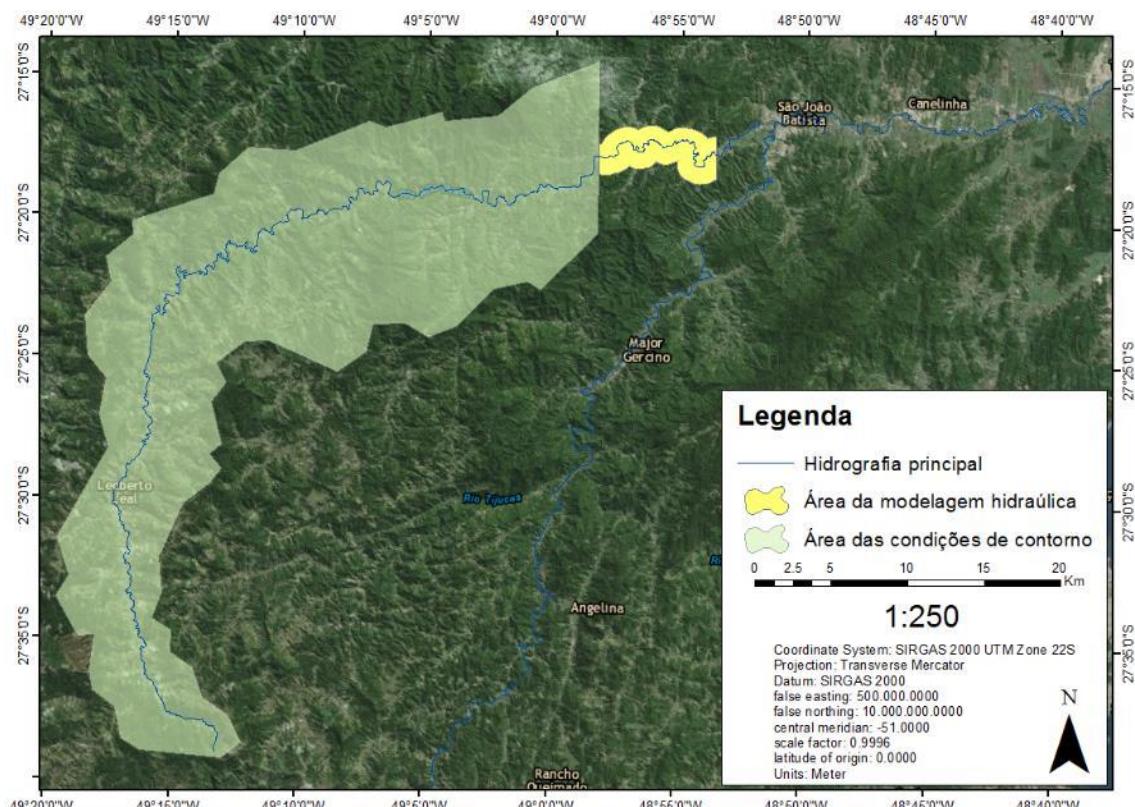


Figura 16: Delimitação da área para aplicação do modelo hidráulico.

### 3.4.1 Uso e Ocupação do Solo

A partir do levantamento aerofotogramétrico realizado a pedido da SDS, concluído em 2012, foram geradas ortofotos de cor natural, possuindo um bom nível de detalhamento, onde se mapearam diversas hidrografias e em sua máxima resolução, possibilitando identificar qualquer objeto no solo maior que um metro. Essas imagens consistem em arquivos formado por pixels, agrupados de forma matricial e o processo de extração de informações desse tipo de imagem, consiste em reconhecer padrões e objetos homogêneos que são utilizados para mapear áreas da superfície terrestre as quais correspondam aos temas de interesse.

A classificação do uso e ocupação do solo é realizada a partir de cada pixel, os quais tem características específicas que descrevem os objetos reais. Dessa forma, obteremos um mapa temático, o qual mostrará a distribuição geográfica de um tema, por exemplo a vegetação e uso da terra, a partir do comportamento espectral de cada pixel, pois cada região de pixel mapeada representa as diferentes radiâncias dos alvos de estudo.

No processo de classificação de dados digitais, os elementos presentes na superfície terrestre são conhecidos por classes temáticas pré-determinadas de acordo com a ocupação e usos do solo na sub-bacia hidrográfica. Os grupos de classes temáticas são apresentados por áreas que possuem características espetrais semelhantes, pois um alvo de interesse é dificilmente caracterizado por uma única assinatura espectral, dessa maneira é importante que as áreas de treinamento para a classificação sejam constituídas de várias amostras homogêneas da classe respectiva. Para realização da classificação do uso e ocupação do solo nesse estudo as classes temáticas escolhidas foram as seguintes:

- Floresta ombrófila densa: Áreas com predominância de vegetação nativa e remanescente, estruturalmente mais densa e desenvolvida, com indivíduos arbóreos de grande porte, formando dossel.
- Pastagem: Áreas com predominância de vegetação no estágio inicial de regeneração, vegetação mais rasteira com cobertura herbácea ou arbustiva aberta, ocorrendo presença predominante de gramíneas e herbáceas.
- Agricultura: Áreas com predominância de cultivos agrícolas de hortaliças e verduras.
- Área urbana: Áreas com solo desnudo e desprovido de qualquer tipo de vegetação ou cobertura artificial. Fazem parte dessa categoria as áreas urbanas com predominância de uso residencial, comercial serviços e uso múltiplo.
- Reflorestamento: Áreas com predomínio de espécies típicas de reflorestamento.
- Corpos hídricos: Corpos d'água mais volumosos, rios, igarapés, açudes, tanques artificiais e outros.

- Solo exposto: áreas com predomínio de solo exposto, seja por uso pós agrícola ou pós manejo de florestas de eucalipto.

Training Sample Manager				
ID	Class Name	Value	Color	Count
1	Floresta	31	Dark Green	247591
2	Pastagem	1	Light Green	7494
3	Área urbana	11	Red	2771
4	Solo exposto	21	Brown	6188
5	Reflorestamento	41	Green	15801
6	Agricultura	50	Yellow	19728

**Figura 17: Amostragem de assinaturas espectrais para classes de uso e ocupação do solo.**

Considerando que a área de estudo possui dimensões muito grandes a categorização utilizada para este trabalho baseia-se no método de classificação que considera a ponderação das distâncias entre médias das assinaturas digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos e irão avaliar a probabilidade de um pixel pertencer ou não à uma determinada classe ou a outra, levando em consideração a localização do mesmo segundo a distribuição espectral da classe.



**Figura 18: Exemplos de assinaturas digitais de distintos usos e ocupações de solo.**

A partir da determinação da classificação dos usos e ocupações do solo é possível calcular a área que cada classe temática ocupa na área de estudo e considerando os valores de Curva-Número encontrados na literatura para os vários usos, ocupações e tipos de solo é possível se ponderar o CN médio a partir da equação 8.

### 3.5 PRECIPITAÇÃO MÁXIMA

Para avaliar a dispersão e a associação entre as variáveis de precipitação estimada e observada foi aplicado um teste de Qui-Quadrado ( $\chi^2$ ), que não depende de parâmetros como média e variância. O princípio desse teste é comparar as possíveis divergências entre as frequências observadas e esperadas nos eventos de precipitação, verificando se o valor observado desvia significativamente ou não da frequência que é esperada ou estimada.

Em seguida, considerando a não divergência entre os valores estimados e observados, a determinação para escolha do melhor método de estimativa de precipitações extremas foi avaliada pelo ajuste da menor soma dos erros quadrados entre o valor estimado e os dados observados.

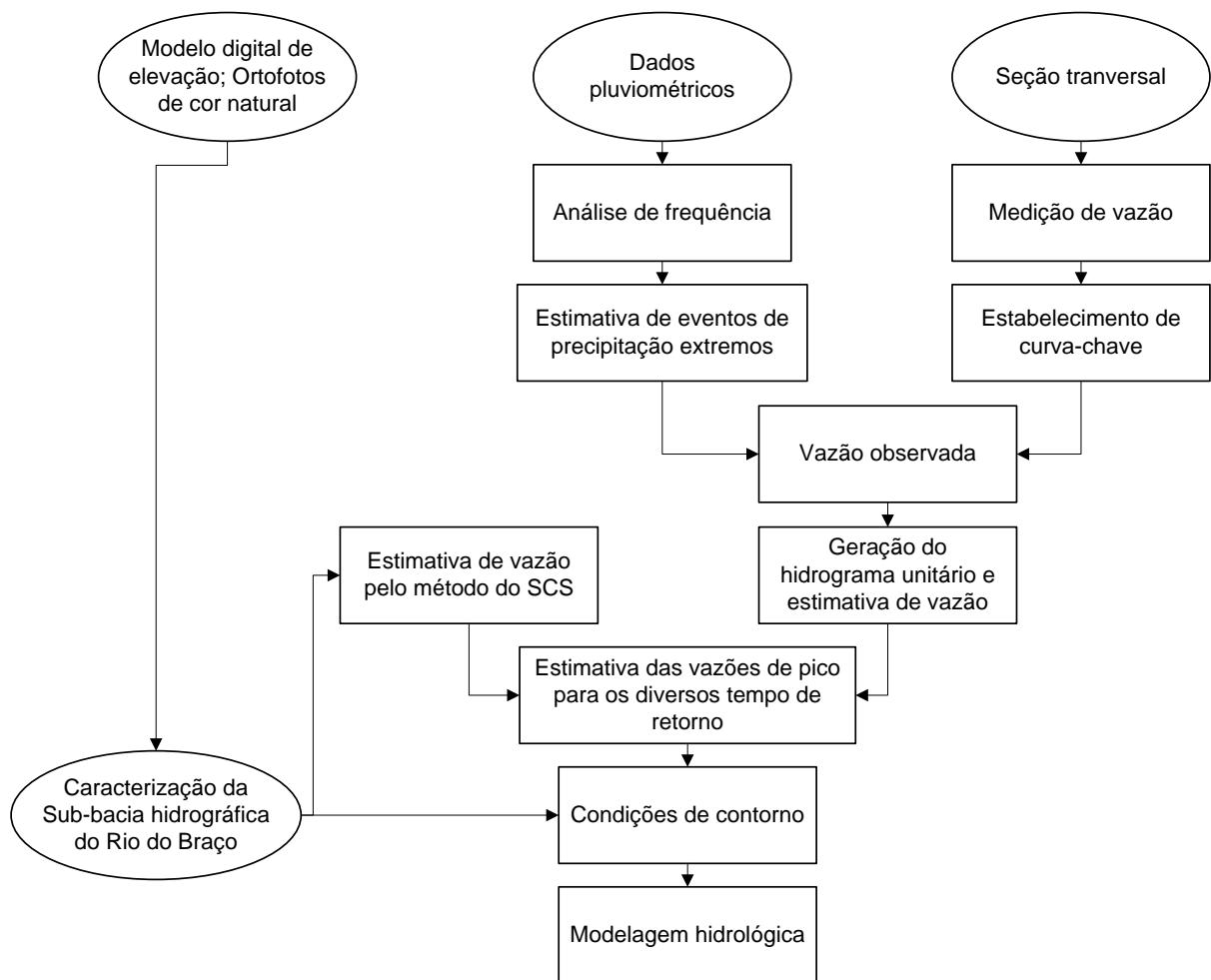
Foi escolhido um tempo de concentração considerando a indicação literária para a área da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço, pois cada equação pode subestimar ou sob estimar esse parâmetro. Para auxiliar a escolha foi aplicado um teste estatístico para verificar a diferença estatística entre os tempos, relevando quais valores estão fora da média.

### **3.6 ESCOAMENTO SUPERFICIAL**

Para determinação da chuva efetiva foram comparados os valores estimados para um evento de vazão já conhecida pelos métodos do SCS e do hidrograma unitário, sendo possível avaliar a diferença de erro quadrado entre os valores. Dessa forma foi considerado o melhor método de estimativa e que irá ser utilizado na estimativa das vazões de pico para simulação hidráulica o modelo que produzir menor somatório de erros quadrados entre a série observada e a série gerada por estimativa.

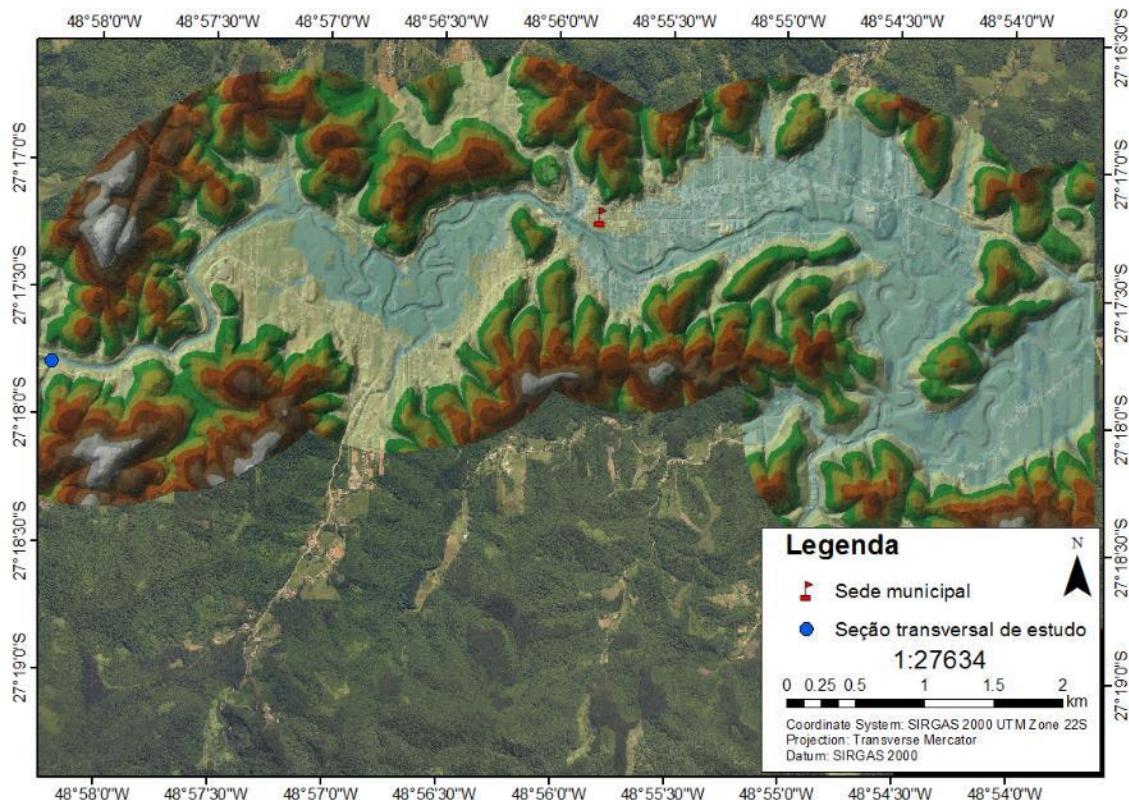
### **3.7 MODELAGEM**

Para modelagem hidráulica no software HEC-RAS é necessário que sejam apuradas as feições do canal de estudo. Para esta função foi empregada a extensão HEC-GeoRAS, que consiste em uma ferramenta que auxilia a extração dos dados do modelo digital do terreno a partir de um software GIS. Além das feições, são necessários dados de condições de contorno que irão servir como base para os níveis de água iniciais no modelo. Os dados de condições de contorno foram extraídos por meio da caracterização da sub-bacia hidrográfica bem como na estimativa de chuvas extremas e de escoamento superficial. O fluxograma abaixo, demonstra de forma resumida as etapas necessárias para possibilitar a execução do modelo hidrológico.



**Figura 19: Fluxograma das principais etapas de processamento de dados para entrada e execução da modelagem.**

Inicialmente foram extrair as curvas de nível do modelo digital de elevação, as quais para esse trabalho foram obtidas com intervalos de um metro entre si. O passo seguinte consiste na criação de um modelo tridimensional da área de estudo a ser modelada a partir das curvas de nível extraídas, assim o modelo digital TIN (*Triangulated Irregular Network*), interpola os valores de altitude do modelo por meio da criação de triângulos entre uma curva de nível e outra e cria um modelo matemático com valores de altitude.

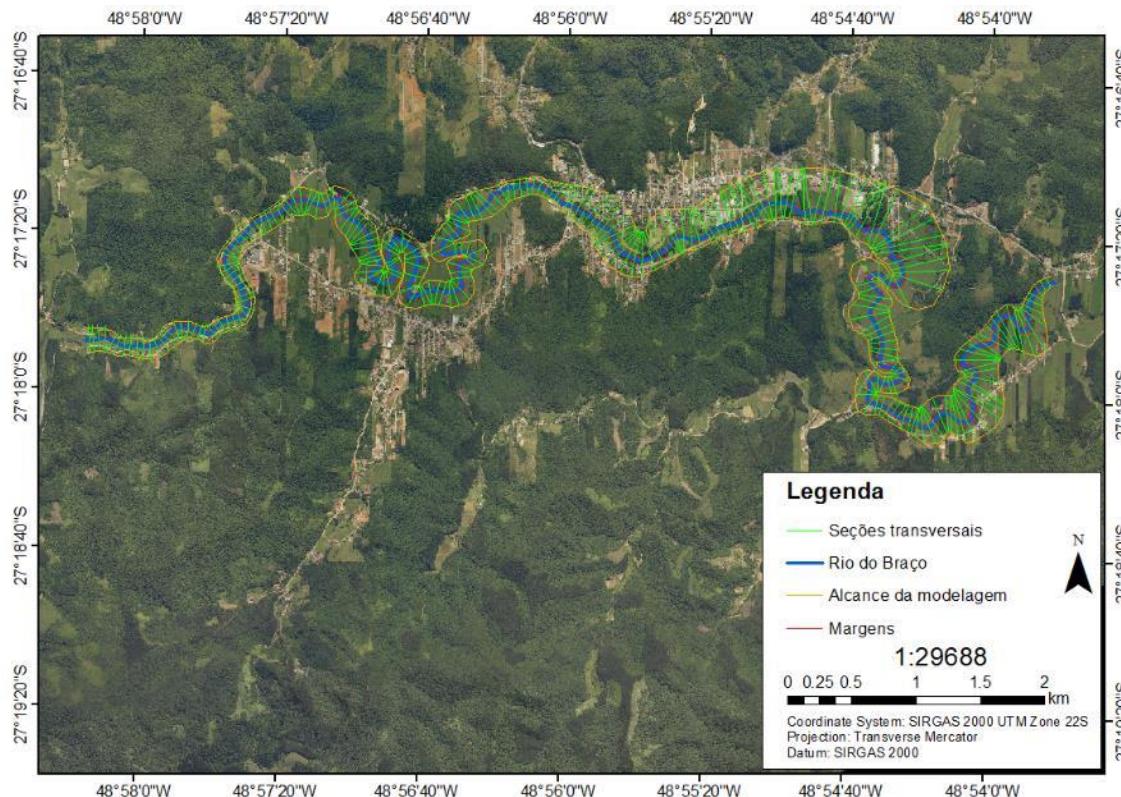


**Figura 20: Modelo digital tridimensional da área a ser aplicada a modelagem hidráulica.**

De posse do modelo digital tridimensional, os passos seguintes consistem na identificação de feições do canal. A primeira a ser determinada consiste no seu centro, em seguida suas margens, a área limite para execução da modelagem hidráulica e posteriormente, o estabelecimento das seções transversais. Todos esses atributos são identificados através de linhas, onde cada seguimento é georreferenciado por cada pixel do modelo digital, sendo identificado pelas coordenadas x, y e z do plano de referência. Os dados extraídos são então identificados como canal do rio, margem esquerda e direita, além de ser determinado o sentido do fluxo, constituindo parte dos dados de entrada do modelo hidráulico.

Salienta-se que as feições devem ser desenhadas a partir da margem esquerda e sempre no sentido de montante para jusante, em virtude da padronização das informações que serão posteriormente utilizadas para a modelagem dentro do software HEC-RAS.

Em seguida serão assinados os atributos a serem exportados de algumas das feições criadas. No caso do canal, além de suas coordenadas no modelo digital serão exportadas as suas características de topologia e de comprimentos e seções transversais. A opção seguinte se refere a exportação dos atributos das seções transversais do rio, sendo esses o rio no qual se encontram, suas posições ao longo do canal, sua posição em relação as margens do rio, os comprimentos entre cada seção ao longo do canal e as respectivas cotas de cada ponto.



**Figura 21: Feições de entrada para o modelo hidráulico.**

Tendo prontas todas as características a serem utilizadas como dados de entrada para o modelo hidráulico é iniciada a exportação dos dados no formato GIS. Em seguida os dados devem ser importados através do software HEC-RAS.

Os parâmetros para modelagem hidráulica referente aos coeficientes de Manning, foram determinados em função da maior predominância de textura granulométrica média e fina/siltosa, justificando a adoção para o coeficiente  $n$  de 0,030 no fundo do canal e 0,020 nas margens, conforme base na literatura para canais naturais, curvilíneos e com predominância de sedimentos finos.

Com o intuito de conhecer as vazões produzidas por um evento de precipitação extremo, foram simulados os modelos de precipitação-vazão conforme metodologia do *Soil Conservation Service* e de acordo com o comportamento hidrológico da área de estudo originado a partir do hidrograma unitário. Por recomendação de Leopardi (2015), a partir dos riscos dos fenômenos hidrológicos e suas características periculosidades os cenários foram adaptados em três categorias, de inundações recorrentes (Tr entre 10 e 50 anos), de inundações pouco frequentes (Tr entre 50 e 200 anos) e de grandes inundações (Tr igual ou maior que 200 anos).

### 3.7.1 Análise da Modelagem Hidráulica

Na análise dos cenários foi confrontado o mapa de uso de solo com os dados da modelagem no HEC-RAS, com a intenção de verificar a possibilidade de extravasamento da calha do rio principal. Assim foi possível mapear esses locais de maior suscetibilidade a inundação, identificando as melhores áreas para expansão urbana, caso houver.

Conforme Preciso (2010) o cálculo e a definição das vazões de pico podem ser adequados para confrontar os dados mensurados em campanha em diferentes situações com os resultados estimados para utilização nas condições de contorno da modelagem, assim verificando eventuais incongruências nos dados que podem afetar o resultado, possibilitando a avaliação de uma margem de erro aceitável.

Ao final, com a criação das manchas de inundação sobrepostas a imagem de satélite foi possível verificar a vulnerabilidade hidrológica, sendo a característica de uma área que se mostra frágil frente as inerentes ameaças de inundações (FREITAS, 2015). Para localizar essas áreas, serão identificadas as regiões onde se verificará o conflito de ocupação entre a expansão do município de Nova Trento e o mapa de inundação oriundo da modelagem hidráulica.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO BRAÇO

A área de drenagem da sub-bacia hidrográfica do rio do Braço corresponde a uma extensão de 675,72 km<sup>2</sup>, a qual possui um perímetro de 197,25 km. Considerando os rios principais como sendo o rio Alto Braço e o rio do Braço, esses, possuem respectivamente um comprimento de 91,74 km e 24,1 km, além disso, o somatório de todos os comprimentos dos cursos de água inseridos na sub-bacia hidrográfica do rio do Braço correspondem a 2.126,79 km.

Considerando os dados extraídos da análise do modelo digital de elevação, a densidade de drenagem encontrada na sub-bacia hidrográfica do rio do Braço foi de 3,15 km/km<sup>2</sup>, quanto a esse valor se pode dizer que a sub-bacia possui baixa densidade de drenagem (STHRALER, 1957), que pode estar associada uma região onde existe o predomínio de rochas permeáveis e de regime pluviométrico caracterizado por chuvas de baixa intensidade.

Estimou-se o coeficiente de compacidade conforme metodologia comentada, o índice foi avaliado em 2,12, indicando que a sub-bacia não possui formato circular, o qual acarreta em uma maior distribuição do escoamento superficial em relação ao tempo, assim o escoamento direto de uma dada chuva na bacia não se concentra tão rapidamente, além disso por ser uma bacia alongada e estreita dificilmente deve ser atingida integralmente por chuvas intensas.

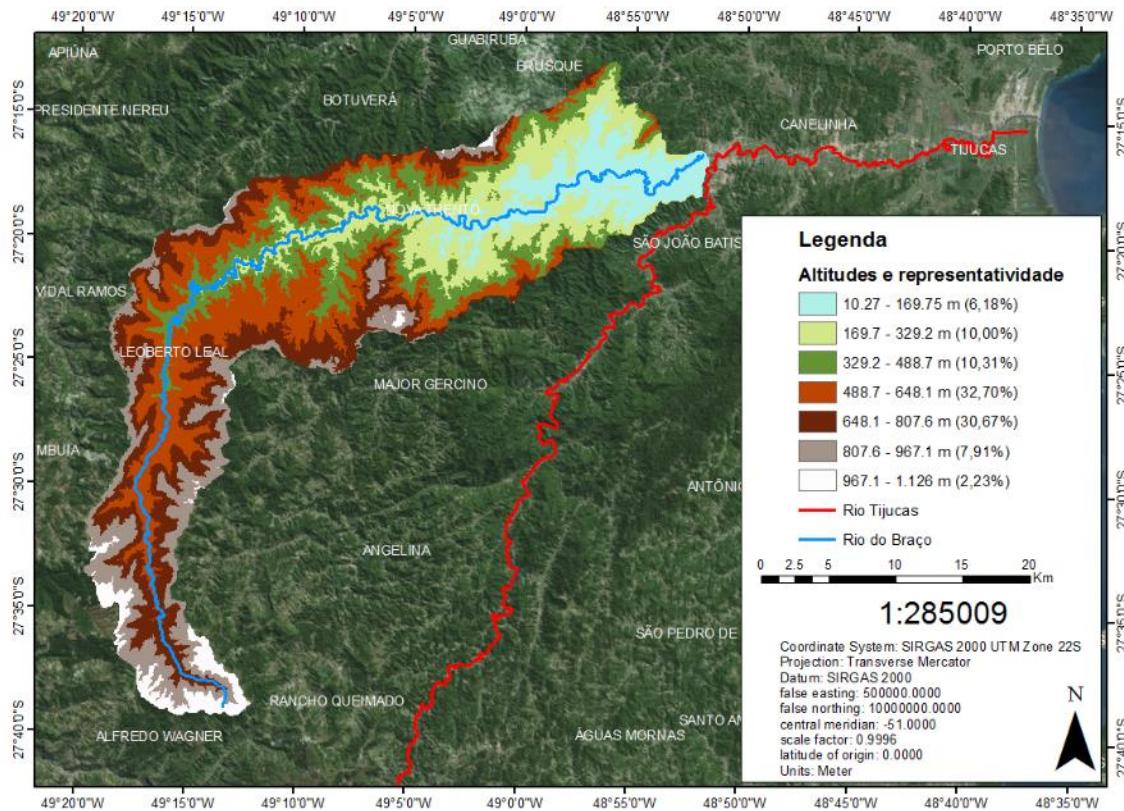
A relação entre a razão da largura média de uma bacia e o comprimento do curso de água principal ( $Kf$ ) foi estimado em 0,03, o que demonstra que a sub-bacia hidrográfica do rio do Braço possui baixa propensão a enchentes.

A distância média que a água interceptada em qualquer ponto da sub-bacia hidrográfica do rio do Braço, percorreria até atingir um corpo hídrico seria de 79,43 m.

Considerando o comprimento do rio principal (115,91 km) como sendo a continuidade entre o rio Alto Braço e o rio do Braço e o comprimento do respectivo talvegue (54,56 km). A sinuosidade do curso de água principal foi avaliada em 2,12%.

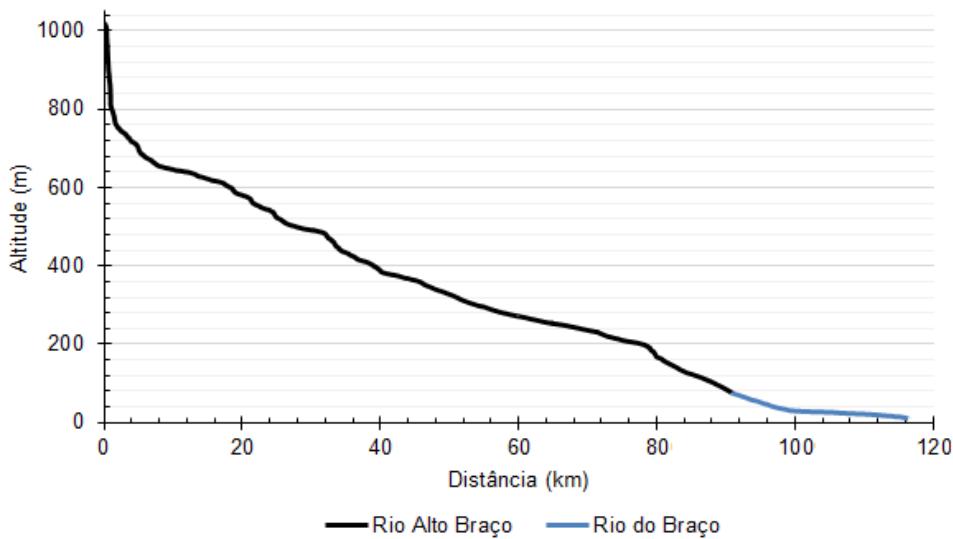
A altura máxima registrada foi de 1.126 m, sendo a mínima de 10,3 m isso acarreta em uma amplitude altimétrica de 1.116,3 m. Conforme metodologia, para melhor representação da variabilidade de cotas da sub-bacia do rio do Braço foram determinados 7 intervalos de classes de altitudes. A elevação média da sub-bacia hidrográfica do rio do Braço é de 524,97 m. Cada intervalo de classe representa uma parcela do número total de cotas, dessa maneira

podemos destacar o intervalo de 488,7 m e 648,1 m é o que detém maior representatividade, com 32,70% da amostra, em seguida o intervalo de classe entre 648,1 m e 807,6 m é o segundo maior representativo, com equivalente a 30,67% do total amostrado.



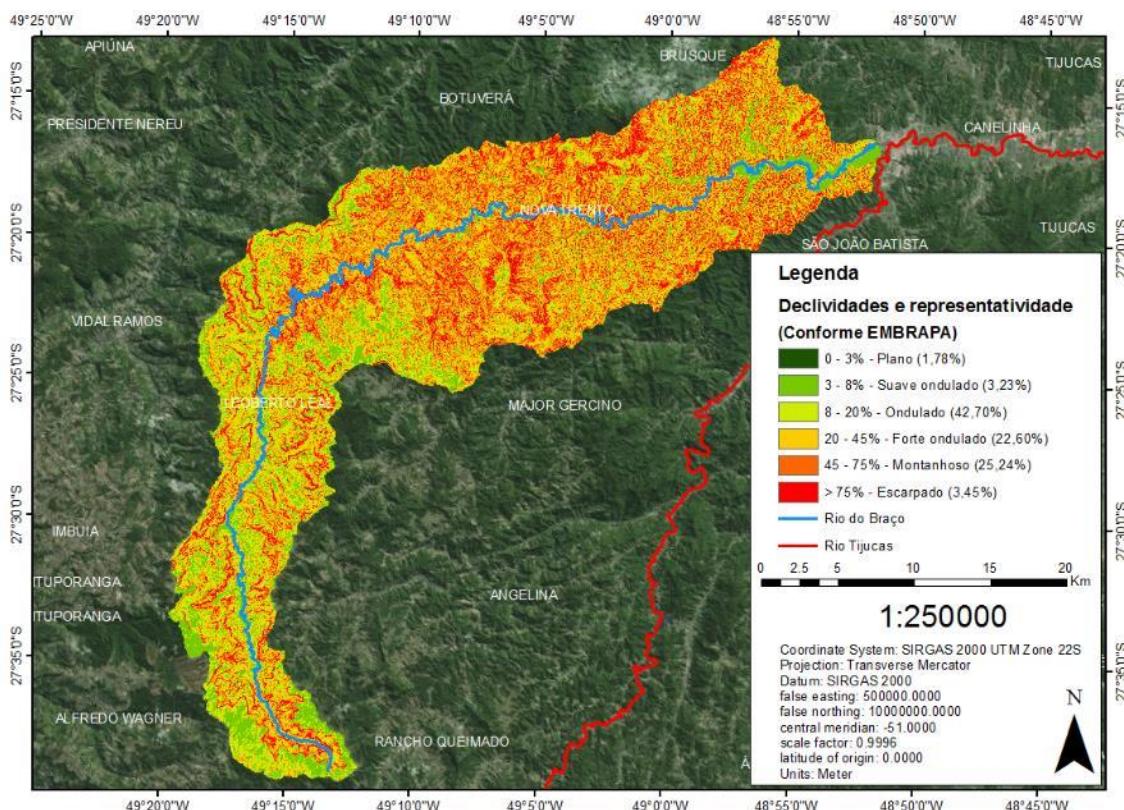
**Figura 22: Hipsometria da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.**

Considerando a posição que o rio possui em cada cota foi possível demonstrar a relação entre essas variáveis, evidenciando o comportamento da altitude a medida que o rio se aproxima da foz. Se percebe que o Rio Alto Braço é caracterizado por uma grande declividade, que ocorre da posição zero até 91,74 km. Por outro lado o Rio do Braço não possui grande declividade e encontra-se representado da distância de pouco mais de 91,74 km até sua desembocadura no Rio Tijucas, que ocorre em 115,91 km após o ponto de origem do perfil. Tendo em vista a amplitude altimétrica do rio principal e o seu comprimento, a declividade do canal referente ao trecho do Rio Alto Braço foi estimada 0,01199 m/m, por outro lado no trecho do Rio do Braço obteve-se a declividade de 0,00067 m/m.



**Figura 23: Perfil altimétrico do principal curso da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.**

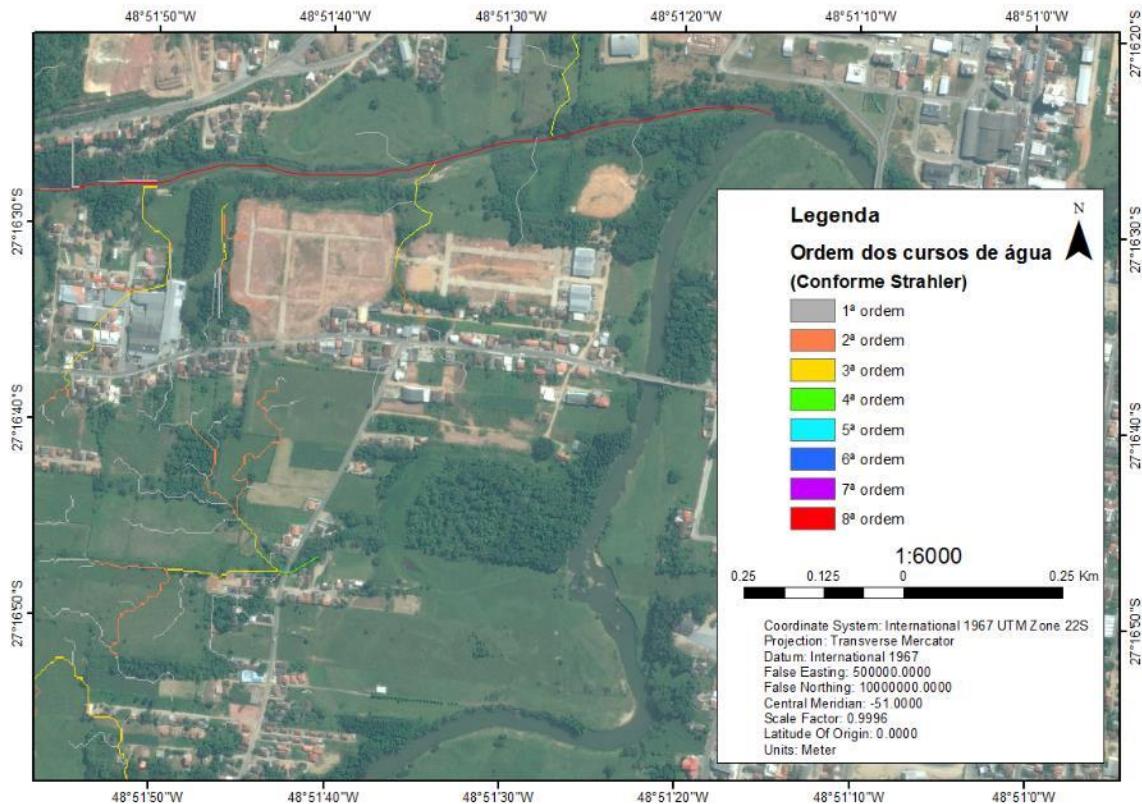
A declividade média da sub-bacia hidrográfica do rio do Braço foi estimada em 34,45%, que segundo a EMBRAPA (1979), é característico de forte ondulado. Para melhor representação da variabilidade das declividades da sub-bacia foram determinados 6 intervalos de classes conforme recomenda a EMBRAPA (1979). As representatividades mais expressivas se deram no intervalo de 8 a 20% (42,7%), determinados como relevo ondulado, seguido por relevo montanhoso (27,24%) e forte ondulado (22,6%). Frente às outras classes, as formas de relevos plano, suave ondulado e escarpado não foram registradas de forma tão expressiva.



**Figura 24: Declividades da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.**

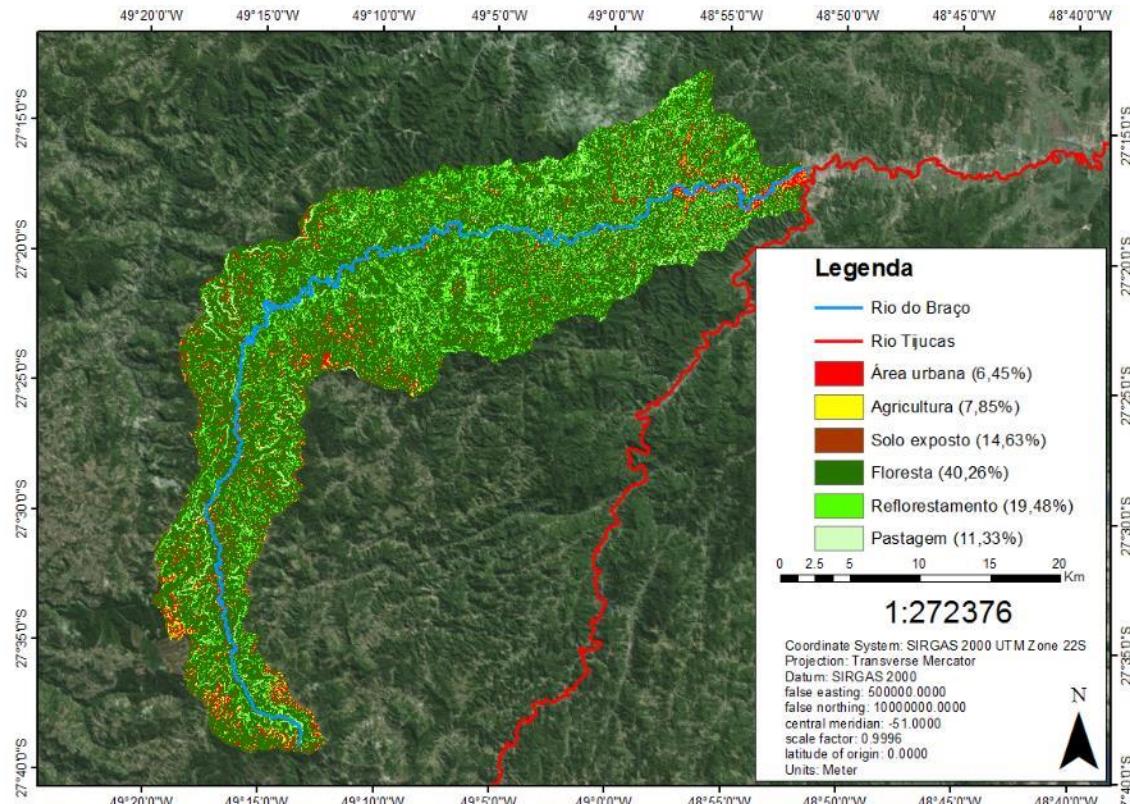
Através da amplitude altimétrica e do comprimento o rio principal foi possível estimar os tempos de concentrações de acordo com as equações de Kirpich, Ven te Chow e *Corps Engineers*, foram estimados respectivamente os tempos de 11,81; 11,88 e 13,72 horas. Os valores de tempos de concentração estimados foram submetidos a um teste de comparação múltipla de Fisher, sob a aplicação com alfa de 0,05, com o intuito de verificar a diferença ou igualdade entre os valores, dessa maneira, a submissão ao teste de comparação demonstrou que entre os tempos de retorno calculados a partir das equações de Kirpich e Ven te Chow tem valor considerado igual a nível de significância de 95%. Por outro lado, a estimativa realizada por meio da equação de *Corps Engineers* resultou em valores divergentes dos demais estimados.

Considerando o rio principal e os rios tributários do sistema de drenagem da área de estudo, pode-se inferir sob a velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica, pois quanto maior for o grau de ramificação da rede de drenagem de uma bacia, é maior a tendência de eventos com altos picos de cheia. No caso da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço, a medida quantitativa da complexidade de ramificações resultou como sendo de 8<sup>a</sup> ordem, conforme é possível se verificar na imagem seguinte, a qual possui enfoque na desembocadura do Rio do Braço com o Rio Tijucas.



**Figura 25: Hierarquização de ordens dos cursos de água na região da desembocadura do Rio do Braço.**

Por meio da classificação supervisionada da ortofoto de cor natural foi possível obter uma estimativa da caracterização do uso e ocupação do solo da área de estudo. Por meio dos dados foi avaliado que 40,26% do total da área era compreendido por floresta, 19,48% composto por monoculturas de reflorestamento, 14,63% com áreas de solo exposto, 11,33% de áreas de pastagens, 7,85% com presença de áreas de agricultura e 6,45% com ocupação urbana.



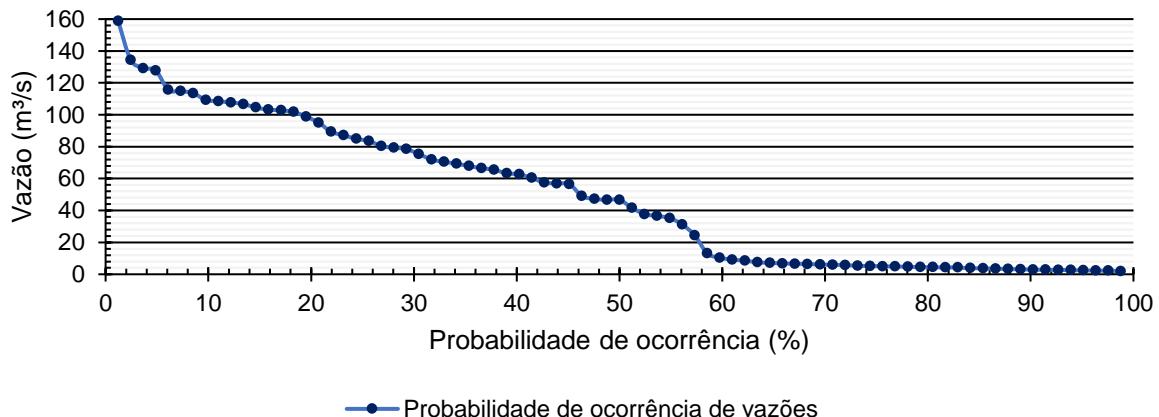
**Figura 26: Uso e ocupação do solo da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço.**

Com intuito de estimar o CN médio da área de estudo, se buscou na literatura índices correspondentes para cada tipo de ocupação do solo. Além disso, a partir da fração de percentil correspondente a cada uso do solo foi determinado a sua área de ocupação e considerando que o perfil de solo mais correspondente ao da área de estudo seja do tipo B, o CN médio foi estimado em 65,40.

**Tabela 6: Valores utilizados para estimativa do CN médio da área de estudo.**

Uso do solo	Fração correspondente (%)	Área	CN adotado
Área urbana	6,45	43,58	92
Agricultura	7,85	53,03	76
Solo exposto	14,63	98,83	82
Reflorestamento	23,48	158,64	68
Floresta	36,26	245,00	52
Pastagem	11,34	76,64	59

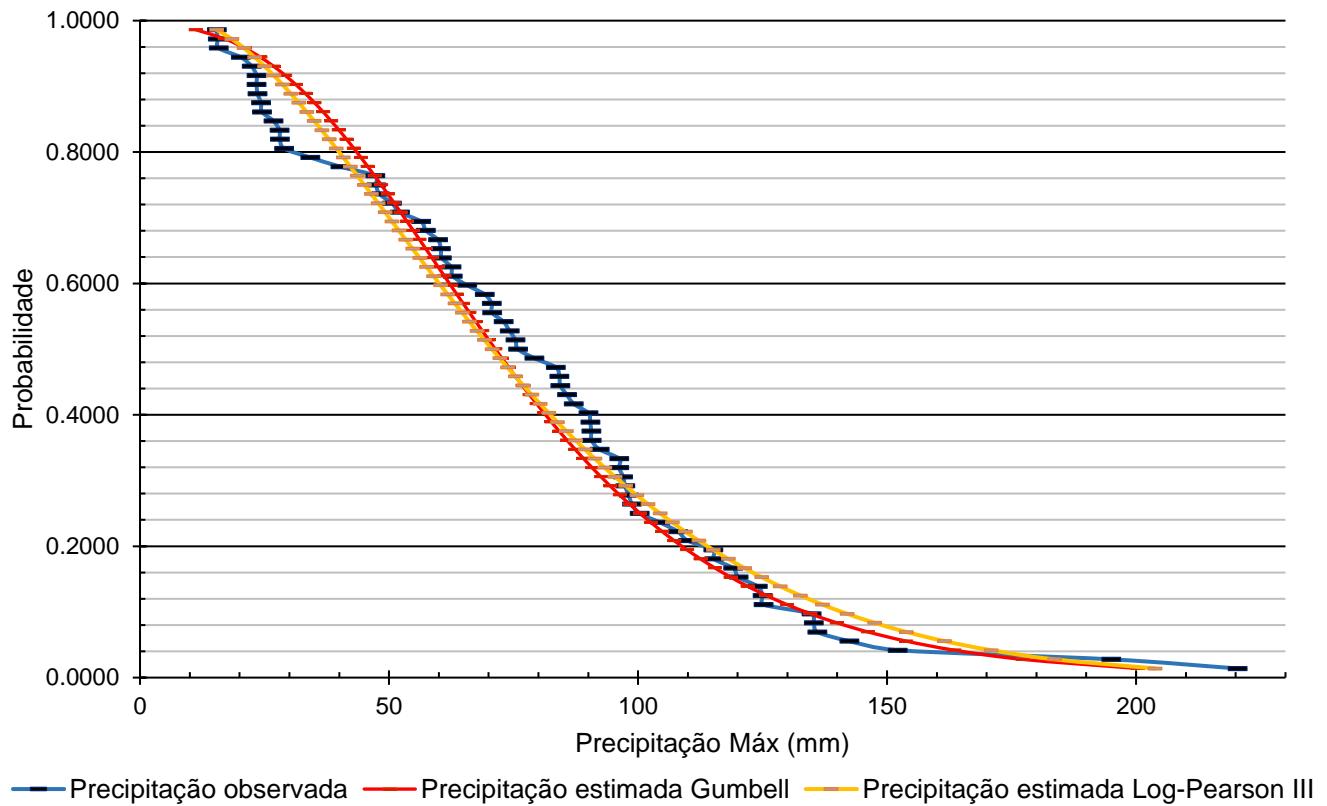
Com base nos dados de vazões estimados pela ANA a partir da tomada de nível na região do posto da estação de nível de código 84095000. Foram selecionadas as vazões anuais máximas e mínimas, que foram organizadas e empregadas na estimativa da probabilidade de sua ocorrência frente a existência de todas as outras vazões estimadas. A probabilidade de ocorrência de cada vazão foi associada a vazão estimada, possibilitando a aproximação de uma curva de permanência de vazões.



**Figura 27: Curva de permanência de vazões.**

## 4.2 ESTIMATIVA DE EVENTOS EXTREMOS

A partir da análise de frequência por meio da distribuição de Gumbell e Log-Person III da série histórica de precipitações coletadas na estação pluviométrica da ANA, foram obtidos valores esperados para os tempos de retorno de projeto, nos quais foram baseadas as modelagens de precipitação-vazão e simulação hidráulica. Para validação dos dados foram aplicados testes de variância do tipo Qui-Quadrado, onde a nível de confiança de 95% foi rejeitada a diferença entre a série observada e a estimada. Entre os dois modelos foram avaliados o somatório dos erros relativos e absoluto, sendo respectivamente obtidos os valores de 13,3% e 3,7 a partir da estimativa de Log-Pearson III e 21,8% e 3,5 no modelo de estimativa por Gumbell. Tendo em vista a menor erro acarretado pela estimativa de Log-Pearson III confirmou-se esse como o melhor modelo de estimativa para eventos de precipitação extrema.



**Figura 28: Comparativo entre modelos de estimativa de precipitações extremas e observadas.**

Tendo avaliado o melhor modelo para estimativa de eventos de precipitação extrema foram determinados tempos de retorno específicos e estimadas as variáveis necessárias para estimativa de eventos extremos pelo método de Log-Pearson tipo 3, ficando localizado na coluna do lado extremo direito os valores calculados de precipitações máximas.

**Tabela 7: Estimativa de eventos de precipitações extremas através do modelo Log-Pearson III.**

TR	2	5	10	25	50	75	100	200
$P_{ESTIMADA}$	70,66	113,92	140,92	172,21	193,39	204,94	212,81	230,69

#### 4.3 LEVANTAMENTO DE SEÇÃO TRANSVERSAL

O levantamento topográfico do local a ser estabelecida a seção transversal de referência se deu pouco a jusante da ponte que liga as localidades de Trinta Réis e Salto, no município de Nova Trento. É também referência do limite extremo da considerada área urbana do município, local no qual consiste no início da área a ser aplicada a simulação hidrológica de eventos extremos.

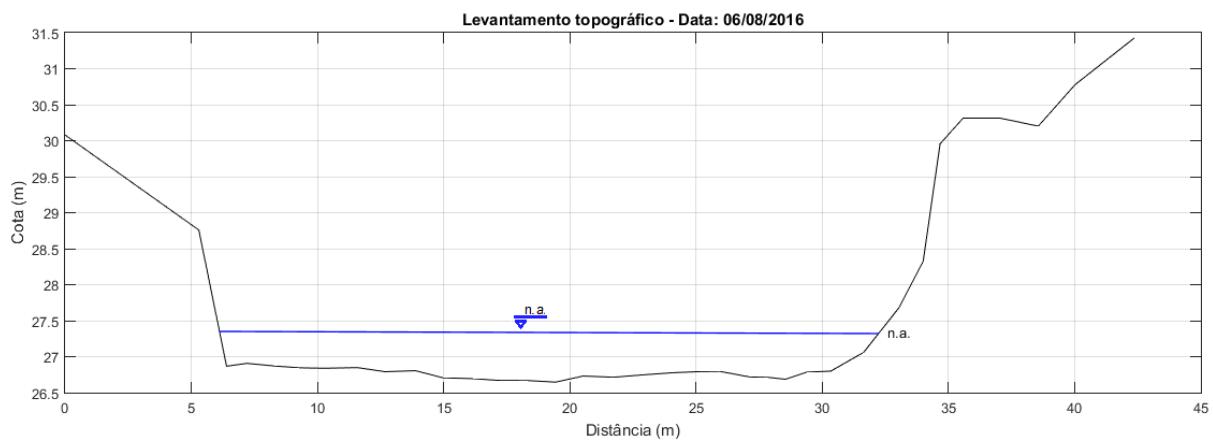
Foi apurada um ponto georreferenciado nas dependências da área, o qual tratou-se de um marco tronco piramidal localizado nas coordenadas 48°58'13.57318"S, 27°17'48.63303"E

cota de 36,35 m situado dentro de um cercado que protege equipamentos de estudos hidrológicos da empresa gestora das PCH's a montante.



**Figura 29: Vista da localização do marco georreferenciado.**

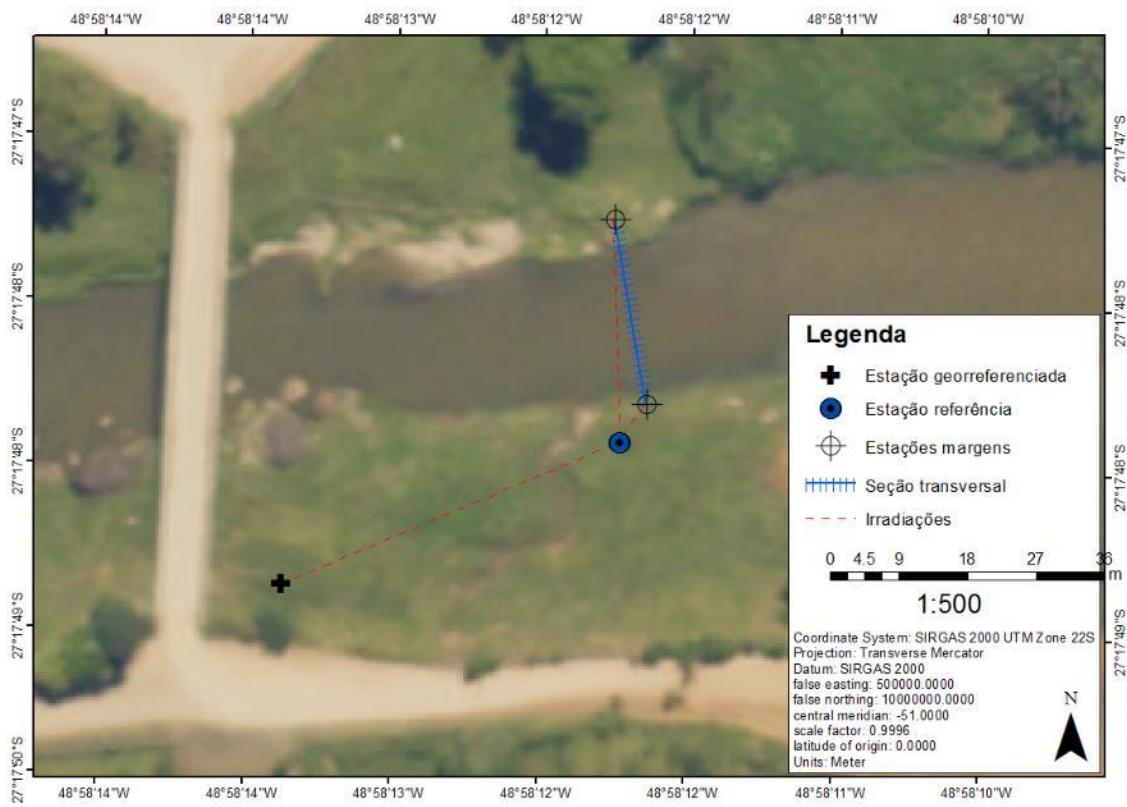
Em seguida foi colocada uma estaca de referência próxima ao local desejado para estabelecimento da seção transversal, nesse ponto foi estacionada uma estação topográfica utilizada para realizar a leitura do ponto georreferenciado a partir do posicionamento de um prisma acoplado a um bastão topográfico. Essa irradiação foi realizada com intuito de localizar a estação de referência, da qual partiram novas irradiações para identificação das estacas localizadas em ambas as margens do rio, na qual seria estabelecida a seção transversal. Ao final dos levantamentos topográficos foi possível determinar a seguinte seção.



**Figura 30: Croqui da seção transversal obtida a partir do levantamento topográfico realizado em 06 de agosto de 2016.**

Estabelecida a localização da seção transversal por meio das estacas extremantes em cada uma das margens foi estirada uma corda para servir como referência e orientar as medições

de velocidade e tomadas de profundidade ao longo da seção, conforme croqui abaixo é possível se verificar o posicionamento do projeto.



**Figura 31: Mapa de localização dos pontos de referência e seção transversal.**

As medições de vazão foram iniciadas em 06 de agosto de 2016 e finalizadas em 15 de outubro de 2016 sendo totalizadas 17 visitas a campo, que resultaram na medição da área e velocidades da seção transversal de estudo. A partir dos dados de cada medição de campo foi calculada a área particionada da seção transversal e relacionada com a velocidade medida equivalente. A maior medição realizada em 07 de setembro de 2016 constatou a vazão de 9,35 m<sup>3</sup>/s, cujo perfil teve profundidade e velocidade máximas de 0,94 m e 0,74 m/s configurando o cenário com maior dificuldade de medição. Por outro lado, dentre a série de medições realizadas, o registro da menor vazão ocorreu no dia 27 de setembro de 2016, onde se verificou que a descarga do rio era de 3,14 m<sup>3</sup>/s, obtidas de uma série de dados em que a profundidade máxima constatada foi de 0,62 m e velocidade máxima de 0,57 m/s.

No anexo A é possível constatar os croquis das seções transversais observadas em cada campanha, além de um breve resumo quanto a vazão, área e velocidade média calculada para cada seção transversal.



**Figura 32: Realização de medições de profundidade e velocidade ao longo da referência transversal.**

Cada medição em campo foi relacionada com o nível de referência arbitrário estabelecido, de forma a possibilitar a afinidade entre as vazões e tornando possível o estabelecimento de uma curva chave.

**Tabela 8: Histórico de medições de vazão.**

Data	Campanha	h (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Hora		
				Inicial	Final	Duração
06/08/2016	1	0,66	5,17	16:03:00	17:23:00	01:20:00
26/08/2016	2	0,71	6,05	17:33:00	18:04:00	00:31:00
27/08/2016	3	0,70	5,84	15:03:00	15:34:00	00:31:00
07/09/2016	4	0,97	9,35	16:12:00	16:48:00	00:36:00
08/09/2016	5	0,90	8,54	17:30:00	18:09:00	00:39:00
27/09/2016	6	0,60	3,14	10:42:00	11:05:00	00:23:00
29/09/2016	7	0,59	3,48	18:08:00	18:31:00	00:23:00
30/09/2016	8	0,60	3,30	15:00:00	15:28:00	00:28:00
03/10/2016	9	0,60	3,24	14:42:00	15:03:00	00:21:00
05/10/2016	10	0,64	4,95	17:25:00	17:47:00	00:22:00
07/10/2016	11	0,65	5,07	14:33:00	14:56:00	00:23:00
09/10/2016	12	0,62	3,71	15:22:00	15:44:00	00:22:00
11/10/2016	13	0,62	4,15	15:42:00	16:05:00	00:23:00
12/10/2016	14	0,62	4,61	17:41:00	18:06:00	00:25:00
13/10/2016	15	0,63	4,98	17:50:00	18:16:00	00:26:00
15/10/2016	16	0,74	6,56	11:10:00	11:36:00	00:26:00
15/10/2016	17	0,75	6,87	13:50:00	14:14:00	00:24:00

Foi analisada a dispersão da série de dados de vazão e nível de referência resultando a figura 33. Conforme é possível verificar, os pontos em preto se referem as medições realizadas enquanto que, a linha sólida corresponde a curva chave estimada por meio da linearização

dos dados de vazão e nível, sendo esse último subtraído por pela variável  $h_0$ , que consiste no ajuste da curva do modelo. A partir da análise dos coeficientes da regressão linear do conjunto foi determinado o anti-log do valor de interceptação da reta no eixo x, que se refere a variável a do modelo da curva chave. O coeficiente angular por si só corresponde ao próprio  $b$  do modelo, resultando na equação:

**Equação 24: Curva chave estimada para a seção transversal de estudo.**

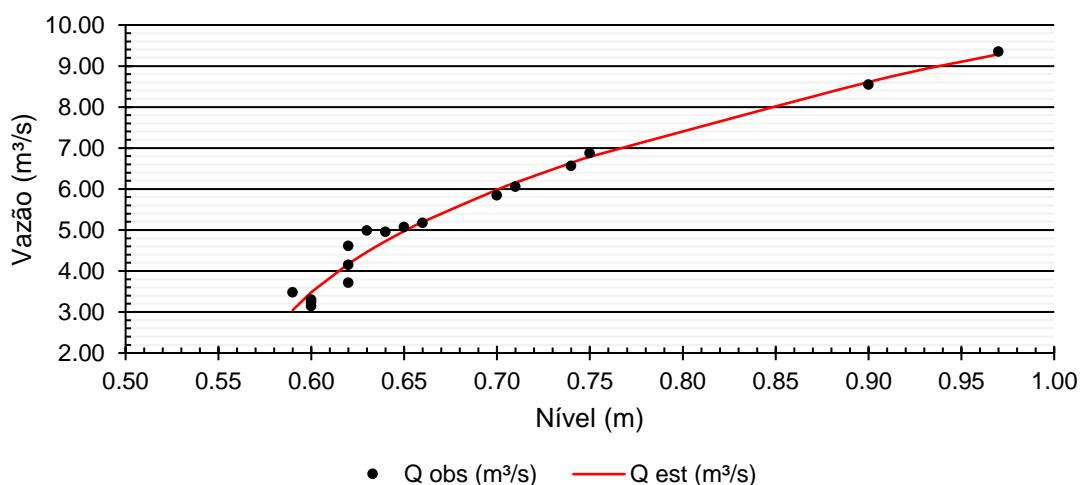
$$Q_{est} = 13,33438 \cdot (h - 0,565)^{0,400210}$$

Onde:

$Q_{est}$  = vazão estimada ( $m^3/s$ )

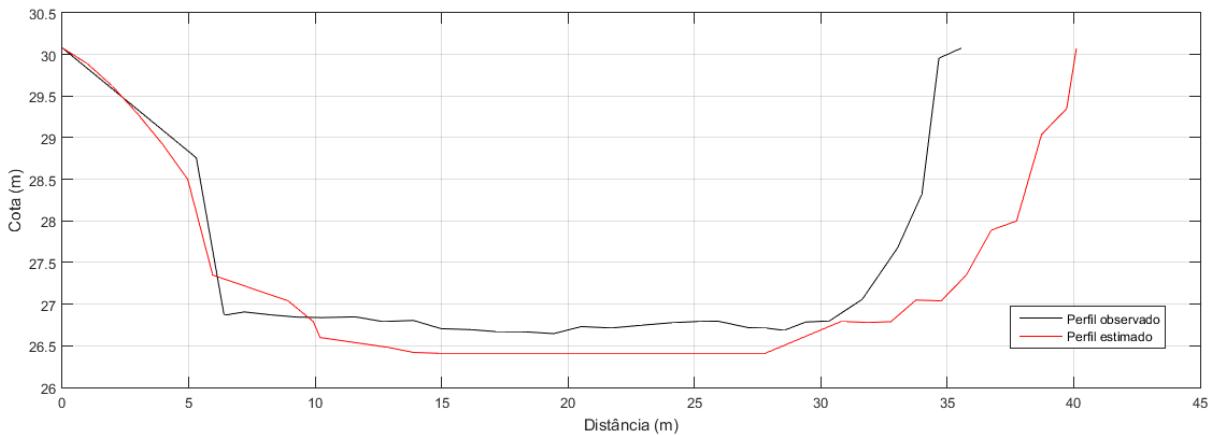
$h$  = nível de água (m)

O ajustamento do modelo estatístico foi realizado através de cálculo iterativo no software Excel e determinado quando os valores dos coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $h_0$  produziram o menor somatório dos erros quadrados entre a vazão observada e a estimada, que resultou no somatório de erros quadrados de 1,18% e  $h_0$  igual a 0,400210.



**Figura 33: Correlação entre vazão e nível observados.**

Para avaliar a precisão dos dados das eventuais seções transversais que podem ser extraídas do modelo digital de elevação da área de estudo, foram comparados os dados da seção transversal obtida por meio de levantamento topográfico e a seção transversal obtida do modelo digital de elevação para a mesma localização geográfica. Para ambos os perfis foram estimadas as áreas, que revelaram um erro relativo de -20,33% ocasionado pela diferença entre os 95,94  $m^2$  de área do perfil observada e 115,45  $m^2$  de área do perfil estimado. Esse resultado demonstra que existe certa disparidade entre os panoramas, que podem ter sido resultado da distinta época do levantamento dos dados do modelo digital de elevação e do levantamento topográfico, visto que nessa diferença de tempo um ambiente tão dinâmico quanto um rio pode sofrer inúmeras modificações em seu leito e canal de forma natural.

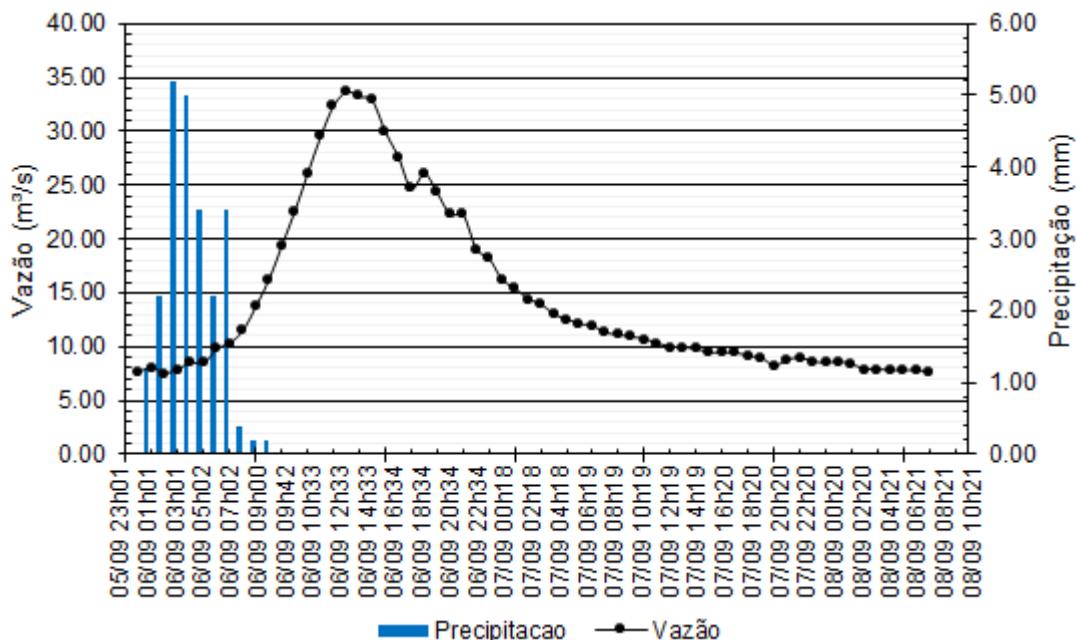


**Figura 34: Comparativo entre perfil transversal observado em levantamento topográfico e perfil transversal estimado por modelo digital de elevação.**

#### 4.4 HIDROGRAMA

Para o cálculo do hidrograma unitário foi escolhida uma chuva unitária obtida através da estação pluviométrica do CEMADEN iniciada em 06 de setembro de 2016 as 00h01min e com término as 09h:00min, com total precipitado acumulado de 23,40 mm.

Para estabelecer sua relação com a vazão, foram selecionados os dados de nível de água do rio correspondentes aos valores entre do nível no instante inicial da precipitação e o nível final, no qual o mesmo se regularizou conforme o nível no início da precipitação. Com conhecimento do nível em todos os instantes do evento de precipitação unitário foi utilizada a equação da curva chave para estimativa de vazão que foi relacionada com a precipitação correspondente para ser estimado o hidrograma unitário a partir da matriz da convolução de hidrograma.



**Figura 35: Hidrograma da área de estudo.**

A convolução da precipitação unitária que compôs o hidrograma foi determinada seguindo o método matricial e foi realizada no software MatLab, onde foi criado um algoritmo (anexo B) capaz de estimar a vetor unitário  $[U]$  (anexo C) o qual, por meio da multiplicação de um diferente evento de precipitação de mesmo tempo de duração pela ordenada correspondente de  $[U]$  irá servir como outro método para estimativa da vazão que um dado evento de precipitação unitária irá originar, a partir da soma das vazões em cada intervalo de tempo. De forma resumida, apenas para sua representação segue o vetor:

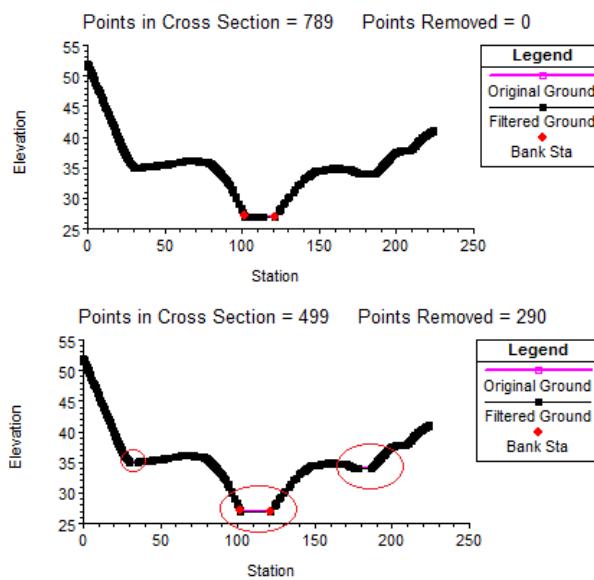
**Tabela 9: Vetor unitário estimado para a precipitação unitária ocorrida entre 05/09 (23h01min) e 06/09 (09h00min).**

$$[U] = \begin{matrix} 1,70 \\ 0,03 \\ 0,25 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ 0,21 \\ 0,05 \\ 1,72 \end{matrix}$$

#### 4.5 MODELAGEM HIDRÁULICA

Para avaliar qual o melhor método de estimativa de escoamento superficial, foram comparados os valores da vazão de pico estimado hidrograma unitário e pelo modelo SCS originada a partir dos dados de estudo para geração do hidrograma unitário com a vazão de pico observada na mesma série. Se verificou que com aplicação do método do hidrograma unitário a vazão de pico foi de  $34,02 \text{ m}^3/\text{s}$ , por outro lado, para mesma série de dados o modelo SCS estimou a vazão de pico em  $24,28 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esses valores, quando comparados com a vazão de pico observada ( $33,72 \text{ m}^3/\text{s}$ ) demonstram que o modelo de estimativa através do hidrograma unitário incorre em um erro relativo de  $-0,9\%$ , o modelo de estimava através do SCS acarreta erro relativo na ordem de  $28,0\%$ , provando que o modelo de estimativa que melhor se ajustou a realidade da área de estudo foi o do hidrograma unitário.

Para realização da simulação hidráulica no software HEC-RAS, foi utilizada a geometria extraída do modelo digital *TIN*, que foi exportada em formato *GIS* e importada no HEC-RAS. Foram atribuídos os coeficientes de atrito de *Manning* de 0,030 no canal e 0,020 nas margens. Considerando que o programa não consegue interpretar seção transversais com mais de 500 pontos, foram filtrados os pontos excedidos das seções na qual esse problema foi verificado.



**Figura 36: Exemplo de filtragem de pontos em seção transversal.**

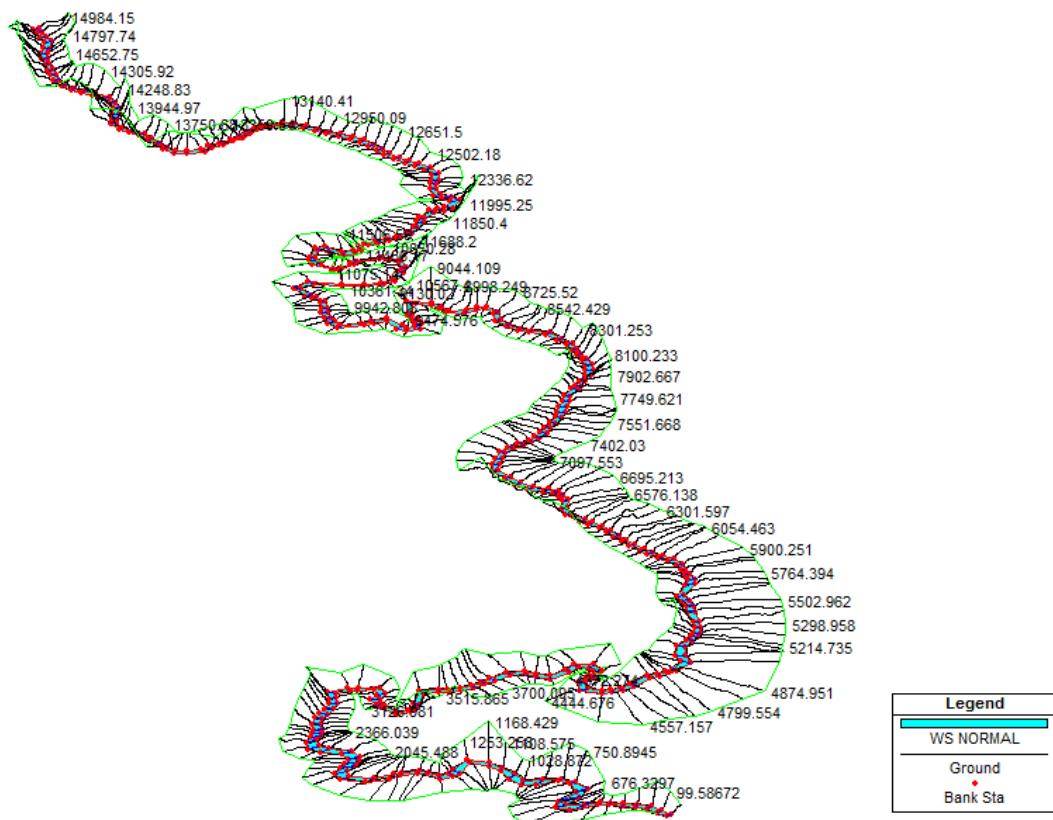
A etapa seguinte consistiu na entrada dos dados de vazão de simulação e condições de contorno, as quais foram necessárias para que o modelo estabelecesse a superfície de água inicial no sistema do rio. As condições foram indicadas na entrada e no final do modelo como sendo de profundidades normais e indicada a declividade do canal. As vazões simuladas foram calculadas a partir do comportamento do evento de precipitação extrema estimado perante o hidrograma unitário e estimadas as vazões de pico, conforme a seguinte tabela. Tendo em vista cada tempo de retorno foram avaliados a os riscos de ocorrências das vazões de pico para os mesmos horizontes de tempo de retorno, demonstrando que a probabilidade (%) de que ocorra cada evento dentro dos horizontes, sendo destacados os eventos com chance de se concretizar maior ou igual a 50%. O comportamento das probabilidades é coerente com o esperado, a partir da análise da tabela 10 percebe-se que quanto menor o tempo de retorno maior é a probabilidade de ocorrência, entretanto, a medida que o tempo de retorno aumenta a chance de ocorrência decresce.

**Tabela 10: Vazões de pico utilizadas para simulação hidráulica e respectivos riscos de ocorrência dentro dos horizontes de tempo.**

$Q_{\text{pico}} (\text{m}^3/\text{s})$	Tr	Risco de ocorrência (%)								
		2	5	10	25	50	75	100	200	
104,94	2	75,0	96,9	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
169,18	5	36,0	67,2	89,3	99,6	100,0	100,0	100,0	100,0	
209,27	10	19,0	41,0	65,1	92,8	99,5	100,0	100,0	100,0	
256,80	25	7,8	18,5	33,5	64,0	87,0	95,3	98,3	100,0	
287,21	50	4,0	9,6	18,3	39,7	63,6	78,0	86,7	98,2	
304,36	75	2,6	6,5	12,6	28,5	48,9	63,5	73,9	93,2	
316,24	100	2,0	4,9	9,6	22,2	39,5	52,9	63,4	86,6	
342,56	200	1,0	2,5	4,9	11,8	22,2	31,3	39,4	63,3	

Com as informações preparadas foram simulados perfis de escoamento permanente cada cenário de cheia. Esse modelo foi escolhido pois o interesse do estudo foi determinar o alcance das áreas inundáveis e não do comportamento de evolução de um evento de extremo. Dessa maneira simulando as vazões de pico sob um regime de escoamento permanente, assumimos que cada uma das vazões ocorresse durante todo o tempo da simulação, não sendo alteradas as características de área dos perfis de inundação para cada cenário.

Tendo ocorrida a simulação hidráulica proposta em cada cenário, os dados foram exportados do formato RAS para GIS, em seguida a partir da extensão HEC-GeoRAS associada ao software ArcGIS os arquivos oriundos da simulação foram importados e convertidos em formato GIS, onde posteriormente foram utilizados para criação das superfícies de água a partir da relação dos dados simulados e o modelo digital de elevação. Em seguida as superfícies de água foram delineadas utilizando o modelo digital de elevação, onde cada célula do *raster* recebeu um valor indicando sua profundidade, formando a planície de inundação total para cada cenário modelado.



**Figura 37: Simulação hidráulica de vazão normal sobreposta ao modelo de geometria.**

Todos os cenários foram modelados e geraram distintos panoramas de inundação completos para cada cenário de diferente vazão de pico (anexo D). Entretanto, apesar de algumas diferenças visíveis, também é possível perceber que certos cenários têm muito em comum com outros. Para avaliar de forma melhor cada cenário, os mesmos foram tiveram o tamanho de suas áreas de inundação comparadas com a área do rio em seu leito normal, resultando

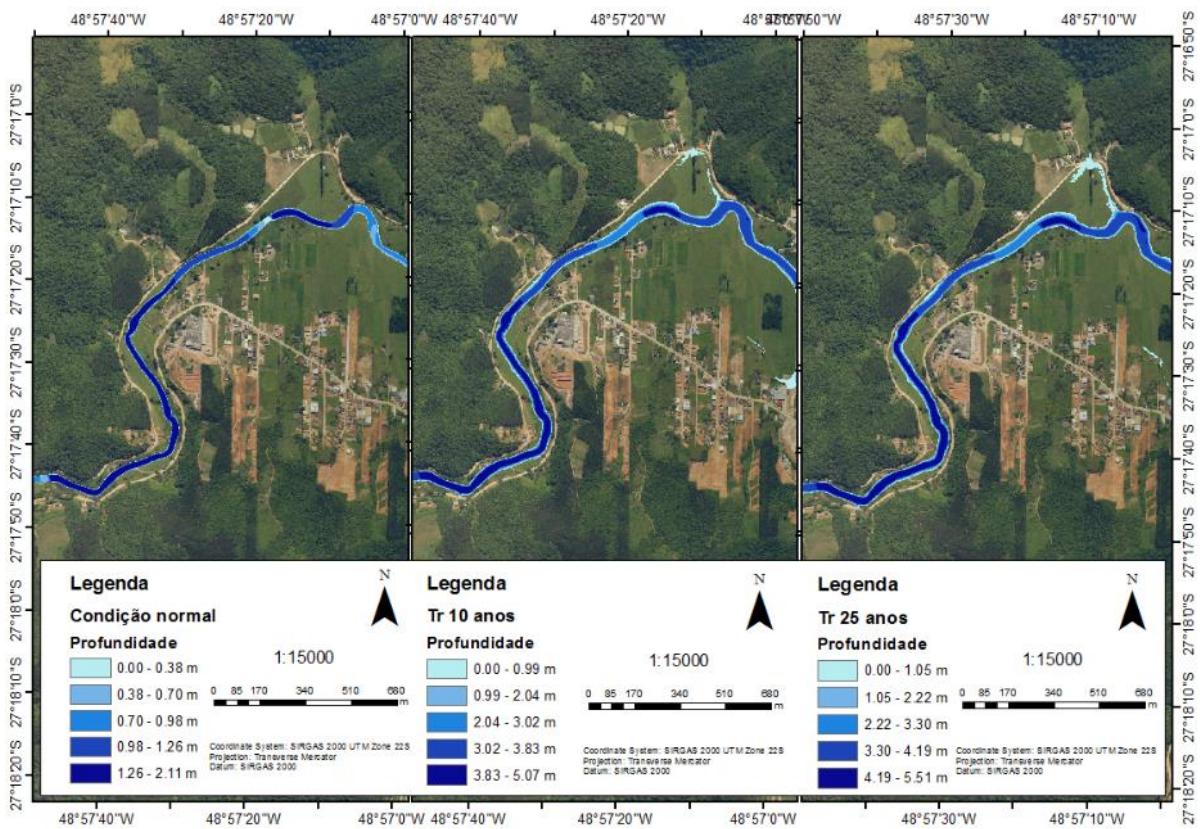
na diferença direta, correspondente ao aumento da área em função da inundação e também a relação do percentual de aumento de área com relação ao nível normal.

**Tabela 11: Áreas e percentuais de inundação para os cenários modelados.**

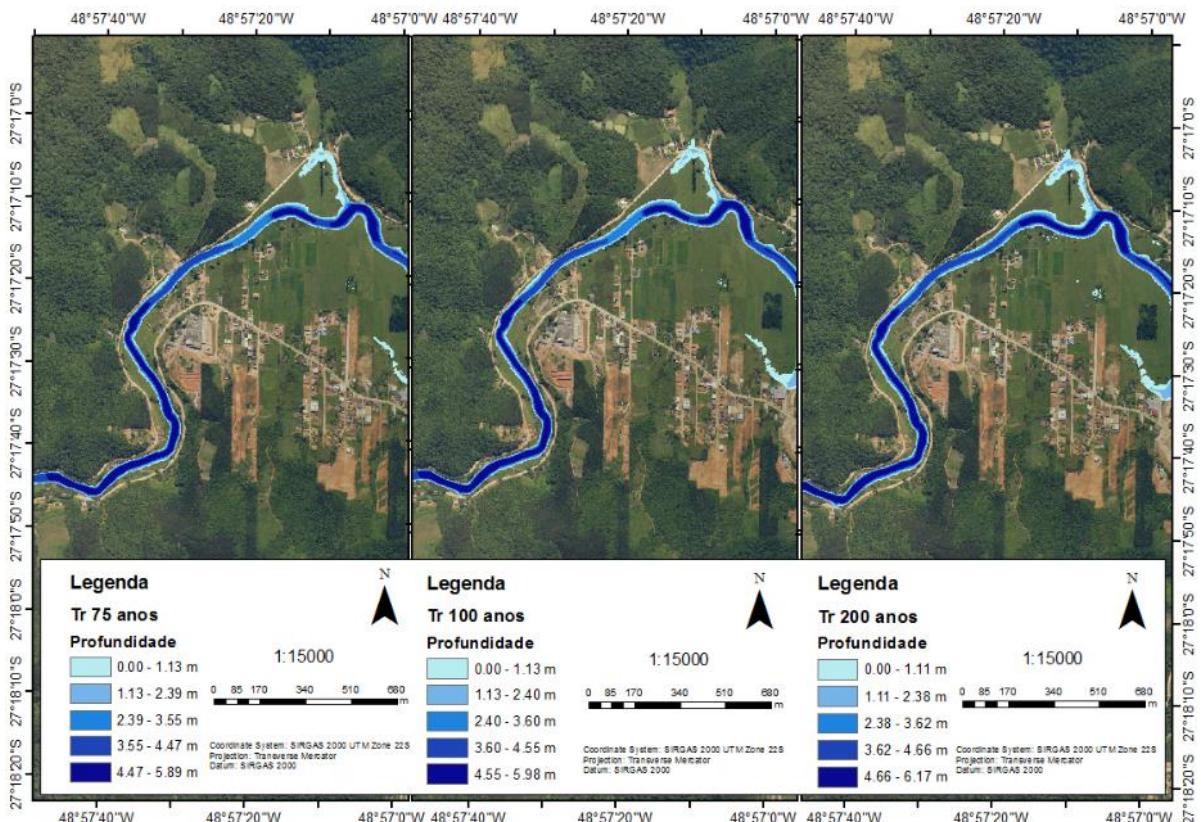
Tempo de retorno (anos)	Área inundada (ha)	Percentual de aumento (%)	Área afetada (ha)
Normal	-	-	-
2	20,16	5,35	1,61
5	29,10	7,72	2,79
10	34,30	9,10	3,76
25	40,51	10,74	4,96
50	44,52	11,81	5,70
75	46,69	12,38	6,12
100	48,30	12,81	6,42
200	52,04	13,80	7,09

Além disso, como mencionado a respeito da sutileza de alterações em determinados cenários, foi aplicado um teste de comparação múltipla de Fisher, sob a utilização com alfa de 0,05, com o intuito de verificar a diferença ou igualdade entre os valores das áreas de inundação, dessa maneira, a submissão ao teste de comparação demonstrou que os cenários com tempo de concentração de 2 e 200 geraram eventos únicos. O mesmo teste demonstrou similaridade do evento com tempo de retorno de 5 anos para com os eventos de 10 e 15 anos. Outra importante característica foi a de similaridade do evento de tempo de retorno de 25 anos com os cenários de tempo de recorrência de 50, 75 e 100 anos. Os eventos de inundações frequentes (Tr 50, 75 e 100) foram classificados como similares entre si e também entre o cenário de 200 anos, o qual não possuiu similaridade com nenhum outro evento simulado.

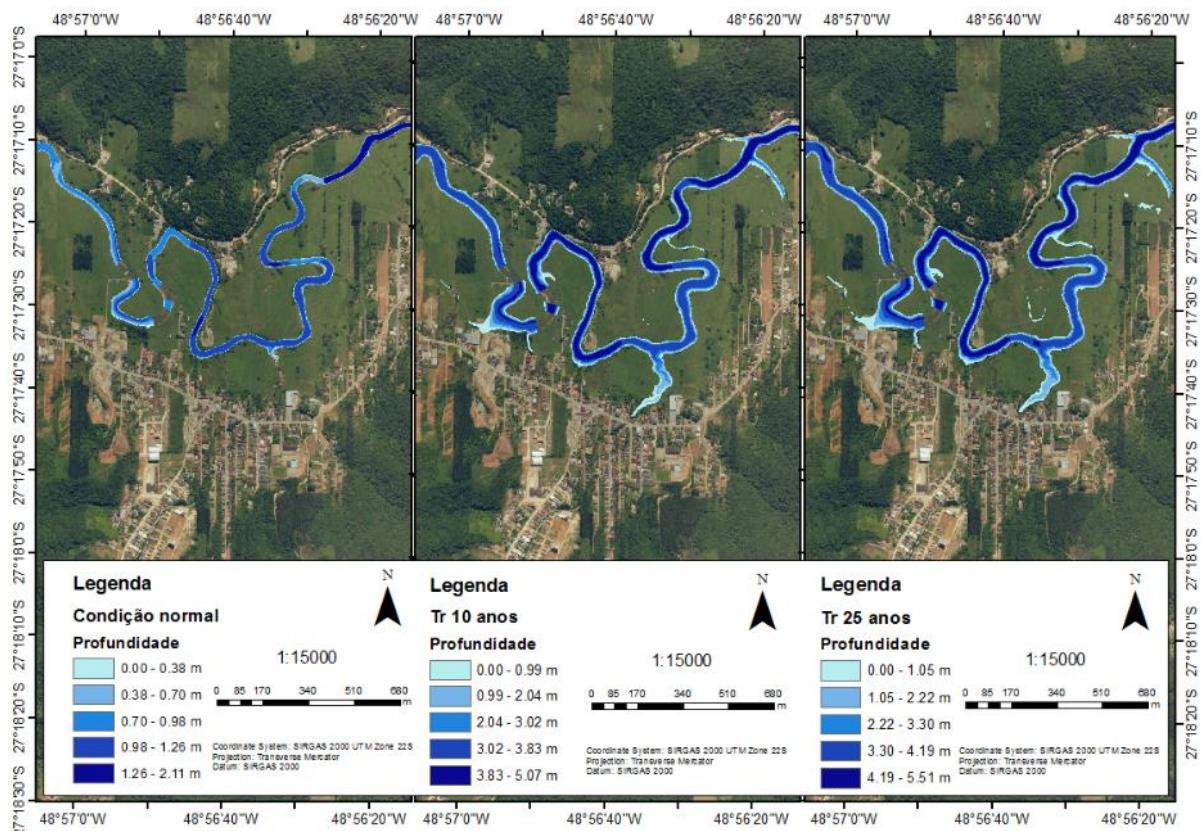
Para demonstração dos cenários de direntes tempos de retorno modelado, foram escolhidos pontos estratégicos onde foi possível observar as maiores diferenças de aumento do nível de água, sendo criado um mosaico que evidencia as diferenças entre cada grupo de cenários modelados em quatro diferentes locais de pontos com maiores ocorrências de avanço de água da calha do rio sobre as margens. Os locais foram determinados a partir da criticidade de inundação observada, sendo posicionados em sequência lógica do sentido de montante para jusante.



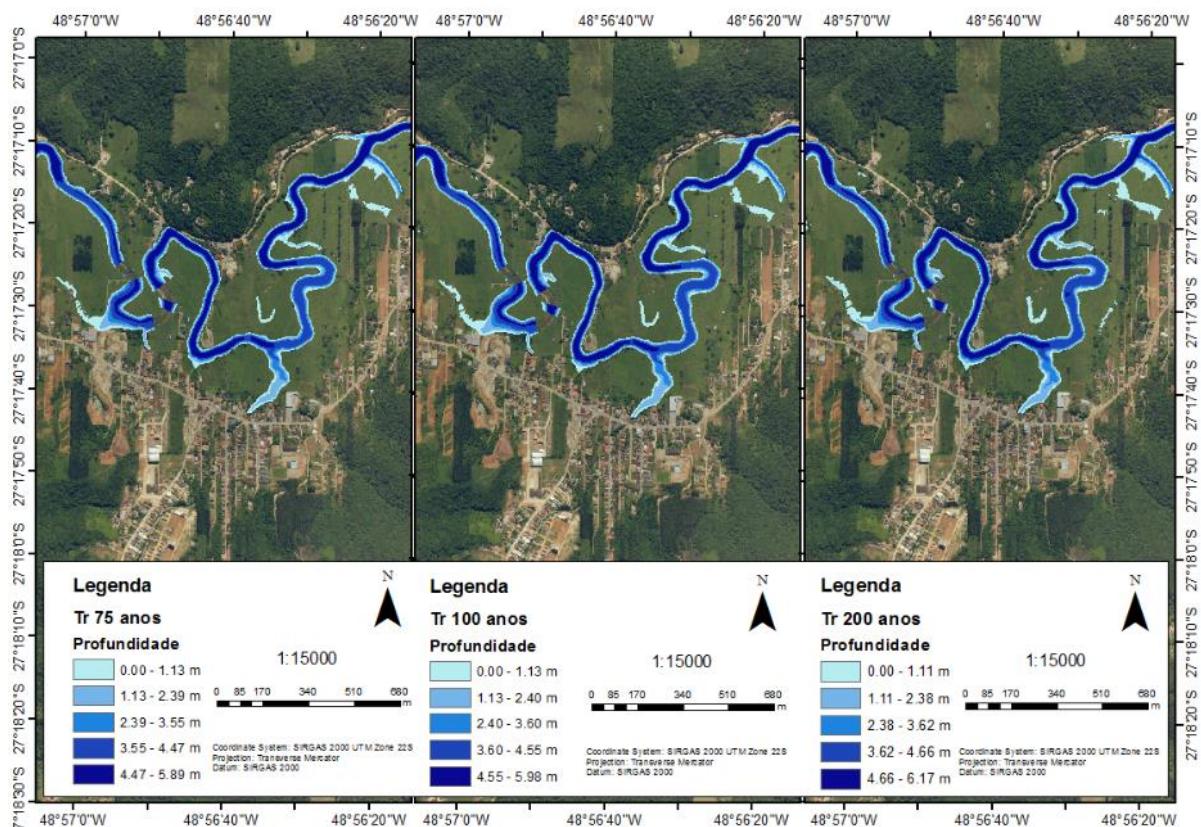
**Figura 38: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de condição normal, Tr de 10 e 25 anos com enfoque no ponto crítico 1.**



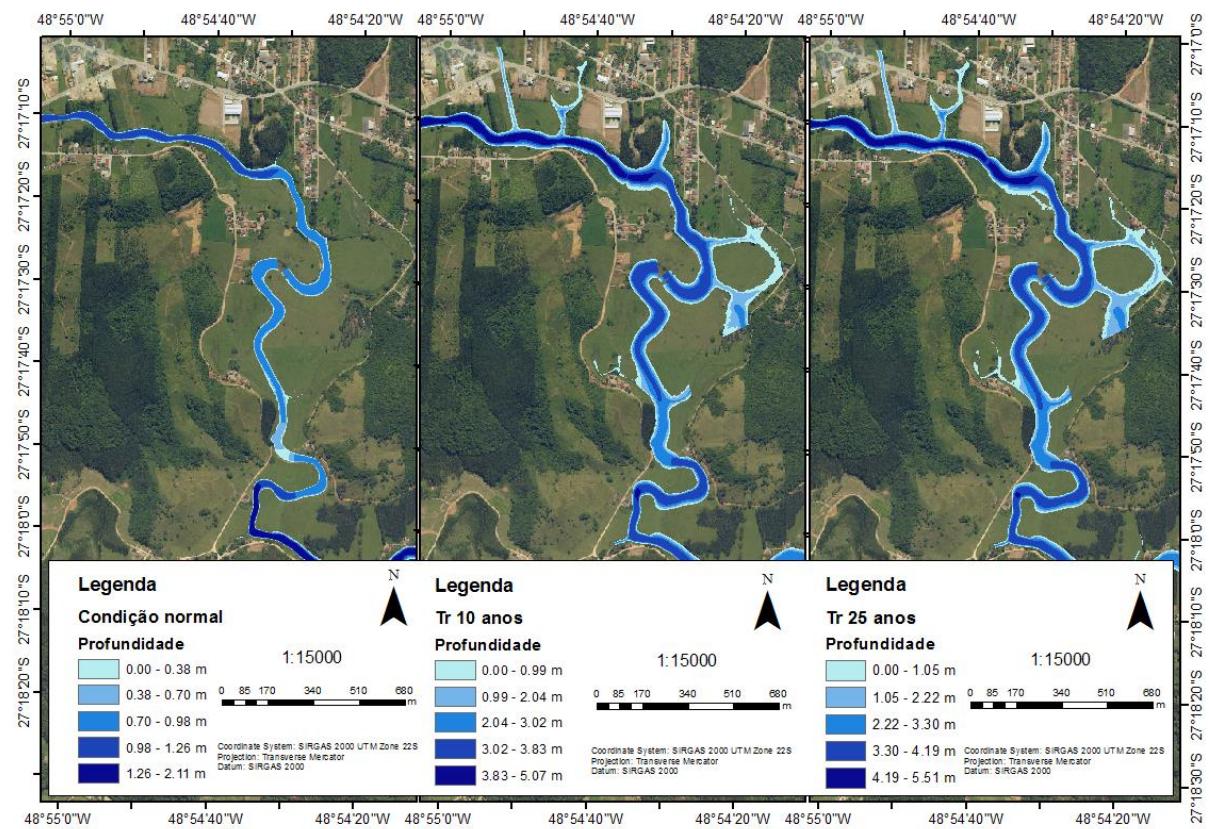
**Figura 39: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de Tr 75, 100 e 200 anos com enfoque no ponto crítico 1.**



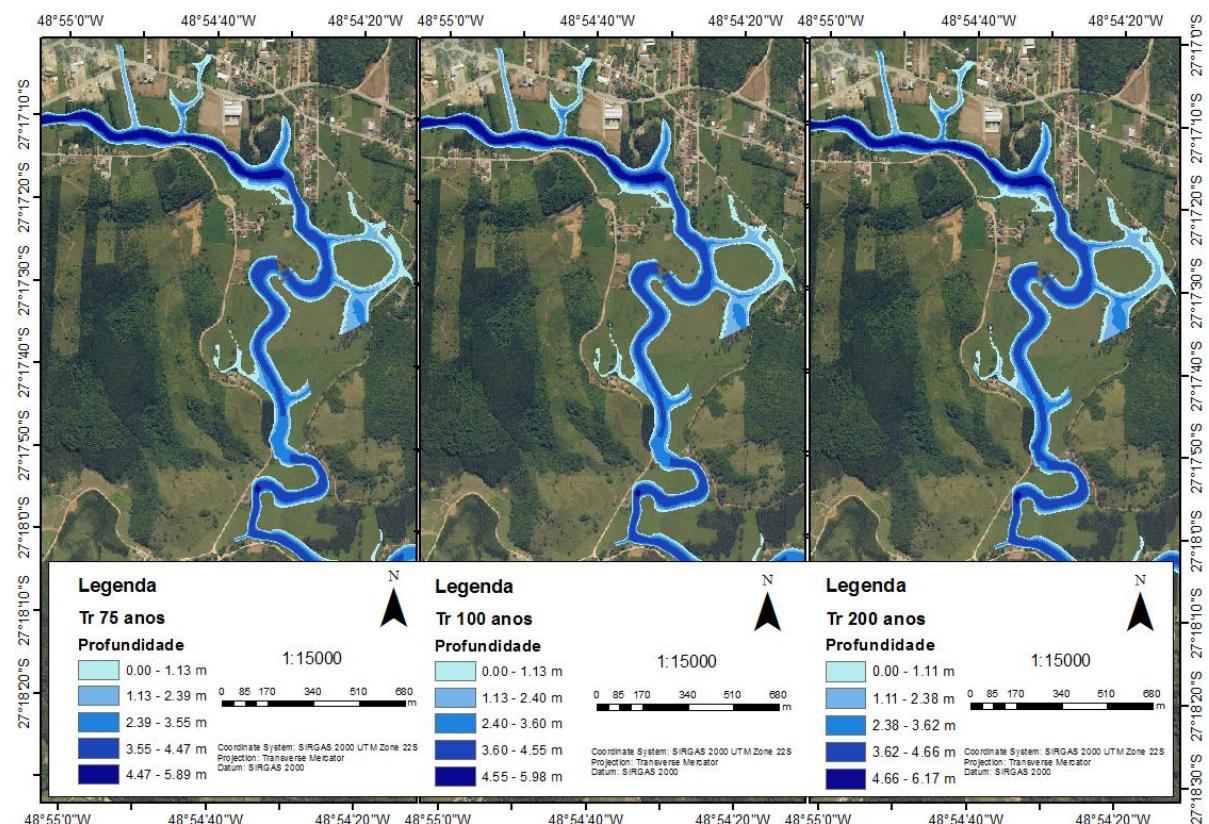
**Figura 40:** Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de condição normal, Tr de 10 e 25 anos com enfoque no ponto crítico 2.



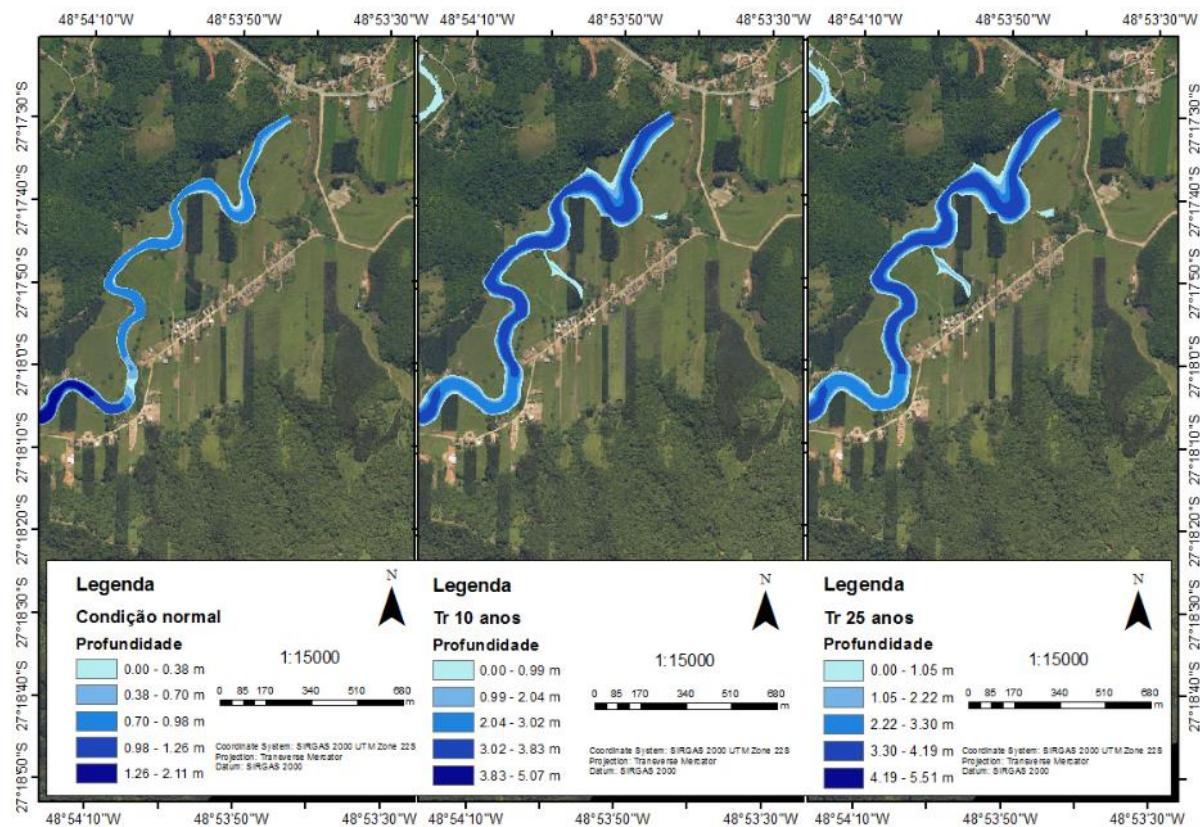
**Figura 41:** Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de Tr 75, 100 e 200 anos com enfoque no ponto crítico 2.



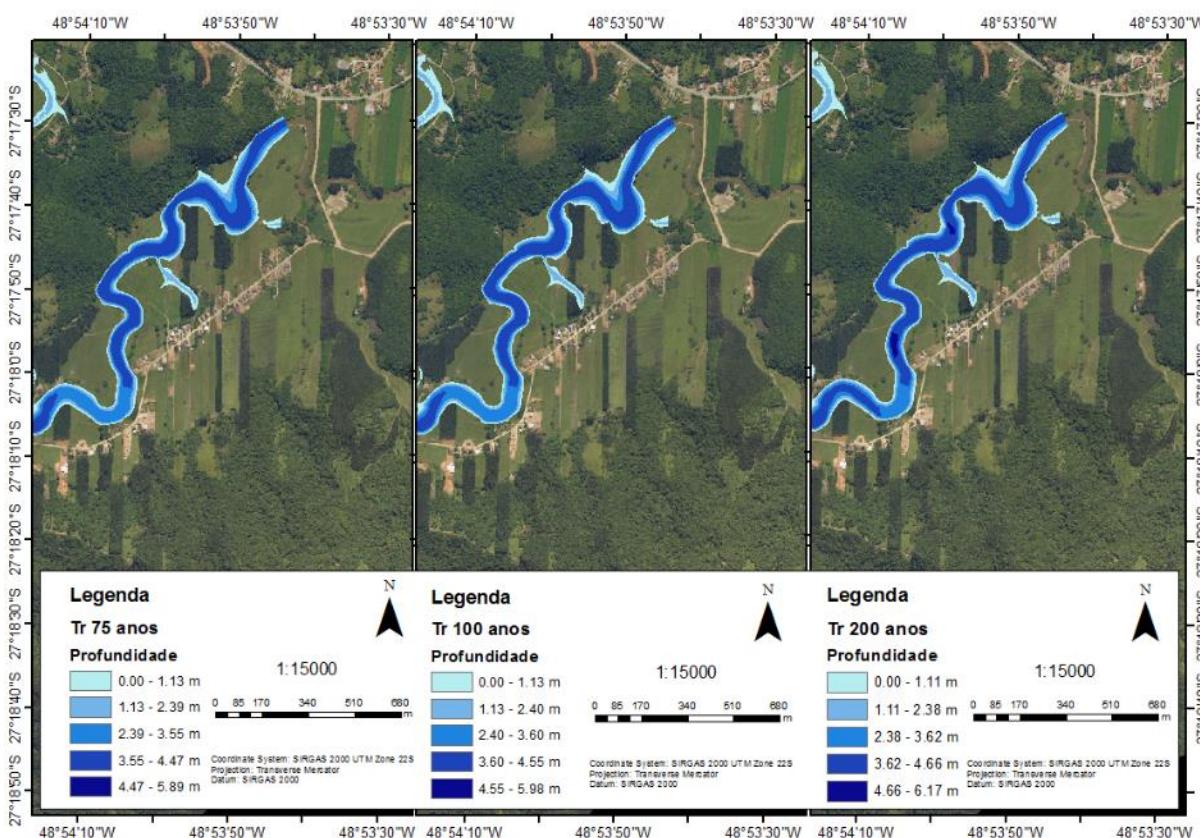
**Figura 42:** Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de condição normal, Tr de 10 e 25 anos com enfoque no ponto crítico 3.



**Figura 43:** Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de Tr 75, 100 e 200 anos com enfoque no ponto crítico 3.



**Figura 44: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de condição normal, Tr de 10 e 25 anos com enfoque no ponto crítico 4.**



**Figura 45: Detalhamento das áreas inundáveis nos cenários de Tr 75, 100 e 200 anos com enfoque no ponto crítico 4.**

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado na sub-bacia do Rio do Braço teve como base fundamental de dados hidrológicos obtidos do CEMADEN e ANA, dados espaciais do modelo digital do terreno, disponibilizados por meio da pela Diretoria de Recursos Hídricos da Secretaria de Desenvolvimento Sustentável do estado de Santa Catarina.

A partir dos dados foi estimada que a área de drenagem da sub-bacia hidrográfica do rio do Braço é de 675,72 km<sup>2</sup>, sendo o perímetro de 197,25 km. Os rios principais o Rio Alto Braço e o Rio do Braço, que possuem respectivamente 91,74 km e 24,1 km. O somatório do comprimento de seus tributários corresponde a 2.126,79 km, consistindo na densidade de drenagem de 3,15 km/km<sup>2</sup>, que pode ser considerada como baixa, podendo estar associada a predomínio de solo permeável.

O coeficiente de compacidade foi avaliado em 2,12, indicando formato não circular e que se pode supor maior distribuição do escoamento superficial em relação ao tempo, retardando o pico de eventos extremos, além disso, por ser uma bacia alongada e estreita dificilmente deve ser atingida integralmente por chuvas intensas. Em complemento, a razão da largura média e o comprimento do curso de água principal ( $Kf$ ) foi estimado em 0,03, demonstrando que esse conjunto de particularidades fisiográficas proporciona uma condição de não suscetibilidade a eventos e enchentes.

Foi estimada que a distância média que a água interceptada em qualquer ponto da sub-bacia hidrográfica do Rio do Braço percorreria até atingir um corpo hídrico seria de 79,43 metros. Considerando o rio principal e os rios tributários do sistema de drenagem da área de estudo, podemos inferir que a área de estudo pode ser classificada como de 8<sup>a</sup> ordem, tendo em vista que quanto maior o grau de ramificação da rede de drenagem de uma bacia, é maior a tendência de eventos com altos picos de cheia.

O CN é um parâmetro que depende de muitas variáveis e por isso a utilização de valores médios pode acarretar grandes erros, entretanto a sua estimativa para uma área como a sub-bacia do Rio do Braço é complexa, pois a classificação de uso do solo deve ser refinada para compreender o maior número possível de diferentes ocupações, entretanto, em função do tamanho da área de estudo a classificação manual se torna inviável, restando apenas a possibilidade de realização por métodos de supervisão, os quais também podem acarretar em falhas. Porém, mesmo considerando o correto emprego no valor de CN, dependendo da formulação utilizada na determinação do tempo de concentração, pode-se ainda acarretar em erros na estimativa de vazão.

A partir da análise de frequência dos eventos máximos anuais ocorridos na área de estudo foram obtidos valores estimados para tempos de retorno de projeto, nos quais foram baseadas as modelagens de precipitação-vazão e simulação hidráulica. Os dados foram validados por meio da diferença entre a série observada e a estimada e o modelo de Log-Pearson III foi confirmado como de melhor estimativa.

Apesar do método SCS ser utilizado com frequência nas estimativas de vazão, neste estudo a melhor estimativa de vazão foi gerada pelo modelo resultante da análise de um hidrograma unitário que incorreu em erro relativo de -0.9 para estimativa da vazão de pico de um evento já observado. Esse método só pode ser aplicado devido a noção das vazões ao longo do evento de precipitação, a qual por sua vez só pode ser estimada por meio da curva chave gerada na seção transversal estabelecida e medida neste trabalho. O molinete empregado nas medições apesar de não possuir calibração por método oficial apresentou consistência nas medições, todavia conclui-se que sua calibração deveria ser por meio de sua movimentação a uma velocidade constante em um canal estático.

Para aprofundar os conhecimentos acerca do comportamento hidrológico da sub-bacia do Rio do Braço seria importante continuar com os trabalhos de medição de vazão, para que esses atingissem uma gama maior de pontos e cobrissem mais eventos de altas vazões.

Alguns parâmetros poderiam ser mais refinados para tentar reproduzir a realidade do sistema de forma mais fidedigna, entretanto, ao mesmo tempo em que determinadas informações possuem grande valor de estudo, quando a mesma é observada no conjunto completo do sistema que se busca reproduzir matematicamente, existem muitos fatores que podem exercer tanta influência como, tornando parâmetros ora irrelevantes. Além disso, a ocorrência de eventos extremos pode modificar toda a morfologia de um sistema e tornar não uteis dados anteriores ao evento. Por isso infere-se que seria interessante que o modelo digital de elevação e a ortofoto de cor natural fossem de um período mais, pois além das mudanças naturais que o sistema rio propõe-se a si mesmo, formações de aterros mecânicos e novas ocupações do solo possivelmente tornam os dados aqui utilizados divergentes da realidade.

As áreas atingidas pelas inundações em cada cenário de tempos de retorno foram; área urbana, áreas de pastagens e solo exposto, sendo que a maioria das áreas inundáveis que atingiram áreas próximas a urbanização não possuem ocupação humana ainda, entretanto como apontado no estudo, o município de Nova Trento possui tendência de crescimento e em poucos anos essas áreas podem vir a ser ocupadas e por isso esse estudo deve auxiliar no uso e ocupação de tais áreas. A vulnerabilidade do sistema provou-se baixa e é uma particularidade indicada pelos estados dos cenários de inundaçāo, que por si só não

chegariam a afetar de forma agressiva o cotidiano dos moradores. Entretanto, fatores como deficiência de drenagem urbana, movimentos de massa poderiam agravar potencialmente uma situação de crise, talvez até impossibilitando ou dificultando a capacidade de socorro e resposta ao evento.

O estudo apresentou muitas informações específicas sobre a sub-bacia que em consórcio com os mapas das zonas de inundação de cada cenário modelado podem ser visualizados e compreendidos pelos tanto por técnicos da Defesa Civil, secretarias de planejamento, obras e meio ambiente, autônomos que possam vir a desenvolver projetos na área e por pessoas leigas, que de forma fácil podem observar os mapas e interpretar o esquema de cores de maneira intuitiva. Apresenta potencial para servir como diretriz de ocupação ordenada na área urbana do município de Nova Trento, para identificação de áreas que oferecem maiores ou menores riscos a população, gerar conscientização acerca das possíveis consequências da ocupação de áreas sem o conhecimento prévio e consultas necessárias e gerar medidas de prevenção e alerta para o risco de eventos hidrológicos extremos para os moradores da área urbana de Nova Trento.

## 6 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Dados hidrológicos**. HidroWeb. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, 2015.
- BORSATO, H. F. **Caracterização física das bacias de drenagem do município de Maringá e os postos de combustíveis como potencial poluidores**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Maringá, 2005.
- CAMPOS, R. G. D. **Curso básico de HEC-RAS**. Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2011.
- CEMADEN. **Dados hidrológicos**. Mapa interativo. Sistema Nacional de Municípios Monitorados, 2016.
- CHOW, V. T.; et al. **Hidrología aplicada**. McGraw Hill Interamericana. Santafé de Bogotá, Colombia, 1994.
- CHOW, V. T. **Hidráulica de canales abiertos**. McGraw Hill Interamericana. Santafé de Bogotá, Colombia, 1994.
- COLLISCHON, W.; Tassi R. **Introduzindo hidrologia**. Instituto de pesquisas hidráulicas. Porto Alegre, 2008.
- EPRAGRI. **Relatório técnico do mapeamento temático geral do estado de SC**. São José dos Campos: SP, 2008.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Serviço nacional de levantamento e conservação de solos. Súmula da 10. Reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro, 1979
- EPAGRI/CIRAM. **Mudanças climáticas e seus efeitos sobre o regime hídrico, eventos hidrológicos extremos e qualidade das águas no sul do Brasil**. Florianópolis, 2014.
- FREITAS, M; et al. **Gestão de risco de desastres**. Secretaria do Estado da Defesa Civil. Florianópolis, 2015.
- GEOLOGIA GEOTECNIA ENGENHARIA SONDAGEM LTDA (GGES). **Cálculo da estabilidade dos taludes localizados às margens dos rios Tijucas e Alto Braço**. Balneário Camboriú (SC), 2014.

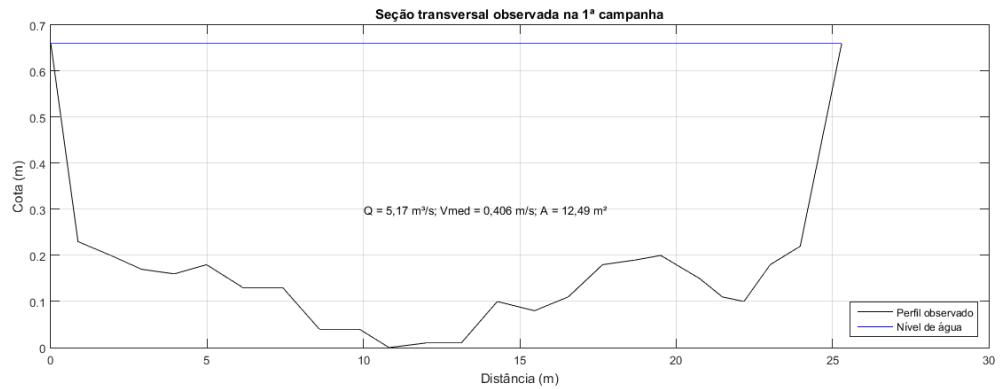
- HEC-RAS. **River Analysis System. User's manual.** Davis, USA: US Army Corps of Engineers, 2010.
- HEC-GeoRAS. **GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGis.** Davis, USA: US Army Corps of Engineers, 2011.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE cidades.** Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtas/home.php>>. Acesso em: 26 ago. 2015.
- LEOPARDI, M. **Costruzioni idrauliche ed idrologia. Parte quinta: rischio idraulico e difesa dalle inondazioni.** Universita dell'Aquila, Aquila. Itália, 2015.
- LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas.** 2. ed. Piracicaba: USP, 2008.
- MUÑOZ-ESPINOSA, H. R. **Enchentes e inundações: o fenômeno hidrológico, as respostas do homem.** Florianópolis: ELETROSUL – DEH/DIVH, 1984.
- NETTO, A.; MARTINIANO de, J. **Manual de hidráulica.** 8<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.
- PRECISO E. **Sviluppo di un modello idraulico monodimensionale applicato al fiume monticano a fontanelle.** Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio. Veneto, Itália. jul 2010.
- SILVEIRA, L. L A. **Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, Rs, v. 10, n. 1, p.5-23, 03 mar. 2015. jan/mar 2005.
- TOMAZ, P. **Curso de manejo de águas pluviais, capítulo 38: método do SCS.** São Paulo. dez. 2013.
- TUCCI, M. E. C. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.
- UBERTI, A. A. A. **Santa Catarina: proposta de divisão territorial em regiões edafoambientais homogêneas.** Florianópolis, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina.
- VENTURA, G. M. R. **Caracterização ambiental e hidrológica da bacia do Córrego Barbado em Cuiabá – MT.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Mato Grosso, 2011.

---

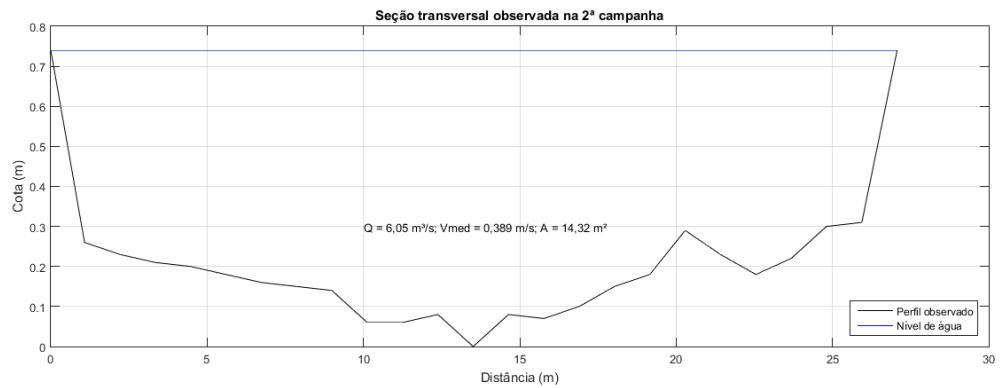
## **ANEXOS**

---

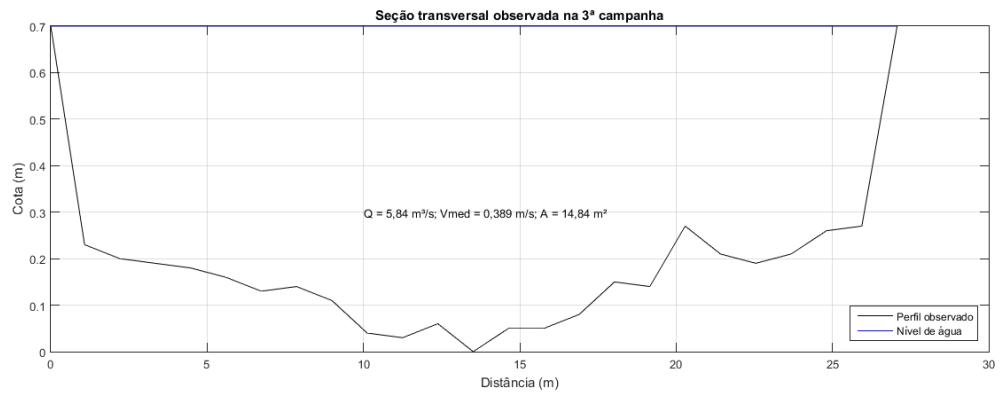
## ANEXO A



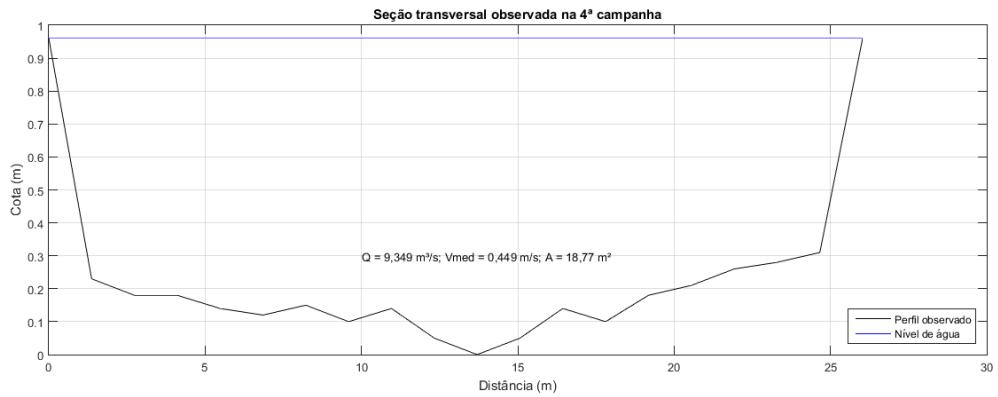
**Figura A 1: Croqui da seção transversal obtida na 1<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



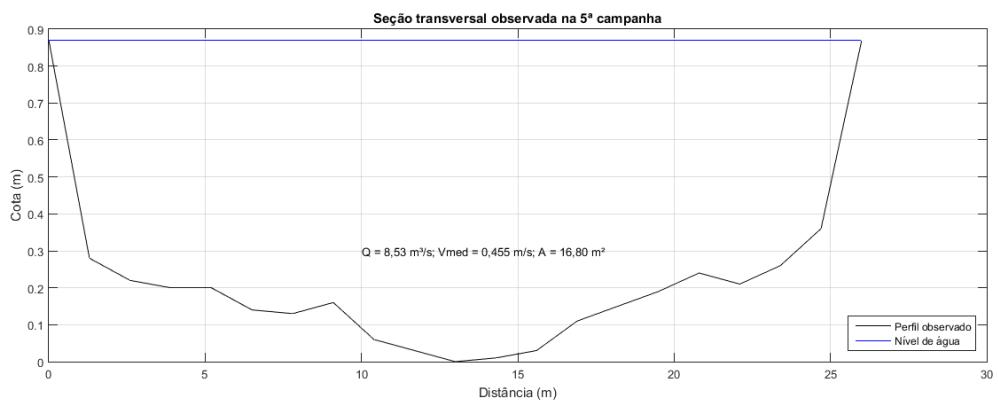
**Figura A 2: Croqui da seção transversal obtida na 2<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



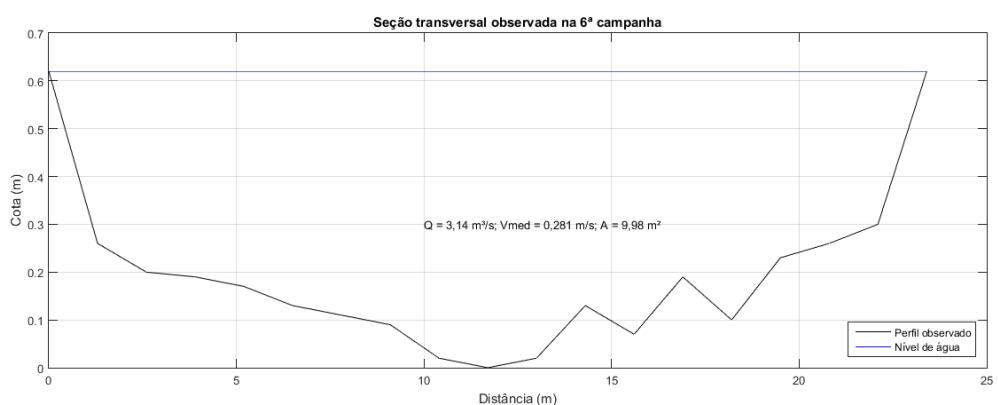
**Figura A 3: Croqui da seção transversal obtida na 3<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



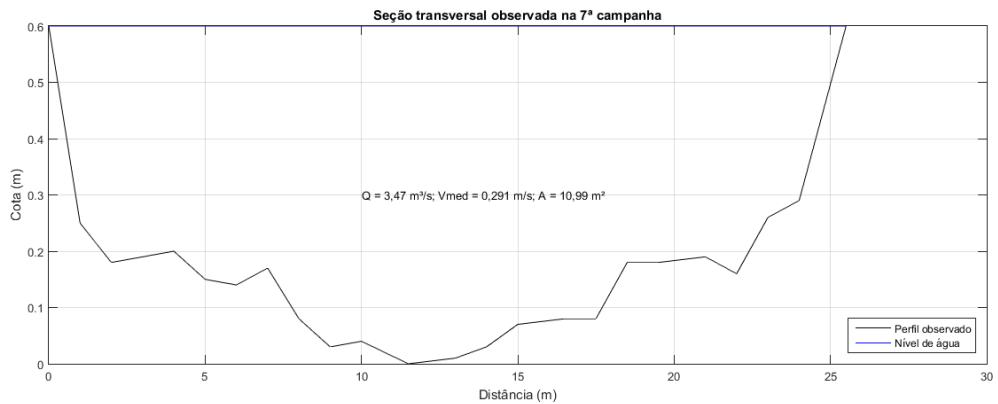
**Figura A 4: Croqui da seção transversal obtida na 4ª campanha e dados resumidos.**



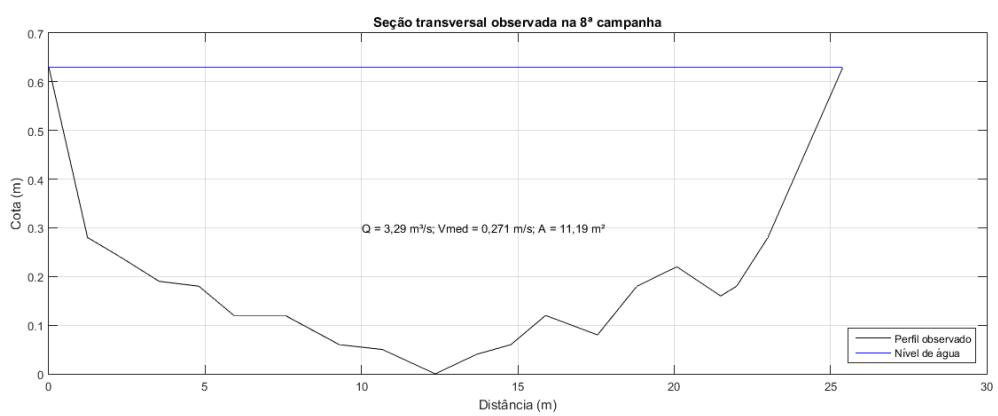
**Figura A 5: Croqui da seção transversal obtida na 5ª campanha e dados resumidos.**



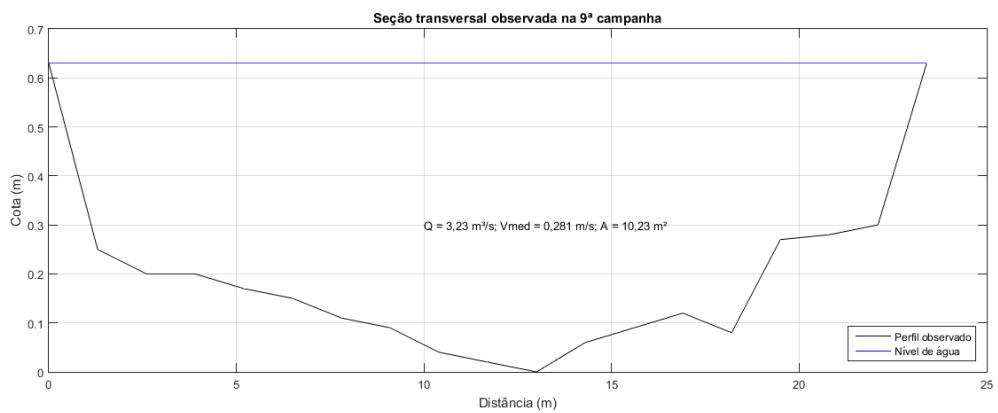
**Figura A 6: Croqui da seção transversal obtida na 6ª campanha e dados resumidos.**



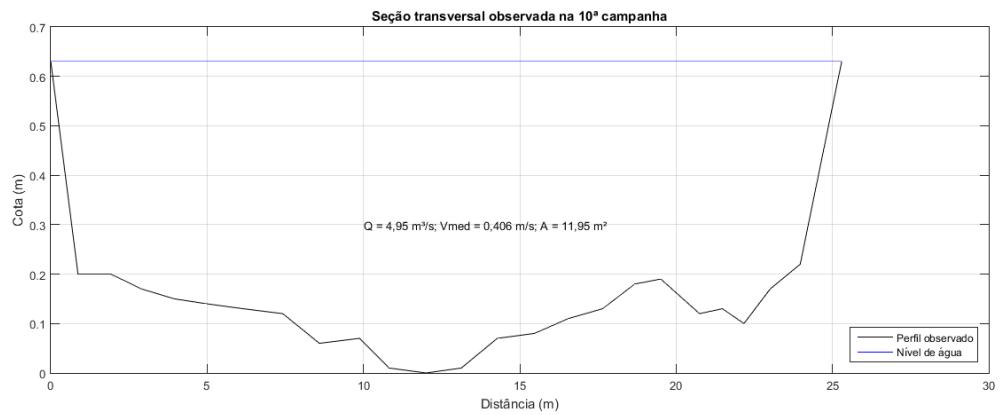
**Figura A 7: Croqui da seção transversal obtida na 7<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



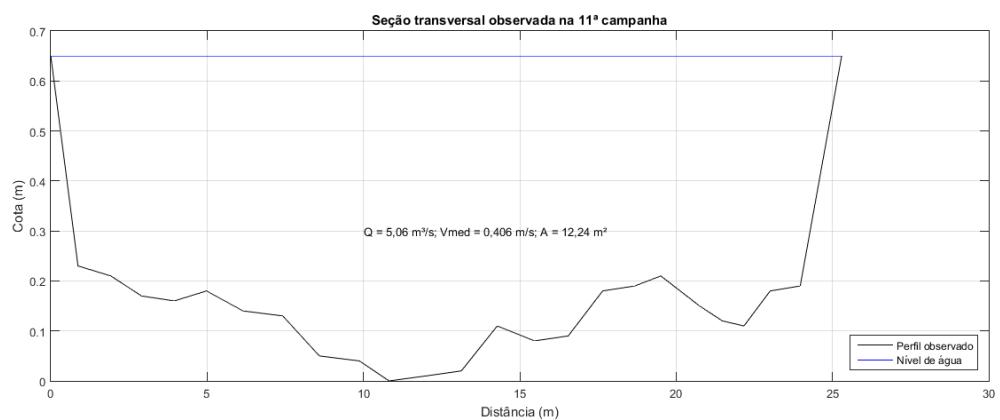
**Figura A 8: Croqui da seção transversal obtida na 8<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



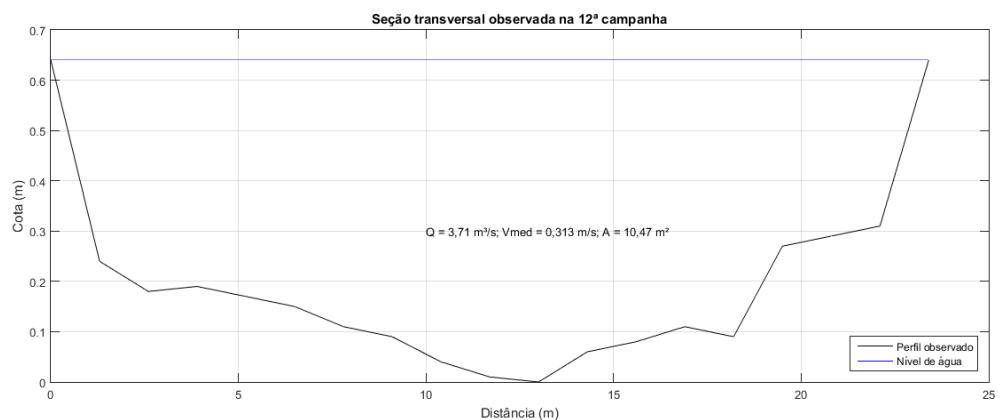
**Figura A 9: Croqui da seção transversal obtida na 9<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



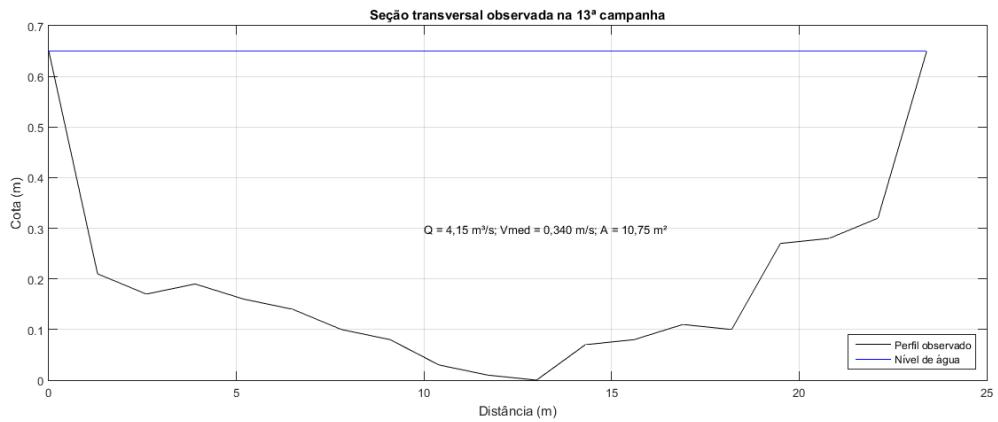
**Figura A 10: Croqui da seção transversal obtida na 10<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



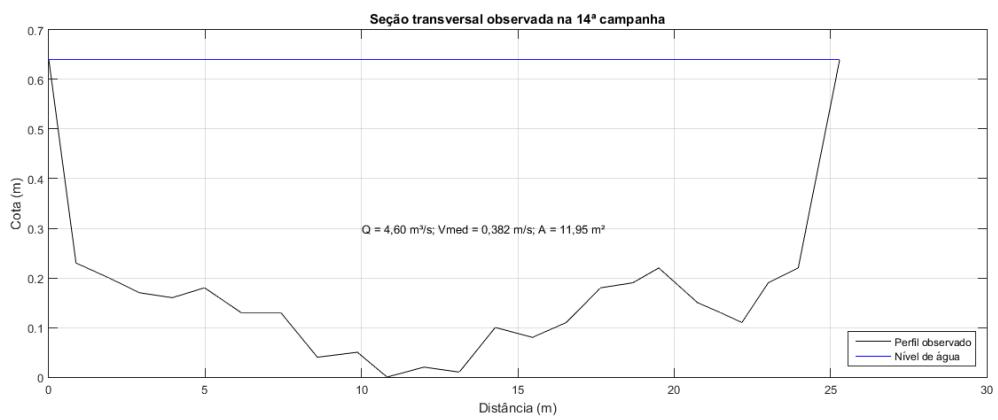
**Figura A 11: Croqui da seção transversal obtida na 11<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



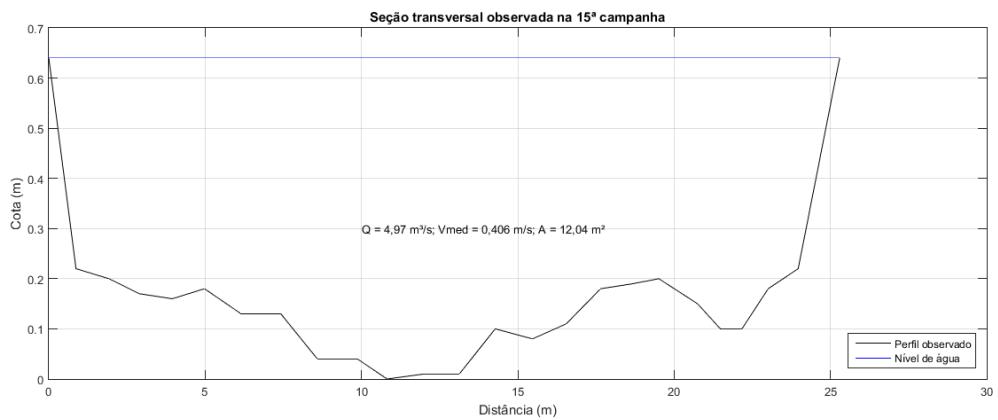
**Figura A 12: Croqui da seção transversal obtida na 12<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



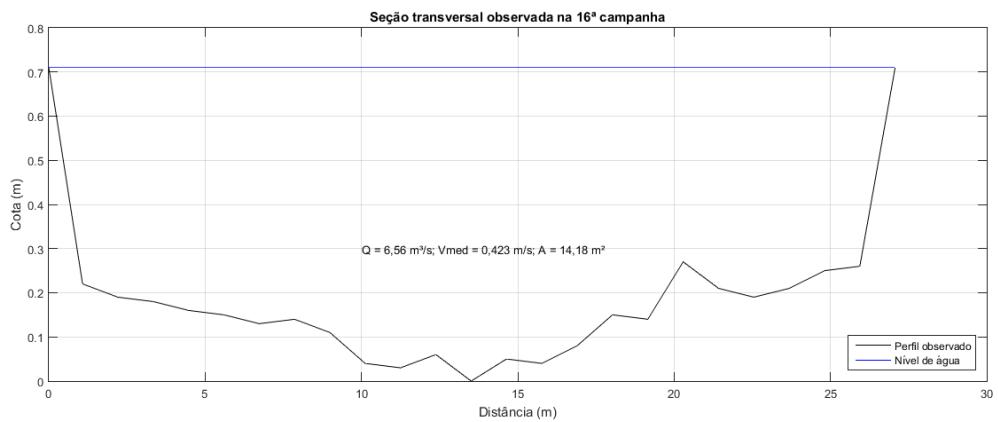
**Figura A 13: Croqui da seção transversal obtida na 13<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



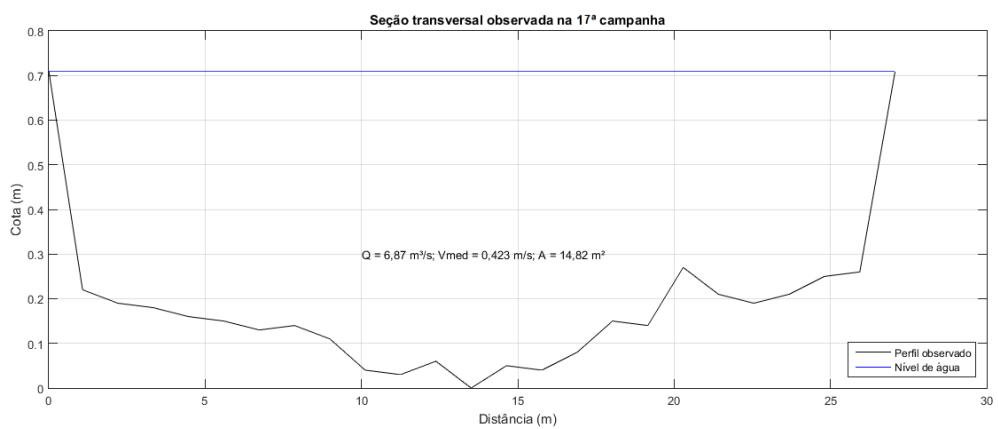
**Figura A 14: Croqui da seção transversal obtida na 14<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



**Figura A 15: Croqui da seção transversal obtida na 15<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



**Figura A 16: Croqui da seção transversal obtida na 16<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**



**Figura A 17: Croqui da seção transversal obtida na 17<sup>a</sup> campanha e dados resumidos.**

---

## ANEXO B

```
clc
clear all

[t, P, Q] = textread('dados.txt','%f %f %f');
% [Pest] = textread('prel.txt','%f'); % comparação de estimativa de vazão a
partir de U

punt = P (1:10); % seleciona os 10 primeiros dados, que são a precipitação
unitária

li = length(Q);
co = 53;

pma = zeros(li,co); % matriz de precipitação unitária

tin = 1:length(punt); % tamanho do vetor precipitação

for j =1:co;
    pma(tin,j)=punt;
    tin=tin+1;
end

pmat = pma';
p1 = pma*pmat;
p2 = pinv(p1);
p3 = pmat*p2;
U = (p3*Q);

% estimativas de vazão
li2=length(Q);
co2=length(U);

[P2] = textread('pestimada.txt', '%f');

prec = P2(1:10);

pmest = zeros(li2,co2);
tin=1:length(prec); % tamanho do vetor precipitação prel

for j =1:co2;
    pmest(tin,j) = prec;
    tin=tin+1;
end

Qest=pmest*U;
```

---

## ANEXO C

[U] =	<u>1,70</u>
	<u>0,03</u>
	<u>0,25</u>
	<u>0,13</u>
	<u>0,27</u>
	<u>0,87</u>
	<u>0,40</u>
	<u>0,94</u>
	<u>0,58</u>
	<u>1,12</u>
	<u>1,12</u>
	<u>1,26</u>
	<u>1,78</u>
	<u>1,34</u>
	<u>1,87</u>
	<u>0,99</u>
	<u>1,68</u>
	<u>1,09</u>
	<u>0,54</u>
	<u>1,24</u>
	<u>0,97</u>
	<u>1,18</u>
	<u>0,97</u>
	<u>0,80</u>
	<u>0,58</u>
	<u>0,69</u>
	<u>0,50</u>
	<u>0,72</u>
	<u>0,56</u>
	<u>0,59</u>
	<u>0,51</u>
	<u>0,39</u>
	<u>0,59</u>
	<u>0,45</u>
	<u>0,47</u>
	<u>0,53</u>
	<u>0,32</u>
	<u>0,61</u>
	<u>0,25</u>
	<u>0,42</u>
	<u>0,59</u>
	<u>0,21</u>
	<u>0,67</u>
	<u>0,07</u>
	<u>0,40</u>
	<u>0,59</u>
	<u>0,15</u>
	<u>0,79</u>
	<u>0,08</u>
	<u>0,25</u>
	<u>0,21</u>
	<u>0,05</u>
	<u>1,72</u>

## ANEXO D

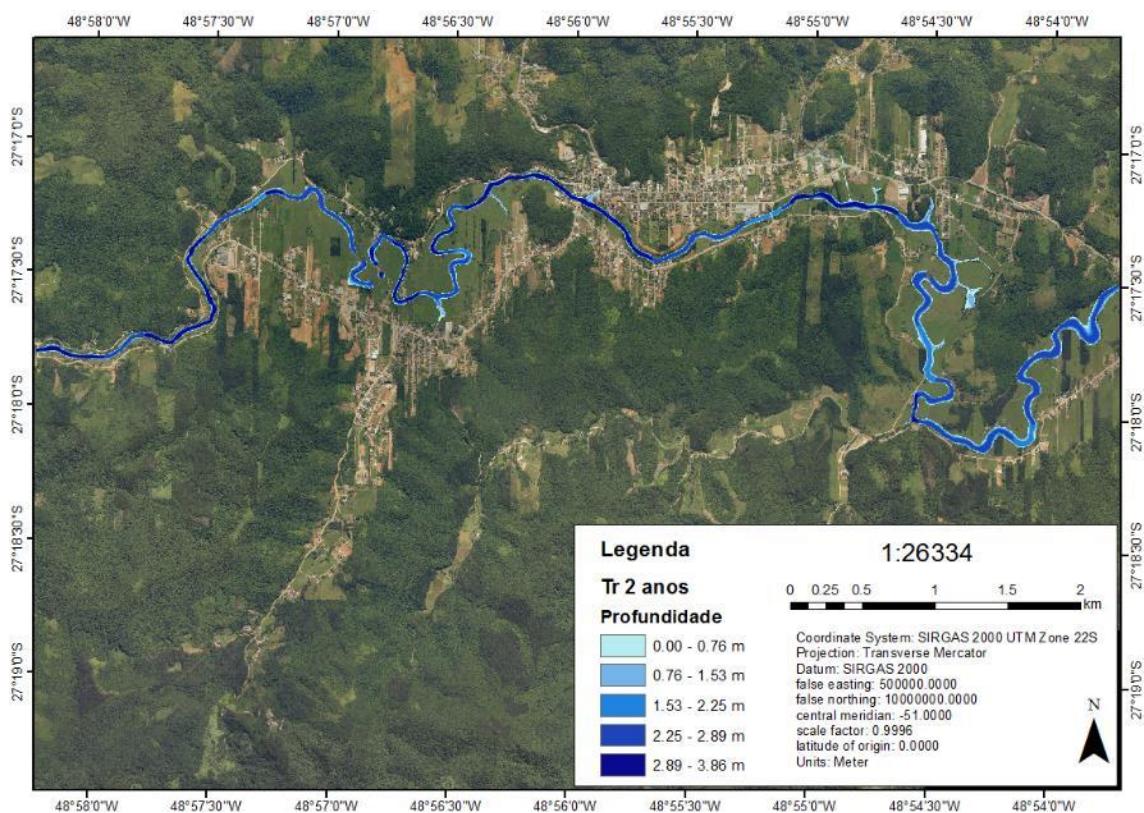


Figura D 1: Panorama completo do cenário de modelagem de inundação com tempo de retorno de 2 anos.

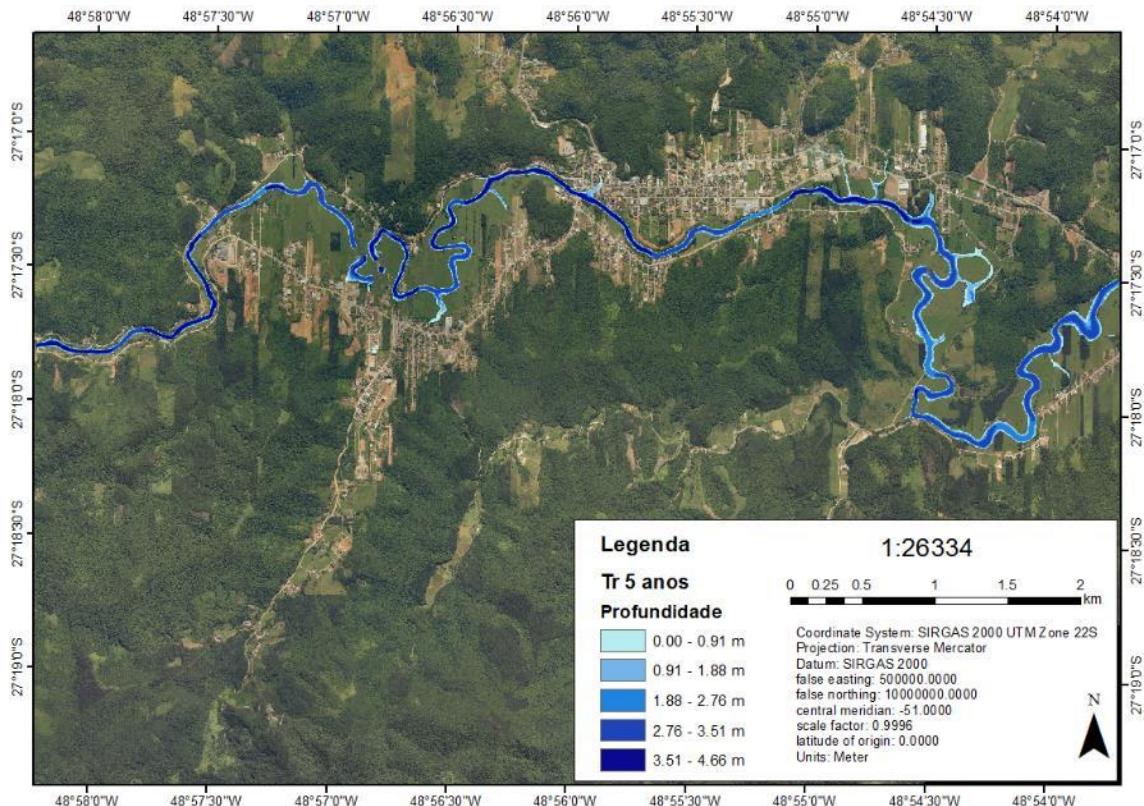


Figura D 2: Panorama completo do cenário de modelagem de inundação com tempo de retorno de 5 anos.

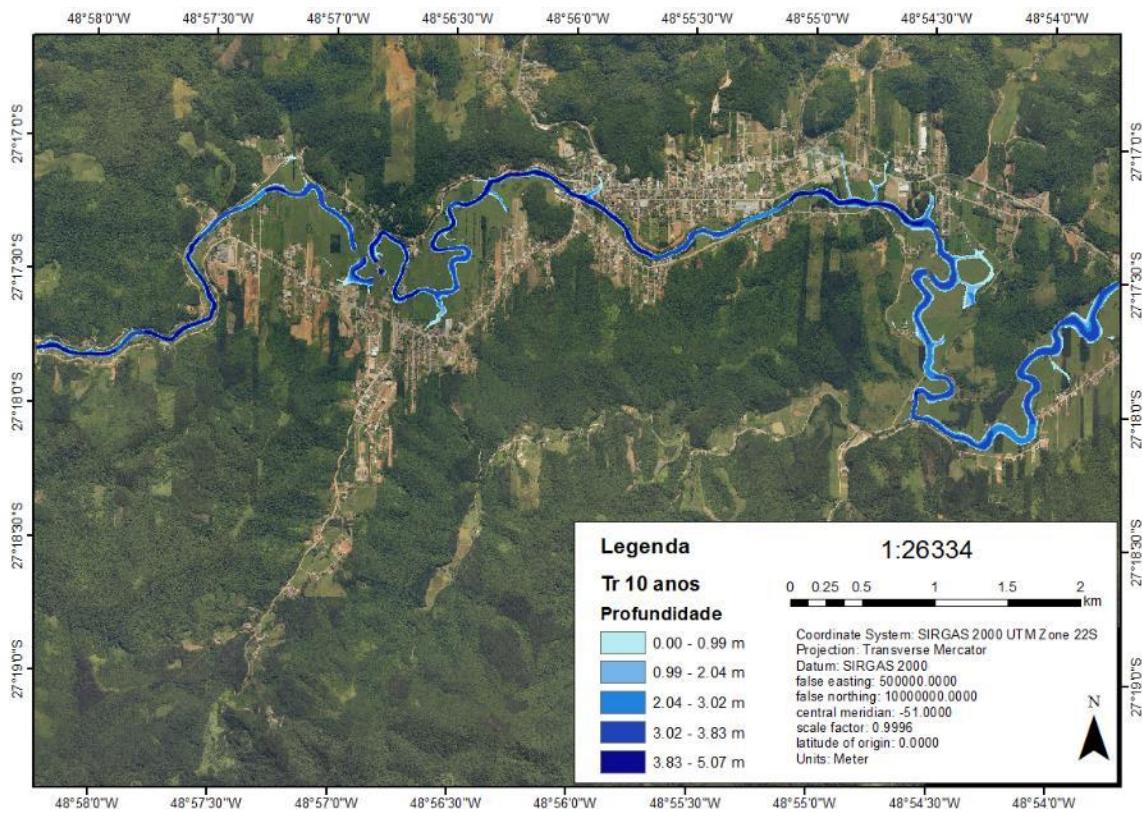


Figura D 3: Panorama completo do cenário de modelagem de inundaçāo com tempo de retorno de 10 anos.

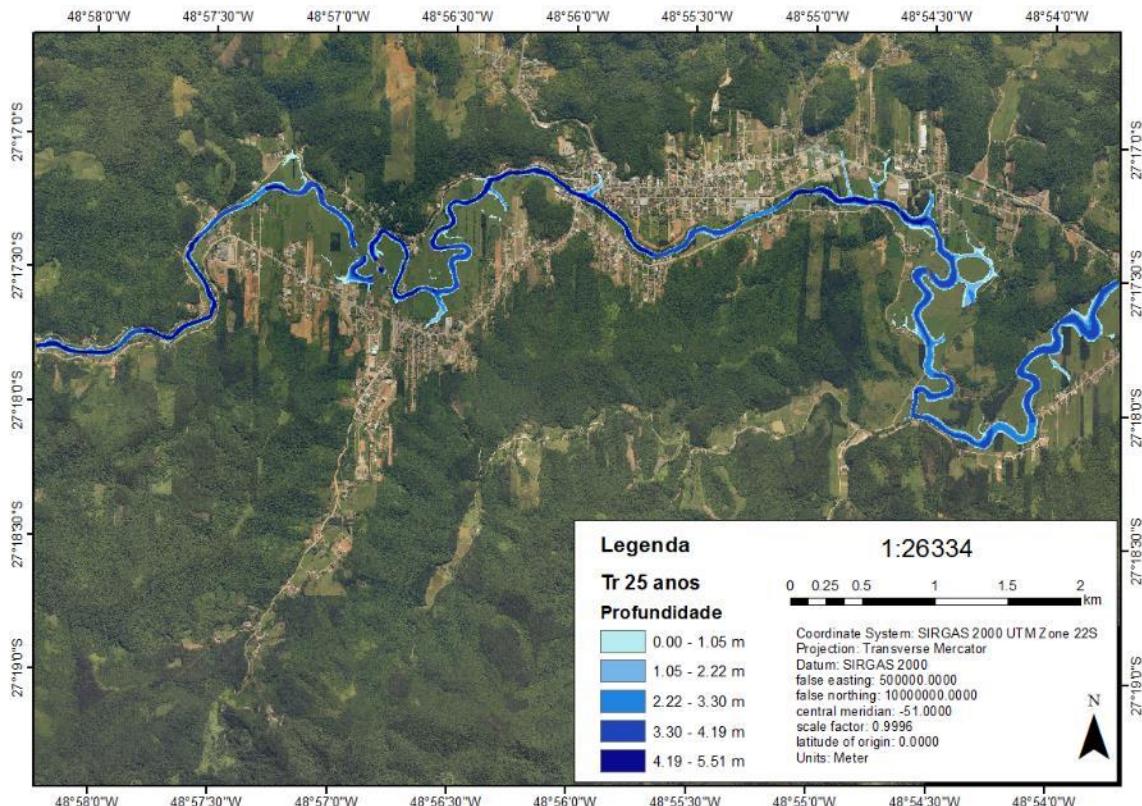
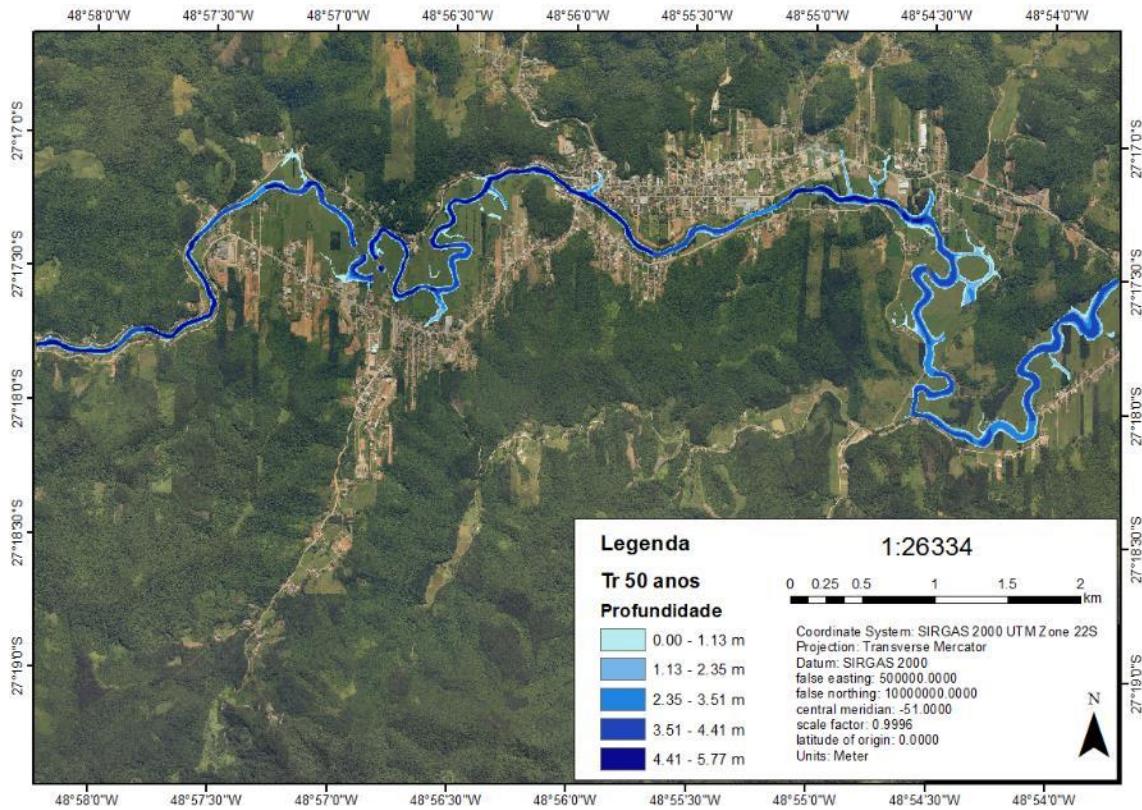
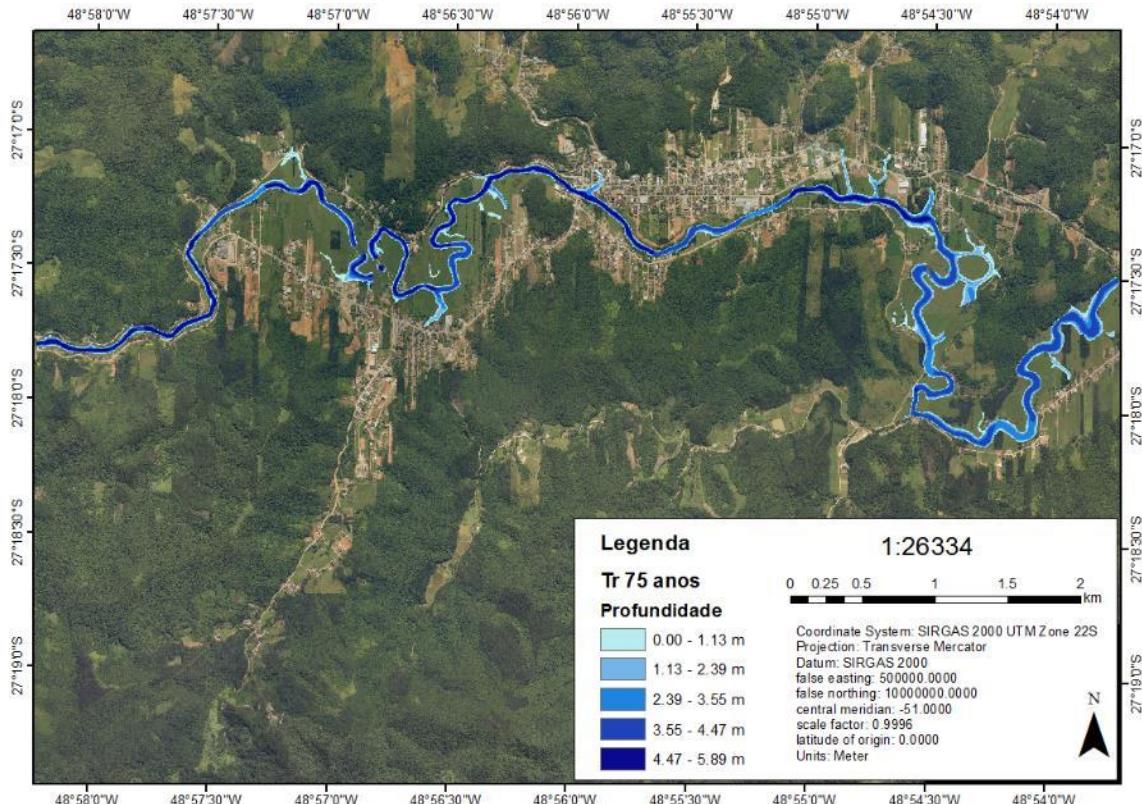


Figura D 4: Panorama completo do cenário de modelagem de inundaçāo com tempo de retorno de 25 anos.



**Figura D 5: Panorama completo do cenário de modelagem de inundação com tempo de retorno de 50 anos.**



**Figura D 6: Panorama completo do cenário de modelagem de inundação com tempo de retorno de 75 anos.**

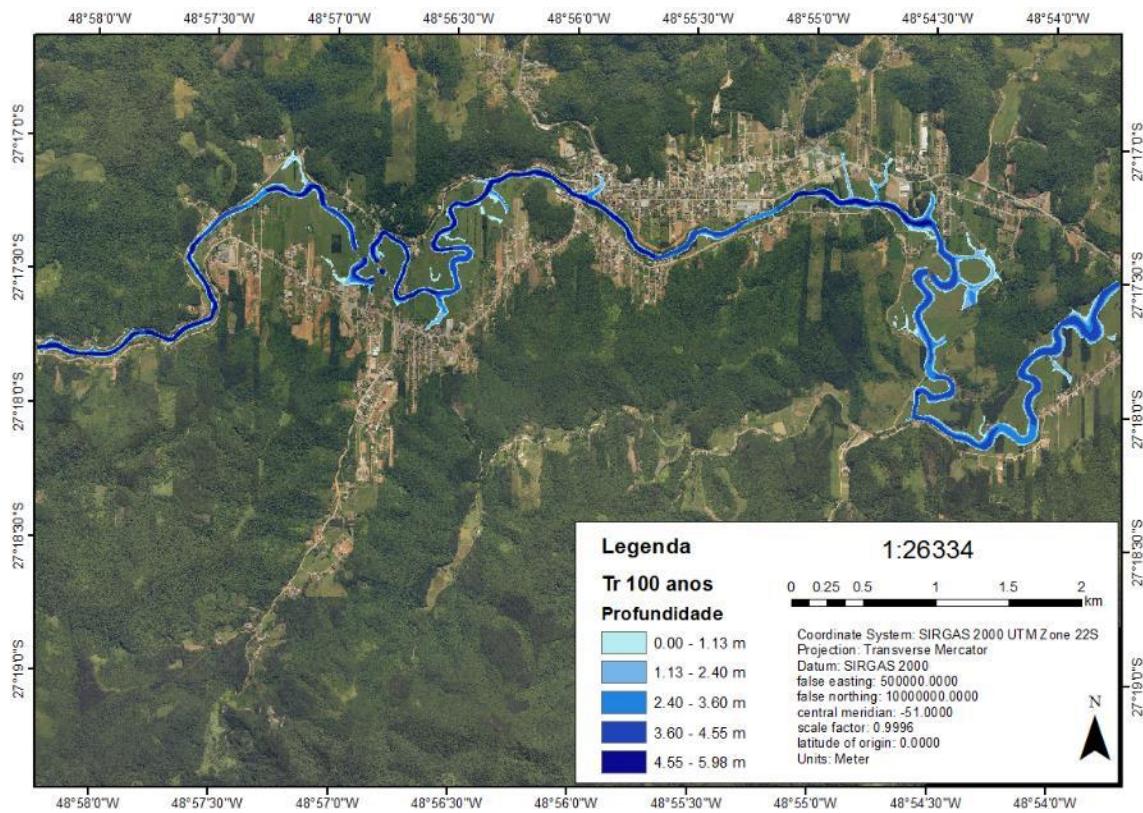


Figura D 7: Panorama completo do cenário de modelagem de inundaçāo com tempo de retorno de 100 anos.

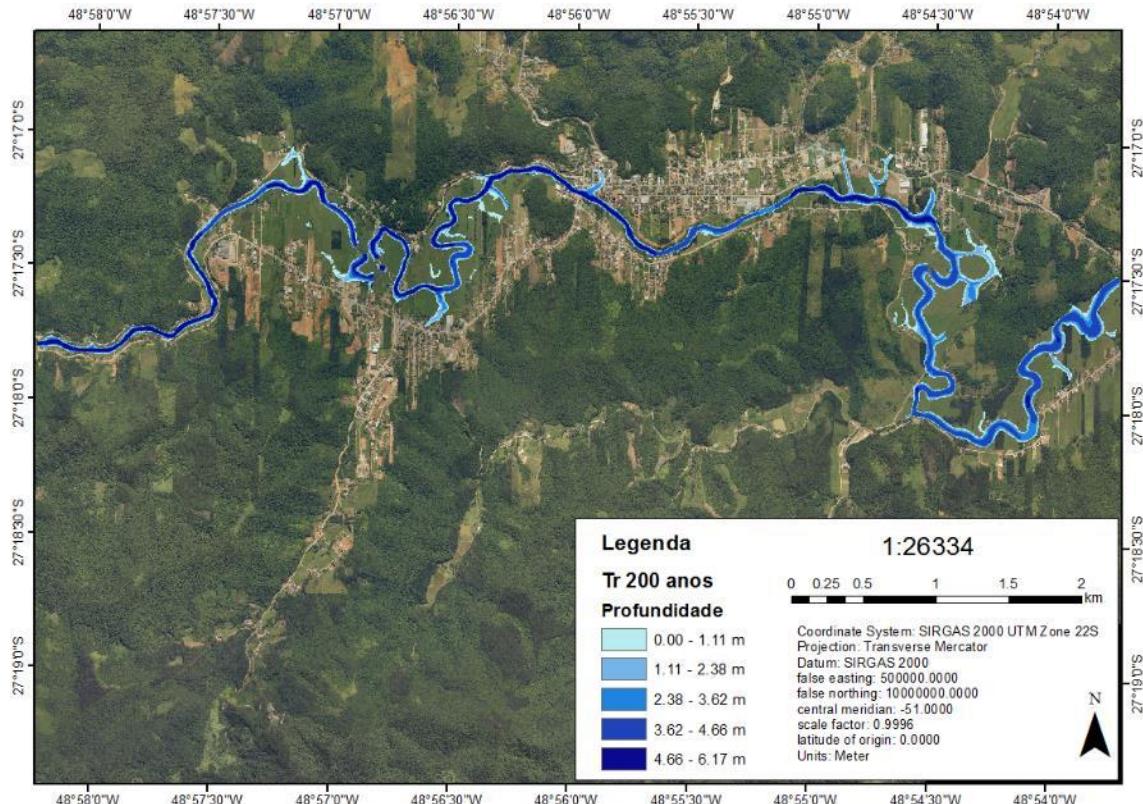


Figura D 8: Panorama completo do cenário de modelagem de inundaçāo com tempo de retorno de 200 anos.