

DAIANE TEIXEIRA SCHIER

**AVALIAÇÃO DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE PARA DETECÇÃO DE
ZONAS URBANAS INUNDÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, no Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Luís Rafaeli Neto

**Lages - SC
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Teixeira Schier, Daiane

Avaliação do Índice Topográfico de Umidade para detecção de
zonas urbanas inundáveis / Daiane Teixeira Schier. -- 2020.
123 p.

Orientador: Silvio Luís Rafaeli Neto

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, 2020.

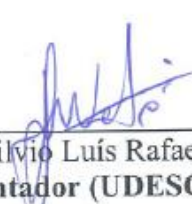
1. Inundação. 2. HEC-RAS. 3. HAND. 4. Índices binários. 5.
Paisagens hidrológicas. I. Rafaeli Neto, Silvio Luís. II. Universidade
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. III. Título.

DAIANE TEIXEIRA SCHIER

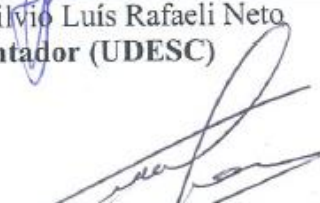
**AVALIAÇÃO DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE PARA DETECÇÃO DE
ZONAS URBANAS INUNDÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, no Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Ciências Ambientais.

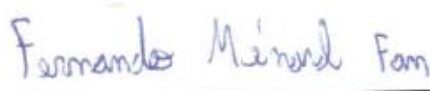
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Silvio Luís Rafaeli Neto
Orientador (UDESC)



Prof. Dr. Valdeci José da Costa
Avaliador 2 (UDESC)



Dr. Fernando Mainardi Fan
Avaliador 3 (UFRGS)

Lages (SC), 17 de fevereiro de 2020

AGRADECIMENTOS

A Deus e ao meu anjo da guarda por me darem amparo e a proteção necessária em toda a minha trajetória. A minha família que desde a infância sempre me incentivaram a buscar novos conhecimentos e me deram a base para conseguir trilhar o caminho até aqui. Aos meus pais, em especial, por todo o apoio, compreensão e paciência pelas horas que eu precisei abdicar em função do mestrado.

Aos amigos que ganhei no mestrado, Dayane, Daniely, Flávia, Karoline, Mayara, Mariana e Roberta, com vocês a trajetória foi mais leve e gratificante, sou imensamente grata pelo elo que criamos, por todos os momentos de descontração e preocupação que compartilhamos. A minha amiga de longa data Andressa, tenha certeza que suas palavras, seu apoio, sua paciência e incentivo foram fundamentais nesses dois anos, saber que tenho sempre com quem contar é gratificante.

A toda equipe do laboratório de hidrologia, gratidão por todos os momentos que passamos, por todas as gargalhadas, por toda ajuda, vocês são sensacionais! Agradecimento especial a Laís e ao Eder que contribuíram muito para a concretização dessa dissertação, aprendi muito com vocês e levarei sempre um pedacinho de ambos comigo.

Ao meu professor orientador Dr. Sílvio Luís Rafaeli Neto, por toda ajuda, paciência e conhecimento compartilhado que me enriqueceram como pessoa e como profissional, obrigada ainda pela confiança em meu potencial.

Estendo meu agradecimento ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais pela oportunidade de mestrado. Ao Programa de Bolsas de Monitoria de Pós-Graduação (PROMOP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, a todos que estiveram comigo durante esta jornada, o meu mais sincero agradecimento!

“Ou escreves algo que valha a pena ler, ou fazes algo acerca do qual valha a pena escrever. ”
(Benjamim Franklin)

RESUMO

SCHIER, Daiane Teixeira. **Avaliação do índice topográfico de umidade para detecção de zonas urbanas inundáveis**. 2020. 122p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, SC, 2020.

Paisagens hidrológicas são unidades espaciais dotadas de uma estrutura em que se identificam a superfície topográfica, o subsolo, o uso da terra e o ciclo hidrológico terrestre. Diferenciam-se das bacias hidrográficas, pois não são definidas por critérios topográficos. A proposta deste trabalho é apresentar as paisagens hidrológicas como arcabouço conceitual para a identificação de regiões da paisagem propensas a alagamentos e inundações. As inundações são responsáveis por desastres naturais em muitos países, com impactos de ordem social, econômica e ambiental, especialmente nas áreas urbanas. O uso da estrutura morfológica da paisagem na identificação de zonas inundáveis é uma alternativa em relação à abordagem tradicional, baseada em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. O trabalho contribui ao apresentar o Índice Topográfico de Umidade (ITU) como meio de identificar essas zonas, sob o escopo da estrutura hidrológica da paisagem. O método consistiu em aplicar o ITU nas sub-bacias dos rios Carahá e Ponte Grande e na inter-bacia Entre Rios, da cidade de Lages – SC. A distribuição espacial do ITU foi obtida por meio da equação proposta por Kirkby (1975) no sistema ArcGIS 10.5.1. O espaço amostral do ITU, com as zonas inundáveis inclusas, foi validado com dados de campo submetidos a um modelo de regressão logística binária. A comparação das zonas inundáveis identificadas da metodologia consistiu em comparar o ITU com o modelo HEC-RAS e o modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND), a análise de desempenho dos dois modelos foi realizada por índices binários. No modelo hidrodinâmico foi utilizada a equação intensidade-duração-frequência para estimar as intensidades das precipitações. Para o cálculo da precipitação efetiva foi utilizado o método Curve Number (CN). O hidrograma da cheia foi obtido a partir do hietograma da chuva, pelo método do Hidrograma Unitário Triangular (HUT). O modelo HAND foi processado no TerraView Hydro 0.4.4, o limite de fatiamento para a obtenção da área de inundação foi de 5m e posteriormente fez-se uma classificação da suscetibilidade a inundação em classes de 0 a 5,5m para destacar as regiões que oferecem maior perigo para a população. A resolução mais representativa da área de estudo para o cálculo do IT foi a de 20m, a classe definida como ITU alto resultou em 80% de acerto para locais verificados a campo. O mapeamento do ITU superestimou a área de inundação observada pelo modelo hidrodinâmico HEC-RAS e subestimou a área de inundação observada pelo modelo HAND. Erros embutidos no modelo digital de terreno, limitações humanas e computacionais, além de interferências ocorridas no terreno são prováveis causas de a porcentagem de acerto entre os modelos não terem sido maiores. A utilização do índice topográfico de umidade é atrativa atuando junto a gestores municipais no estabelecimento de políticas públicas territoriais e ambientais para contribuir no planejamento do espaço. Contudo, este mapeamento não isenta a realização de estudos mais detalhados e específicos a nível de bacia quando for necessário.

Palavras-chave: Inundação. HEC-RAS. HAND. Índices binários. Paisagens hidrológicas.

ABSTRACT

SCHIER, Daiane Teixeira. **Topographic detection index assessment for flooded urban areas**. 2020. 122p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, SC, 2020.

Hydrological landscapes are spatial units with a structure in which the topographic surface, the subsoil, land use and the terrestrial hydrological cycle are identified. They differ from hydrographic basins, as they are not defined by topographic criteria. The purpose of this work is to present the hydrological landscapes as a conceptual framework for the identification of regions of the landscape prone to floods and floods. Floods are responsible for natural disasters in many countries, with social, economic and environmental impacts, especially in urban areas. The use of the landscape's morphological structure in the identification of floodable areas is an alternative to the traditional approach, based on hydrological and hydrodynamic models. The work contributes by presenting the Topographic Index of Humidity (ITU) as a means of identifying these zones, under the scope of the hydrological structure of the landscape. The method consisted of applying the ITU in the sub-basins of the Carahá and Ponte Grande rivers and in the Entre Rios inter-basin, in the city of Lages - SC. The spatial distribution of the ITU was obtained using the equation proposed by Kirkby (1975) in the ArcGIS 10.5.1 system. The sample space of the ITU, with the included flood zones, was validated with field data submitted to a binary logistic regression model. The comparison of the flooded areas identified in the methodology consisted of comparing the ITU with the HEC-RAS model and the Height Above the Nearest Drainage (HAND) model, the performance analysis of the two models was performed by binary indices. In the hydrodynamic model, the intensity-duration-frequency equation was used to estimate the intensities of precipitation. For the calculation of effective precipitation, the Curve Number (CN) method was used. The flood hydrograph was obtained from the rain hietogram by the Triangular Unit Hydrograph (HUT) method. The HAND model was processed on TerraView Hydro 0.4.4, the slicing limit for obtaining the flooding area was 5m and subsequently a classification of the susceptibility to flooding was made in classes from 0 to 5.5m to highlight the regions that pose the greatest danger to the population. The most representative resolution of the study area for calculating the IT was 20m, the class defined as high ITU resulted in 80% accuracy for locations verified in the field. The mapping of the topographic moisture index overestimated the flooding area observed by the HEC-RAS hydrodynamic model and underestimating the flooding area observed by the HAND model. Errors embedded in the digital terrain model, human and computational failures, in addition to interference occurring in the terrain are likely causes of the percentage of correctness between the models not having been greater. The use of the topographic humidity index is attractive, working with municipal managers in the establishment of territorial and environmental public policies to contribute to space planning. However, this mapping does not exempt more detailed and specific studies at the basin level when necessary.

Keywords: Flood. HEC-RAS. HAND. Binary indexes. Hydrologic landscapes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Depósito de partículas na planície de inundação de Lages após um evento de chuva intensa no ano de 2019.	24
Figura 2 - Características do leito do rio.	24
Figura 3 - Danos relacionados a desastres naturais no estado de Santa Catarina.	25
Figura 4 - Fases do Gerenciamento de Desastres Naturais.	26
Figura 5 - Métodos para identificação de zonas inundáveis.	30
Figura 6 - Metodologia de sistema para solução de problema com retroalimentação.	32
Figura 7 - Configuração gráfica tridimensional do esquema generalizado de Preissmann.	37
Figura 8 - Classes HAND.	39
Figura 9 - Componentes para o cálculo do ITU.	42
Figura 10 - Balanço hídrico de uma encosta hipotética.	43
Figura 11 - Direções possíveis de uma célula.	43
Figura 12 - Direções múltiplas de escoamento para resolução de 50 metros.	44
Figura 13 - Distribuição de frequência do ITU na área de estudo.	44
Figura 14 – Localização da área de estudo.	50
Figura 15- Geologia da área de estudo.	53
Figura 16 - Uso e ocupação da terra para a área de estudo.	54
Figura 17 – Estrutura do delineamento experimental.	55
Figura 18 - Fluxograma do processo para obtenção do ITU.	56
Figura 19 - Pontos visitados a campo.	58
Figura 20 – Procedimento para gerar a matriz de direção de drenagem local.	63
Figura 21 - Comparação de MDT e Grid HAND.	65
Figura 22 - Histograma de frequência do ITU.	69
Figura 23 - Efeito da suavização do índice topográfico para diferentes resoluções.	70
Figura 24 - Classes de declividade e ITU.	74
Figura 25 - Classes de perigo a inundação.	77
Figura 26 - Geometria para cada espaço/problema.	78
Figura 27 - Espaços/problemas.	79
Figura 28 - Uso e ocupação da terra para cada espaço/problema.	81
Figura 29- Hidrograma unitário espaço/problema 1.	82
Figura 30- Hidrograma unitário espaço/problema 2.	82
Figura 31 - Hidrograma unitário espaço/problema 3.	82

Figura 32- Hidrograma unitário espaço/problema 4.	83
Figura 33 - Hidrograma unitário espaço/problema 5.	84
Figura 34 - Área de inundação nos espaços problemas.	85
Figura 35 – Porcentagem das classes de ITU abrangidas pelo polígono de inundação nos espaços/problemas.	86
Figura 36 - Índices de desempenho atrelados ao ITU para a área observada no modelo HEC-RAS.	88
Figura 37 - Polígono de inundação para a área de estudo.	90
Figura 38 – Comparação entre o cenário observado e o cenário simulado.	91
Figura 39 - Classes HAND de suscetibilidade a inundação.	92
Figura 40 - Relação entre as classes de suscetibilidade HAND e o ITU.	93
Figura 41 - Relação entre as classes de suscetibilidade de inundação e o ITU na inter-bacia Entre Rios.	94
Figura 42 - Índices de desempenho atrelados ao ITU para a área observada no modelo HAND.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Vantagens e desvantagens do método ITU, modelo HEC-RAS e HAND	31
Tabela 2 - Metodologia de sistema para solução de problema.	32
Tabela 3 - Parâmetros correspondentes a área de estudo.	49
Tabela 4 - Tabela de contingência com as possibilidades de combinações conforme a classificação binária.....	66
Tabela 5- Indicadores numéricos de desempenho binário para estudos em inundações.....	67
Tabela 6 - Pré-classificação do ITU	68
Tabela 7 - Parâmetros relativos ao MDT e ao ITU.	68
Tabela 8 - Classificação de acertos.	72
Tabela 9 - Classes de ITU consistido	73
Tabela 10 - Classificação da altitude	76
Tabela 11 - Valores de CN para os espaços/problemas.....	80
Tabela 12 - Performance do ITU com relação do modelo HEC-RAS em termos de área e número de pixels para os índices A,B, C e D.	87
Tabela 13 – Performance do ITU com relação do modelo HAND em termos de área e número de pixels para os índices A,B,C e D.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CN - Curve Number

CN-SCS - Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos

D8 - Deterministic EightNeighbors

HAND - Height Above Nearest Drainage

HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center – River Analysis System

HTA - Histograma-Tempo-Área

HUT - Hidrograma Unitário Triangular

IDF - Intensidade-Duração-Frequência

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ITU – Índice Topográfico de Umidade

LDD - Direção de Drenagem Local

MDT - Modelo Digital de Terreno

NRCS - Serviço de Conservação dos Recursos Naturais

SDS - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável

SIG – Sistema de Informação Geográfica

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

USEPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Objetivo geral	21
1.1.2	Objetivos específicos	22
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	INUNDAÇÃO	23
2.2	GERENCIAMENTO DE DESASTRES NATURAIS	25
2.3	MAPEAMENTO DE ZONAS SUJEITAS A INUNDAÇÕES	27
2.4	MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE ZONAS URBANAS INUNDÁVEIS	29
2.4.1	Método baseado em modelagem hidrodinâmica – o modelo HEC-RAS.....	33
2.4.2	<i>Modelo Height Above the Nearest Drainage – HAND.....</i>	<i>37</i>
2.4.3	O método do índice topográfico de umidade	40
2.4.3.1	<i>Conceituação</i>	<i>40</i>
2.4.3.2	<i>ITU como indicador de áreas propensas a inundação</i>	<i>44</i>
2.4.3.3	<i>ITU para mapeamento de zonas inundáveis</i>	<i>45</i>
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	49
3.1.1	Geografia.....	49
3.1.2	Clima	51
3.1.3	Vegetação	51
3.1.4	Recursos hídricos	51
3.1.5	Relevo	52
3.1.6	Geologia.....	52
3.1.7	Uso e ocupação da terra e tipo de solos	53
3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	54
3.2.1	Determinação do ITU da paisagem hidrológica	55
3.2.1.1	<i>Pré-classificação.....</i>	<i>55</i>
3.2.1.2	<i>Análise de sensibilidade das resoluções espaciais do MDT.....</i>	<i>56</i>
3.2.1.3	<i>Classificação consistida do ITU</i>	<i>57</i>
3.2.1.4	<i>Pós-classificação</i>	<i>58</i>
3.2.2	HEC-RAS.....	58
3.2.2.1	<i>Definição espaço/problema</i>	<i>59</i>
3.2.2.2	<i>Obtenção das isócronas e do hidrograma de entrada.....</i>	<i>59</i>
3.2.3	<i>Modelo Height Above Nearest Drainage - HAND</i>	<i>63</i>
3.2.4	Índices binários para a avaliação dos modelos.....	65
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MDT	68

4.2	CLASSIFICAÇÃO CONSISTIDA DO ITU.....	71
4.3	PÓS-CLASSIFICAÇÃO DO ITU.....	76
4.4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	77
4.4.1	Hidrogramas de entrada.....	77
4.4.2	Análise de sensibilidade do ITU com relação ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS.....	84
4.5	MODELO HAND.....	89
4.5.1	Análise de sensibilidade do ITU com relação ao modelo HAND.....	94
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
	APÊNDICE A.....	120
	APÊNDICE B.....	123

1. INTRODUÇÃO

As inundações são um dos principais fatores que causam desastres naturais em muitos países ao redor do mundo (CUNHA et al, 2011; GAIN; HOQUE, 2013), responsáveis por perdas de ordem social, econômica e ambiental. Desastres naturais associados a inundações urbanas ocorrem principalmente devido à natureza antropogênica (JHA; BLOCH; LEMON, 2011) do espaço urbano, associado a um planejamento inadequado que induz a sociedade a se instalar em planícies inundáveis.

Considerando que cerca de metade da população mundial vive em áreas urbanas (JALAYER et al., 2014), identificar as áreas suscetíveis a inundações é uma etapa fundamental na direção de um planejamento e de uma gestão espacial eficaz que reduzam os riscos nas cidades.

A organização e o planejamento do espaço urbano podem ser facilitados pela representação gráfica dessas áreas (MAKRAKIS, 2017). Determinar quais são essas áreas e onde se situam contribui para a redução dos impactos provocados pelas mesmas (ROMANESCU et al., 2016) por meio de estratégias de prevenção.

O mapeamento de zonas propensas a inundações pode ser desenvolvido empregando-se diferentes metodologias e instrumentos de apoio (MONTE et al., 2015). A validação desses mapeamentos é realizada por meio de dados reais observados, tendo como intuito quantificar o grau de representatividade do modelo em relação ao fenômeno físico real. Essa análise é normalmente realizada por levantamentos de campo, imagens de satélites e/ou fotografias aéreas (MONTEIRO, KOBAYAMA, ZAMBRANO, 2015).

Os dados de campo são representativos dos tipos de fenômenos nos quais se espera simular, os mesmos possuem alto grau de confiabilidade, porém podem ser de difícil obtenção (MONTEIRO, KOBAYAMA, ZAMBRANO, 2015). Os dados mais utilizados são os produtos obtidos por técnicas de processamento digital de imagens de sensores ópticos, por exemplo os produtos dos sensores a bordo do satélite Landsat (XU, 2006), ou por processamento de dados de radar na região espectral de microondas, como imagens do satélite RADARSAT (MARINHO et al., 2012). As fotografias aéreas por sua vez, são normalmente vinculadas a um maior detalhamento espacial do que as imagens orbitais disponíveis no mercado (CAZETTA, 2009).

A aplicação de modelos hidrológicos associados a modelos hidrodinâmicos constitui-se em uma metodologia tradicionalmente utilizada para o mapeamento de áreas inundáveis.

Estes modelos se fundamentam em equações que requerem uma quantidade e variedade de dados de entrada, além de conhecimento técnico especializado que nem sempre estão disponíveis na maioria dos municípios brasileiros, mesmo naqueles mais desenvolvidos.

A função destes modelos é representar os escoamentos de água no espaço geográfico, a partir dos requisitos da aplicação. Esta representação inclui a apresentação gráfica das áreas inundadas, obtida com auxílio de um modelo digital de terreno (MDT). A identificação de zonas inundáveis exige um nível de detalhe significativo (NEAL et al., 2012; LEE et al., 2015), o que impõe a necessidade de MDT de alta resolução espacial.

A complexidade dos fatores envolvidos no problema e o nível de detalhamento espacial se constituem em uma demanda computacional que, por vezes, não é possível de serem atendidos em grandes áreas (SPECKHANN, 2018).

Uma alternativa para o mapeamento de zonas propensas a inundações é a utilização de características morfológicas do relevo, ou seja, a topografia seria um agente condicionador dos mecanismos geradores dos escoamentos (WAGENER et al., 2010). Assim, a topografia atua no movimento da água tanto em superfície, quanto no subsolo, sendo a característica de maior importância na paisagem para o controle de fluxo da água (BEVEN; KIRBY, 1979).

O fluxo da água em superfície e em sub-superfície estabelece relações entre os elementos que compõem a paisagem (VAN BUUREN; KERKSTRA, 1993). Padrões específicos destas relações definem unidades espaciais da paisagem denominadas de estrutura hidrológica da paisagem. O potencial de uso e ocupação da terra nestas unidades depende das condições ambientais dentro das mesmas.

Determinar a estrutura hidrológica da paisagem urbana é uma abordagem conceitual relativamente nova na hidrologia, pela qual se busca identificar padrões hidrológicos da paisagem que estejam relacionados com os eventos de alagamentos e de inundações. Assim, determinar o padrão espacial das zonas topográficas sujeitas a inundações é um meio de determinar o potencial de uso e ocupação da terra nestas zonas e, desta forma, prover conhecimento para o planejamento e gestão territorial nos ambientes urbanos.

A busca por padrões hidrológicos da paisagem pode ser realizada por meio de variáveis descritoras da superfície topográfica. Os descritores de terreno apresentam uma quantidade significativa de informações sobre a exposição a fenômenos de inundação (MANFREDA et al., 2014).

Diferenças de alturas, declividades, distâncias, entre outros, são parâmetros comumente adotados para descrever paisagens hidrológicas, tais como o modelo HAND

(RENNÓ et al., 2008) e o Índice Topográfico de Umidade – ITU (BEVEN; KIRBY, 1979), especificamente aplicados ao zoneamento de áreas inundáveis (GHARARI et al., 2011).

A declividade e o aspecto do terreno são também considerados índices topográficos amplamente utilizados no planejamento agrícola e ambiental (MINELLA; MERTEN, 2012). Outros estudos mostraram aplicações de índices topográficos relacionados com a produção de sedimentos por unidade de área (MOORE; BURCH, 1986; WILSON et al., 1996; MINELLA et al., 2010); tipo de solo e comportamento hidrológico (PARK; VAN DE GIESEN, 2004; UHLENBROOK et al., 2004; TETZLAFF et al., 2007; LIN; ZHOU, 2008; PELLETIER, RASMUSSEN, 2009; BEHRENS et al., 2010; DETTY; MCGUIRE, 2010; PRATES; SOUZA; JUNIOR, 2012;) e reconhecimento de zonas saturadas (BEVEN; KIRKBY, 1979; AGNEW, et al. 2006; CAI; WANG, 2006; ARYAL; BATES, 2008; GRABS et al., 2009; SILVA, 2012; BRESSIANI, 2016).

Identificar zonas inundáveis implica na classificação da paisagem hidrológica (WINTER, 2001), no sentido de revelar as regiões mais propensas do relevo a sofrerem saturação. Estas regiões localizam-se em porções da paisagem em que a declividade da superfície é baixa e especialmente situadas próximas a um curso d'água.

Este princípio é aplicado ao modelo HAND e, em certa medida, está também incluído na formulação do modelo hidrológico TOPMODEL (BEVEN; KIRBY, 1979), que adota o ITU como parâmetro hidrológico distribuído para descrever o déficit de saturação do solo e, desta forma, calcular os escoamentos na direção do canal.

O ITU tem sido apresentado como um parâmetro hidrogeomorfológico que indica zonas hidrológicas que possuem propensão natural ao acúmulo de água (MOTA; GRISON; KOBAYAMA, 2013). Este parâmetro pode ser uma alternativa a abordagem tradicional dos modelos hidrodinâmicos, cuja obtenção pode se mostrar mais econômica e prática (POURALI et al., 2014).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o índice topográfico de umidade (ITU) como instrumento técnico-científico de suporte à identificação de zonas inundáveis, em paisagens hidrológicas urbanas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o grau de generalização da superfície topográfica (grau de suavização do MDT) necessária e suficiente para a detecção de zonas inundáveis pelo ITU;
- Determinar as zonas inundáveis pelo ITU;
- Comparar o método com os modelos HEC-RAS e HAND.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INUNDAÇÃO

Inundação refere-se ao transbordamento do curso d'água na direção da planície de inundação, como consequência do processo de enchente neste curso (BITAR, 2014). Planície de inundação é a região lateral adjacente ao curso d'água, em que ocorre o processo natural de inundação e está associada com o regime climático ou hidrológico particular da bacia de drenagem (LEOPOLD; WOLMAN; MILLER, 1964).

A planície de inundação é uma feição deposicional do vale de um rio associada com um regime climático ou hidrológico particular da bacia de drenagem (ROCHA; COMUNELLO, 2011). Mudanças no regime hidrológico, incluindo mudanças no aporte de sedimentos e de água poderão resultar na alteração da planície de inundação (LEOPOLD et al., 1964). Por esta razão, pode-se considerar os rios como sendo os principais agentes de transformação da paisagem, dada a sua capacidade de erosão, transporte e deposição de partículas sólidas (LEANDRO, SOUZA, 2012). O comportamento de uma bacia hidrográfica, em relação ao transporte de sedimentos, pode variar desde as regiões mais altas até as planícies conforme a variação litológica, tipo de solo, cobertura vegetal, declividade e regime de chuvas (SOUZA et al., 2015).

A erosão é um fenômeno originado pela interação do ciclo hidrológico com o ciclo das rochas, os quais dependem dos processos de precipitações (GUERRA, 1980). As partículas erodidas são transportados até os rios (CARVALHO, 1994) e gradualmente depositadas no canal ou na planície de inundação (SUGUIO; BIGARELLA, 1990), conforme pode ser observado na Figura 1.

Sistema de drenagem local inadequado e a ocorrência de eventos de precipitações intensas ou máximas, podem resultar em grande problema nas regiões de rápida urbanização (GUPTA; AHMAD, 1999), especialmente nas planícies inundáveis. Estas planícies podem ser consideradas como sendo um segundo leito do rio (Figura 2), que é ocupado eventualmente pela água (TUCCI, 2003). Em Lages (SC - BRASIL), por exemplo, eventos de inundações de maior magnitude tem sido registrados em intervalos de 2 a 3 anos, o que contribui para criar uma sensação de segurança na sociedade que tende a ocupar estes locais.

Prejuízos sociais, econômicos e ambientais são registrados quando ocorre a ocupação inadequada de áreas suscetíveis a inundação (TRENTIN; ROBAINA; SILVEIRA, 2013). Esse

perfil de perigo significativo e diverso exige a implementação de gerenciamento de risco efetivo para fortalecer a segurança e a resiliência das populações (NSW, 2012).



Figura 1 - Depósito de partículas na planície de inundação de Lages após um evento de chuva intensa no ano de 2019.

Foto: Sílvio Luís Rafaeli Neto (2019).

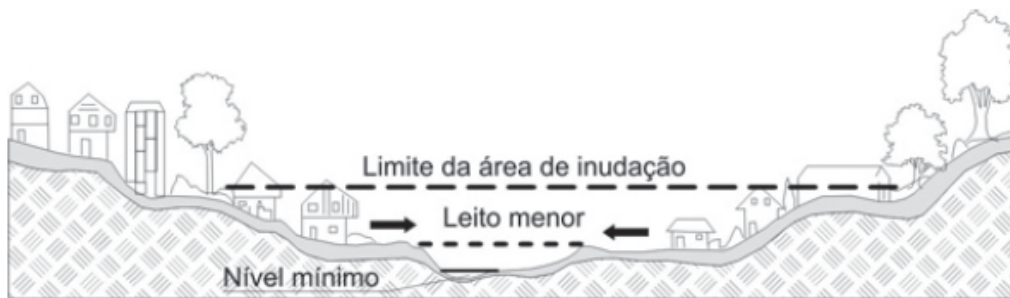


Figura 2 - Características do leito do rio.

Fonte: Tucci (2008).

Bilhões de dólares são gastos anualmente em função dos danos causados pelas inundações (MUNICH, 2013). No Brasil, entre 1995 e 2014 os desastres naturais acarretaram em um prejuízo de R\$ 182,7 bilhões, sendo que 40% destes são ocasionados por inundações (CEPED, 2016). No mesmo período, em Santa Catarina, teve-se um dano de R\$ 17,6 bilhões decorrentes de desastres naturais (Figura 3), reportados pelos municípios em um total de 2.704 registros (CEPED, 2016).

Entre os anos de 2000 e 2017, cerca de 86,7 milhões de pessoas foram mundialmente afetadas pelas inundações, o que resultou em um total de 5,4 mil óbitos (EM-DAT, 2019). A ocupação das planícies de inundação contribui significativamente para os efeitos negativos das inundações (SPECKHANN, 2018). Estima-se que 1 bilhão de pessoas vivem nestas áreas (DI BALDASSARE et al., 2013).

Os desastres de natureza hidrológica apresentam ocorrência em vários estados brasileiros, sendo Santa Catarina o segundo no ranking de maior frequência, com perdas e danos imediatos (XAVIER et al., 2014). Em Santa Catarina, somente no ano de 2008, mais de 5 bilhões de reais foram contabilizados com perdas relacionadas as inundações (HERRMANN; KOBAYAMA; MARCELINO, 2014).

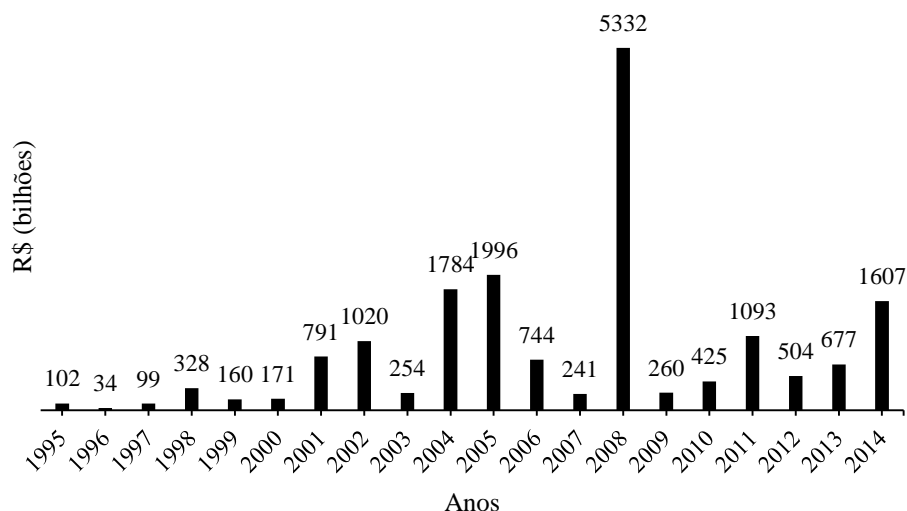


Figura 3 - Danos relacionados a desastres naturais no estado de Santa Catarina.
Fonte: CEPED (2016).

Entre o ano de 2000 e o primeiro semestre de 2017, foram registradas 6.164 situações de emergência, em razão de desastres hidrológicos, reconhecidas pelo Governo Federal, distribuídas em 51,6% dos municípios do país (BOLETIM EPIDEMIOLÓGICO, 2018). Em Santa Catarina, dos 295 municípios afetados por esses eventos, 89,8% decretaram situação de emergência (BOLETIM EPIDEMIOLÓGICO, 2018).

2.2 GERENCIAMENTO DE DESASTRES NATURAIS

Há uma forte relação entre o crescimento populacional e o aumento do número de desastres naturais, como os de natureza hidrológica (GOERL; KOBAYAMA, 2013). Espera-se que a incidência de inundações urbanas também aumente no futuro próximo em consequência da mudança na organização sócio-espacial humana (JHA; BLOCK; LAMOND, 2012).

A rápida e mal planejada urbanização pode alterar o trajeto natural dos cursos d'água e intensificar os danos associados a inundações (WINTER, 2018). A canalização dos córregos

naturais, adotada em municípios para aumentar a velocidade de escoamento da água, tende a transferir o problema para as áreas a jusante (CANHOLI, 2014).

Alterações na paisagem hidrológica urbana, como a impermeabilidade da superfície do terreno, modifica o ciclo hidrológico nas fases de escoamento superficial e de infiltração (JUNIOR; SANTOS, 2013). Estas alterações potencializam o aumento do escoamento superficial e a diminuição da infiltração de água no solo, os quais contribuem para a inundação (FRITZEN; BINDA, 2011).

A compreensão das questões envolvendo as inundações tem sido ampliada e aprofundada, no entanto, ainda existem lacunas (SPECKHANN, 2018) atribuídas a duas vertentes: a complexidade dos sistemas de inundações e a tendência da percepção humana e do pensamento (MERZ et al., 2015). Para tanto, deve-se buscar um entendimento mais profundo dos processos envolvidos e evitar modelos que sejam uma caixa preta (SPECKHANN, 2018).

Uma vez que a possibilidade de eliminação de episódios suscetíveis a desastres naturais é improvável (GOERL; MICHEL; KOBİYAMA, 2017), deve-se executar ações de planejamento preventivo e mitigatório a fim de amenizar os danos socioeconômicos e ambientais (MATA-LIMA et al., 2013). Estas ações podem ser abordadas no conceito de Gerenciamento de Desastres Naturais – GDN (RAFELI NETO, 2000). O GDN abrange quatro fases: preparação, resposta, recuperação e mitigação (Figura 4). Estas etapas não seguem um padrão linear, mas são de natureza cíclica, com ações que se sobrepõem.

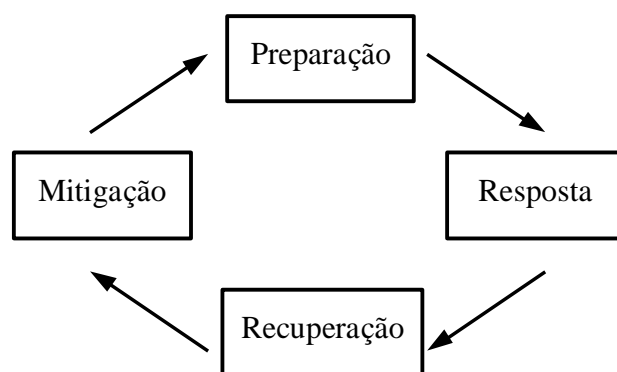


Figura 4 - Fases do Gerenciamento de Desastres Naturais.

Fonte: Rafaeli Neto (2000).

A fase de preparação envolve atividades de planejamento bem anteriores à ocorrência do evento e objetivam melhorar a capacidade de resposta operacional durante uma emergência. A fase de restauração se caracteriza pelo restabelecimento dos sistemas afetados e o retorno às atividades no nível anterior ao desastre, se possível com melhorias. A fase de mitigação se refere à adoção de medidas com o objetivo de reduzir ou eliminar a vulnerabilidade ao perigo de longo prazo, prevenir futuros desastres e propiciar comunidades mais seguras (RAFAELI NETO, 2000, p.12).

Processos decisórios em GDN envolvem volume significativo de informação, em sua maioria, de natureza espacial. Isso significa que os resultados ou consequências das decisões distribuem-se pelo espaço geográfico. Inundações, portanto, são fenômenos hidrológico-hidráulicos de natureza espacial, cujas decisões de gerenciamento tem implicações espaço-temporais.

A análise dos componentes do sistema hidrológico-hidráulico deve considerar o máximo possível de componentes e suas relações. Alguns componentes são de natureza morfológica, ou seja, são entidades geográficas que possuem as propriedades de posição, geometria e atributos (RAFAELI NETO, 2000). Outros componentes são de natureza dinâmica composta por elementos dinâmicos da paisagem hidrológica, como a água, por exemplo. A complexidade das relações entre estes elementos dificulta a estrutura do problema em GDN, o que impõe incertezas e riscos sobre as decisões.

Mapear zonas inundáveis é, portanto, um esforço no sentido de prover informação morfológica para o GDN provocados por inundações e, deste modo, reduzir as incertezas e riscos das decisões, nas suas diferentes fases.

2.3 MAPEAMENTO DE ZONAS SUJEITAS A INUNDAÇÕES

A inundação tende a ocorrer ao longo dos principais rios e pequenos riachos, nas áreas costeiras e ao longo das margens de alguns lagos, mas possuem distinção quanto a sua intensidade e frequência (PEREIRA et al., 2017) por depender de muitos aspectos, entre eles, a topografia (TINGSANCHALI, 2012) da paisagem hidrológica.

O conhecimento sobre a estrutura hidrológica da paisagem fornece indícios suficientes para a análise dos componentes do meio físico e os aspectos condicionantes das situações de perigo e de risco. Cerca de 33,1% dos municípios brasileiros dispõem de medidas específicas para gerenciamento de riscos de desastres desencadeados por inundações, sendo o mapeamento de zonas de suscetibilidade a com maior inserção (IBGE, 2014).

Mitigar os desastres por inundações exige uma série de medidas que podem ser implementadas. Estas medidas são comumente classificadas como medidas estruturais e não estruturais (FILHO; MARTINS; PORTO, 2012). As medidas estruturais se referem a obras de engenharia implementadas a fim de diminuir os danos causados pelos desastres (DECINA, BRANDÃO, 2016). As medidas não estruturais contemplam as ações que objetivam estimular uma melhor convivência da população com os acontecimentos naturais, dentre as quais o zoneamento de áreas suscetíveis a inundação, sistemas de alertas e seguros (VIANA;

JOHNSSON, 2017). Essas medidas são as mais recomendadas por implicarem em baixo custo em relação às medidas estruturais e por apresentarem relativa facilidade de implementação (KOBİYAMA et al., 2017).

O mapeamento das zonas inundáveis é uma das principais ferramentas para auxiliar as comunidades a evitar ou mitigar as perdas ocasionadas pelas inundações (ARRIGHI et al., 2013). Mapas de inundações resultam de uma combinação de informações topográficas e hidrológicas, de modo a prever quais as regiões e localidades que são mais passíveis de serem atingidas pela elevação do nível das águas (SPECKHANN, 2018).

O mapeamento de zonas suscetíveis a inundações é uma medida não estrutural que consiste em definir os locais onde os eventos ocorrem. Trata-se de uma das medidas não estruturais mais difundidas e viáveis financeiramente (MONTE et al., 2015), pois pode ser aplicada em municípios com poucos recursos financeiros (SHIDAWARA, 1999). O mapeamento agrega valor ao investimento, uma vez que serve ao planejamento urbano e ordenamento territorial (GOERL; KOBİYAMA, PELLERIN, 2012), auxilia no estabelecimento de medidas preventivas e corretivas aliadas a ações de controle do uso e ocupação da terra (MENEZES, 2014) e contribui na integração ao planejamento ambiental dos municípios (ROBAINA; TRENTIN, 2013).

O Programa de Redução de Riscos do Ministério das Cidades (BRASIL, 2007) propõem uma metodologia para mapeamento de áreas de risco de enchentes e inundações o qual deve conter a identificação e delimitação preliminar de área de risco em fotos aéreas de levantamentos aerofotogramétricos de baixa altitude (quando existir) e imagens de satélite atrelados a levantamentos de campo para o zoneamento de áreas de risco a inundação (HORA; GOMES, 2009).

Uma variedade de imagens de sensoriamento remoto está disponível para o mapeamento de zonas de inundação, contudo, para determinadas regiões com alta porcentagem de cobertura de nuvens, as imagens multiespectrais dos satélites mostram-se insuficientes para discriminar essas áreas detalhadamente, além de requererem alta resolução temporal para permitir monitorar o pulso hidrológico (LSIE, 2017). Já os sensores de sistema radar possuem independência relativa das condições atmosféricas e de iluminação e possuem a capacidade de mapear as áreas inundadas em áreas cobertas de vegetação (WOODHOUSE, 2006).

Não existe uma única metodologia para realizar o mapeamento das zonas suscetíveis a inundações (SOUSA, 2012), mas comumente os mapas são gerados através de duas maneiras diferentes, a partir de dados observados da inundação ou através da modelagem hidrológica e hidrodinâmica (MONTEIRO; KOBİYAMA, 2014).

O primeiro método fornece um mapa com maior grau de exatidão, porém é de difícil obtenção, pois os dados precisam ser adquiridos em pleno evento de inundação (GIGLIO; KOBİYAMA, 2011). Além da coleta em campo, estes dados também podem ser recuperados através de fotografias, vídeos, jornais ou declaração de pessoas presentes no evento. Outro ponto negativo deste método é a inflexibilidade em criar mapas com períodos de retorno pré-estabelecidos (MONTEIRO; KOBİYAMA, 2014).

O segundo método consiste na utilização de modelos hidrológicos associados a hidrodinâmicos, os quais são empregados tradicionalmente (GOERL; MICHEL; KOBİYAMA, 2017). A ausência de dados com resolução temporal adequada, a demanda computacional e o aumento do grau de complexidade das relações entre os dados podem ser fatores contrários para a aplicação destes modelos em grandes áreas (SPECKHANN, 2018).

Mapeamentos das zonas suscetíveis a inundações por meio de métodos baseados em modelos digitais de terreno são uma alternativa a falta de dados hidrológicos (DEGIORGIS et al., 2012; JALAYER et al., 2014; POURALI et al., 2014) ou de conhecimento especialista. O produto deve resultar do estudo detalhado da paisagem hidrológica.

Este estudo deve considerar as características do relevo, uso e ocupação da terra, pedologia (MACHADO; TORRES, 2012), entre outros. Parâmetros físicos e métricos devem ser utilizados em toda a área de estudo, em especial aqueles que são distribuídos espacialmente, como é o caso do ITU. Por vezes, o volume de dados e a variedade de valores exige que haja uma classificação, de modo que o processo de análise ocorra sobre dados agregados com maior relevância.

No Brasil, a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, estabelecida pela Lei nº 12.608/2012, atribui aos estados e aos municípios a competência de identificar e mapear as zonas de riscos nos seus respectivos territórios. De acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014), em relação ao total de 5.570 municípios brasileiros, 1.083 (19%) possuíam mapeamento de zonas suscetíveis a inundação.

2.4 MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE ZONAS URBANAS INUNDÁVEIS

Os métodos para a estimativa de zonas urbanas inundáveis são aplicados em nível de bacia hidrográfica (Figura 5). Padrões específicos das relações existentes entre os elementos da bacia definem unidades espaciais da paisagem pela qual se busca identificar padrões hidrológicos associados com eventos de máxima. A busca por padrões hidrológicos da

paisagem característicos de áreas inundáveis pode ser realizada por meio de modelos morfológicos e modelos hidrológicos associados a modelos hidrodinâmicos.

Os modelos morfológicos se baseiam na forma e estrutura do relevo, a exemplo do ITU e do HAND, os quais se configuram como ferramentas de fácil aplicação e viáveis financeiramente. Estes modelos indicam as áreas de perigo natural que favorecem a ocorrência de desastres naturais, como as inundações (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2011), mas não exprimem o potencial de risco, sendo este a relação entre o perigo e a vulnerabilidade (UNPD, 2004). O risco estima a abrangência espacial da inundação em termos de extensão e sua magnitude em termos de recorrência dos eventos, profundidade da água nos trechos atingidos e potenciais danos (TUCCI, 2005).

Os modelos hidráulicos-hidrológicos são capazes de reproduzir os fenômenos hídricos dentro de uma escala de tempo definida, como o HEC-RAS, apesar de serem tradicionalmente utilizados, são modelos mais complexos, que demandam de uma série de dados de entrada e maior conhecimento especialista. As principais vantagens e desvantagens de cada modelo estão elencados na Tabela 1.

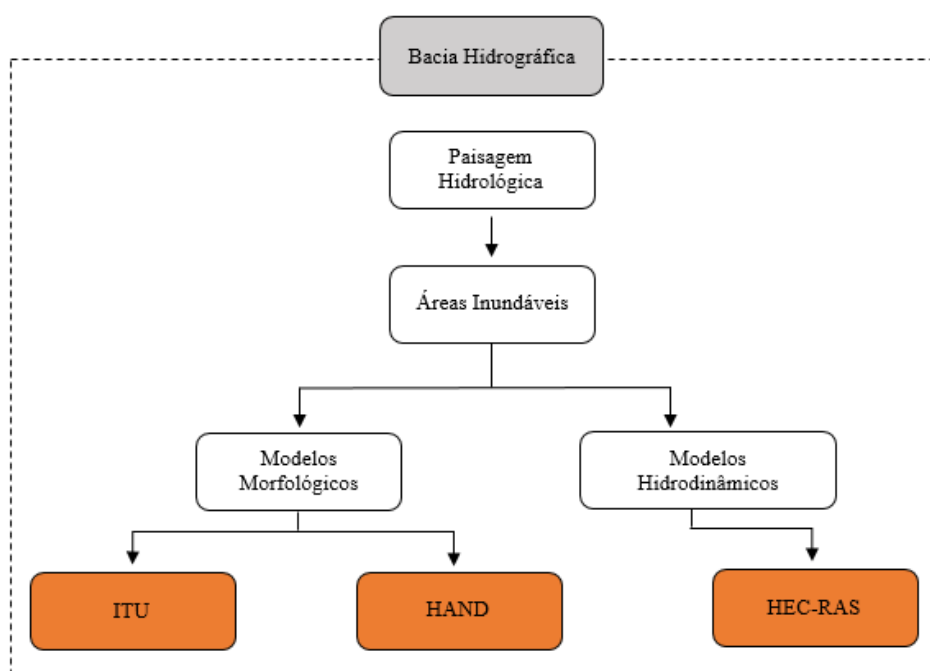


Figura 5 - Métodos para identificação de zonas inundáveis.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do método ITU, modelo HEC-RAS e HAND.

	ITU	HEC-RAS	HAND
Vantagens	Requer poucos dados de entrada	Polígono de inundação associada a um tempo de retorno	Requer poucos dados de entrada
	Processamento rápido	Reproduz com precisão a propagação da inundação para uma escala de tempo definida	Processamento rápido
	Manipulação simples	Alto grau de acurácia	Manipulação simples Mapeamento de fácil interpretação
	Pode ser aplicado em qualquer região que disponha de um MDT	Acesso livre	Acesso livre Pode ser aplicado em qualquer região que disponha de um MDT
Desvantagens	Não está relacionado a um TR	Fundamenta-se em equações complexas	Não está relacionado a um TR
	Indica apenas áreas em que uma cheia pode atingir	Requer grande quantidade de dados de entrada	Indica apenas áreas em que uma cheia pode atingir
	Dependência de um valor de classificação	Dificuldade na obtenção de dados hidráulicos/hidrológicos Demanda computacional	Dependência de um valor de classificação
	Qualidade do MDT interfere nos resultados	Exige conhecimento detalhado da geometria dos canais pluviais e de parâmetros físicos Incerteza hidrológica	Qualidade do MDT interfere nos resultados

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Independente do modelo utilizado, sua função é traduzir o sistema real da forma mais dedicada e precisa possível, a fim de resolver problemas. Sob o enfoque sistêmico, um problema existe quando um sistema não é mais capaz de manter o estado¹ de suas variáveis dentro de certos limites (HENDRIKS; VRIENS, 1995).

A solução do problema é buscar uma readaptação do sistema a fim de que este atinja uma nova ordem de equilíbrio (SIMON, 1990). O desenvolvimento de modelos é um processo que envolve planejamento, modelagem, validação e aplicação (RAFAELI NETO, 2000), como pode ser observado na Figura 6 e Tabela 2.

Os modelos utilizados neste trabalho para realizar o mapeamento de zonas inundáveis são modelos validados e experimentados em inúmeros trabalhos. Tratam-se de modelos consolidados na literatura e aplicados em muitas situações. Este trabalho objetiva avaliar o desempenho do modelo baseado no ITU na identificação de zonas suscetíveis a inundações, sendo este comparado com os modelos consolidados HEC-RAS e HAND, que adotam abordagens bastante distintas entre si.

¹ Estado é a situação de todos os elementos do sistema, seus atributos e atividades num determinado ponto no tempo (POOCH; WALL, 1993).

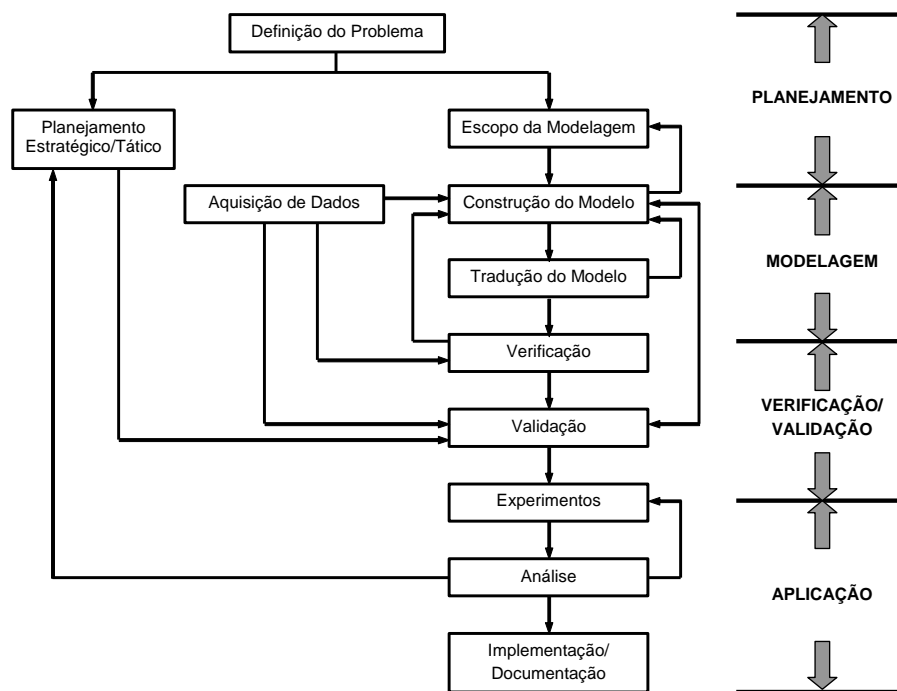


Figura 6 - Metodologia de sistema para solução de problema com retroalimentação.

Fonte: Pooch e Wall (1993, p.6).

Tabela 2 - Metodologia de sistema para solução de problema.

Planejamento	Formulação do Problema	• Grade de tempo
	Definição do problema.	• Medida de desempenhos
	Estimativa de Recursos	• Fronteiras do sistema
	Tempo, custos, pessoal, gerenciamento.	• Plano do projeto preliminar
Modelagem	Análise de Sistema e Dados	
	Construção do Modelo	
	Abstração do sistema em relacionamentos matemáticos.	
	Aquisição de Dados	
Verificação/Validação	Identificação, especificação e coleta de dados.	
	Tradução do Modelo	
	Preparação e depuração do modelo para processamento computacional.	
	Verificação	
Aplicação	Processo de estabelecer que o programa execute conforme pretendido.	
	Validação	
	Estabelecimento de nível de acuracidade entre o modelo e o sistema real.	
	Experimentação	
	Execução do modelo para obter produtos.	
	Análise	
	Análise de resultados da experimentação, traçado de inferências e recomendações para a solução do problema.	
	Implementação/Documentação	
	Processo de implementação das decisões resultantes da simulação e documentação do modelo e seu uso.	

Fonte: Pooch e Wall (1993, p.7).

2.4.1 Método baseado em modelagem hidrodinâmica – o modelo HEC-RAS

Os modelos hidrodinâmicos são os mais utilizados para a simulação de eventos de inundações (LIZ, 2018). Estes modelos têm se mostrado eficazes em diversos projetos, tais como modelagem de inundação glacial (ANACONA et al., 2015), projeto de restauração de rio (DEVRIES; ALDRICH, 2015), análise de padrões de chuva (DANTAS, 2012) e análise de áreas sujeitas a inundação (BOBOC et al., 2012; BUTT; UMAR; QAMAR, 2013; HASANI, 2013; MALIK, AHMAD, 2014; ABDELBASSET et al., 2015; SILVA, 2016; LIZ, 2018).

Esses modelos aplicam um conjunto de equações que realizam simulações numéricas de propagação da água nos canais e planícies, podendo ser mais ou menos complexos matematicamente (TENG et al, 2017). Os modelos matemáticos utilizados para representar os fenômenos envolvidos podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais (NOBRE et al., 2016), os quais determinam as cotas e as áreas inundadas (MOTE et al., 2016).

O cálculo das vazões simuladas pelo modelo unidimensional é baseado nas Equações de Saint Venant, também conhecidas como equação de conservação da energia e equação de momento (CUNGE et al., 1980). Esta equação é obtida a partir dos princípios da conservação da massa e da quantidade de movimento, na sua versão unidimensional (NEGRÃO, 2015), seguindo as hipóteses: (1) distribuição de pressão hidrostática; (2) inclinação média do canal suave, podendo-se considerar que a medição vertical da profundidade é equivalente à medição perpendicular; (3) velocidade uniformemente distribuída pelo canal, ou seja, a velocidade e o nível variam apenas na direção longitudinal do canal; (4) canal prismático; (5) fluxo homogêneo e incompressível (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; CHAUDHRY, 1993).

Basicamente, existem três tipos de simulação disponíveis: regime permanente, regime transiente e regime misto (MONTE et al., 2015). Independente da metodologia utilizada para o cálculo da vazão, a perda de carga no sistema é calculada através da equação de Manning (USACE, 2016).

A seção transversal de escoamento considera uma seção composta, tendo o canal definido pelos dados topográficos interpolados por meio da criação de um modelo digital de terreno, e delimitado pelas alturas calculadas no sistema (REIS; SCHIMIDT, 2017).

Os modelos hidráulicos 1D podem reproduzir com precisão a propagação de cheias e inundações em rios com planícies de inundação e são mais atrativos do que os modelos 2D devido ao menor tempo de processamento dos dados e menor número de variáveis envolvidas (HORRITT; BATES, 2002; LIN et al., 2005). A aplicação de modelos hidrodinâmicos 2D ao sistema rio-planície pode trazer resultados não satisfatórios devido à complexidade da

topografia da planície e profundidades muito rasas (BATES et al., 2005; BATES; DE ROO, 2000).

Nas últimas décadas, a modelagem numérica de eventos de inundações aumentou, em grande parte, devido aos avanços computacionais e dos programas de simulação. O programa HEC-RAS, *Hydrological Engineering Center River Analysis System* (USACE, 2016), é um modelo de simulação hidrodinâmica largamente utilizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency ou USEPA), desde o ano de seu lançamento, em 1997 (MOYA QUIROGA et al., 2016). Este modelo é mundialmente empregado devido a sua acurácia, por ser de acesso livre, com vasta documentação (SILVA; 2015) e por utilizar métodos de roteamento de fluxo baseados em princípios de continuidade e momento, que são familiares para os engenheiros (SHARKEY, 2014).

Modelos hidrodinâmicos como o HEC-RAS representam uma simplificação do complexo sistema hidrológico-hidráulico que envolve um curso d'água (SILVA, 2016), o que permite sua aplicação para estimar áreas inundáveis e gerar mapas de zonas suscetíveis a inundações (SAVAGE et al., 2014). Sua aplicação exige conhecimento detalhado da geometria dos canais pluviais e de parâmetros físicos que interferem no escoamento como linhas de centro, fluxo e seção transversal (REIS, 2015). Além disso, as simplificações das equações hidrodinâmicas de Saint-Venant admitem suposições que ignoram a variação de parâmetros associados ao terreno e ao escoamento (JUSTINO, 2019).

O sistema é composto por uma interface gráfica de usuário que contém quatro componentes de análise hidráulica unidimensional: (1) modelagem de perfil de superfície de água para regime de escoamento permanente; (2) modelagem de escoamento não permanente; (3) modelagem de transporte de sedimentos e fundo móvel e (4) modelagem de qualidade da água. Os dados necessários para a modelagem são divididos nas seguintes categorias:

- Dados geométricos (*Geometric Data*);
- Dados de escoamento permanente (*Steady Flow Data*);
- Dados de escoamento não permanente (*Unsteady Flow Data*);
- Dados de sedimentos (*Sediment Data*);
- Dados de qualidade da água (*Water Quality Data*).

Os dados geométricos são necessários para qualquer uma das análises realizadas com o HEC-RAS e as outras funcionalidades são atribuídas a estudos específicos (GONÇALCES, 2017).

O uso desta categoria de modelos requer uma série de dados de entrada e alta capacidade de processamento computacional, o que dificulta sua utilização (NOBRE et al., 2016). Outro aspecto que deve ser considerado é o limite de sua aplicação, ligado ao pouco conhecimento sobre a natureza e a qualidade dos dados de entrada (MONTEIRO; KOBIYAMA; ZAMBRANO, 2015).

A ausência de dados sobre inundações tem impedido a aplicação em larga escala dos modelos hidrodinâmicos existentes, para elaboração de mapas de inundações (GODBOUT, 2018). Embora exista uma alta demanda mundial, mapas de inundações de alta resolução estão disponíveis para apenas uma pequena parcela das regiões inundáveis globalmente (WARD et al., 2013).

Uma alternativa ao uso de modelos hidrodinâmicos tradicionais, para mapeamento de inundações, é o uso de descritores de terrenos. Esses descritores, por sua vez, utilizam atributos geomorfológicos extraídos de um modelo digital de terreno que possuem correlação espacial com áreas inundáveis dentro da paisagem hidrológica. Como há uma maior disponibilidade geral de dados topográficos, estas ferramentas estão sendo cada vez mais utilizadas (GOERL et al., 2017).

2.4.1.1 Equações governantes

O modelo unidimensional do HEC-RAS utiliza equações simplificadas de Saint-Venant (Equação 1 e 2) para descrever a continuidade e o momento do movimento da água (FERREIRA; FERNANDES; KAVISKI, 2016). Considera que a altura e a velocidade da água variem apenas longitudinalmente, assim, assume-se que a velocidade é uniforme e que a superfície da água seja horizontal para qualquer seção transversal (NOBRE, 2015).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (S_0 - S_f) \quad (2)$$

Em que:

A: área da seção transversal (m²);

Q: vazão (m³s⁻¹);

ql: vazão de contribuição lateral (m^2s^{-1});

t: tempo (s);

x: distância longitudinal (m);

g: aceleração da gravidade (ms^{-2});

S_0 : declividade do fundo do rio (mm^{-1});

S_f : declividade da linha de energia (mm^{-1}), equivalente ao termo de perda de carga unitária por atrito;

h: profundidade da linha d'água (m).

Nessa equação, os dois primeiros termos representam a inércia do escoamento; o terceiro termo, a força de pressão e, no lado direito da equação, o primeiro termo representa a gravidade e o último termo a força de atrito (COUTINHO, 2015).

O termo S_f é expresso pela equação de Manning, ou seja:

$$S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R_h^{4/3}} \quad (3)$$

Em que:

n: coeficiente de rugosidade de Manning;

R_h : Raio hidráulico (m).

O sistema de equações de Saint-Venant é um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, em que não existe uma solução analítica. Para isso é necessária a utilização de técnicas numéricas para a resolução das equações (SANTOS, 2013). A técnica numérica mais utilizada é o método das diferenças finitas e pode ser usado em esquemas explícitos ou implícitos, dependendo da forma como representam as diferenciais das variáveis no espaço e no tempo (CUNGE et al., 1980).

Os esquemas explícitos representam as derivadas no espaço utilizando valores das variáveis já conhecidos do instante de tempo atual (PAIVA; COLLISCHONN; BRAVO, 2011). Os esquemas implícitos conduzem a equações algébricas menos simples, nas quais as incógnitas não podem ser escritas exclusivamente em função de valores conhecidos (BAPTISTA et al., 2003)

O modelo HEC-RAS utiliza o esquema implícito desenvolvido por Preissmann (1961). A configuração gráfica, com dupla ponderação, no tempo e no espaço, do esquema generalizado

pode ser vista na Figura 7, onde a variável dependente f é avaliada no ponto de coordenadas $(\psi\Delta x, \theta\Delta t)$, sendo $0 \leq \psi \leq 1$ e $0 \leq \theta \leq 1$.

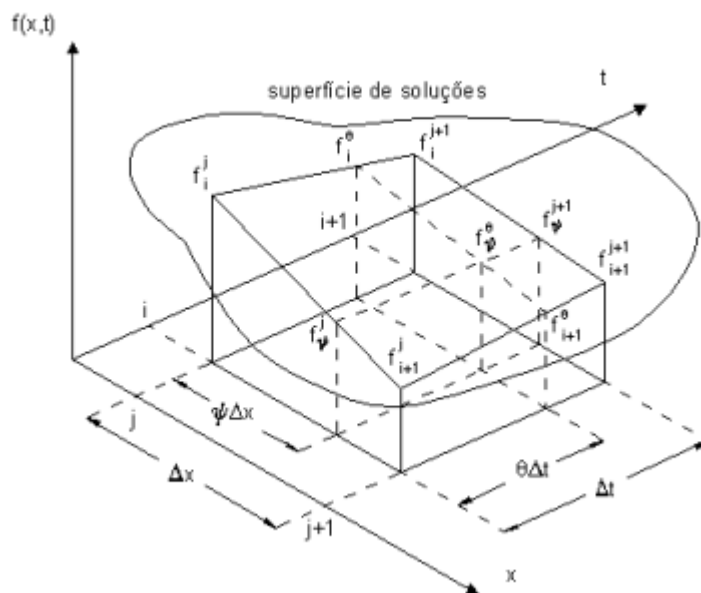


Figura 7 - Configuração gráfica tridimensional do esquema generalizado de Preissmann.
Fonte: Baptista et al. (2003).

A lei de resistência aplicada pelo HEC-RAS é a equação de Manning Strickler e a seção transversal de escoamento considera uma seção composta, tendo o canal definido pelos dados topográficos interpolados por meio da criação de um modelo digital de terreno e delimitado pelas alturas calculadas no sistema (FERNANDEZ; MOURATO; MOREIRA, 2013).

As informações inerentes às condições de contorno e fluxos são definidas no próprio programa, no qual os parâmetros de declividade, escoamento, profundidade e vazão de projeto são inseridos de acordo com cada situação (REIS, 2015). As camadas de informações criadas são editadas e definidos os limites de cada item de análise necessários para a delimitação de áreas inundáveis (USACE, 2016).

2.4.2 Modelo Height Above the Nearest Drainage – HAND

Diversos modelos que visam prever a distribuição espacial do nível de hidromorfia na paisagem são baseados em modelos digitais do terreno (CURMI et al., 1998).

O modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) foi desenvolvido por Rennó et al. (2008), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e já foi utilizado, entre outras aplicações, para a delimitação de áreas suscetíveis a inundações (NOBRE et al., 2016). Antes deste modelo, tinham-se apenas formulações hidrodinâmicas para representar extravasamento de canais, que devido as parametrizações de difíceis obtenções, a aplicação se restringia a experimentos localizados (SBPC, 2012; JALAYER et al., 2014).

O HAND apresenta um método barato e simples (SANTOS, 2015) e tem sido usado no mapeamento da condição hidrológica estacionária do terreno e também no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação (MOMO et al., 2016). O mapeamento é baseado em características morfológicas do terreno, extraídas de modelos digitais de terrenos, e constituem-se em uma alternativa de baixo custo e pouca complexidade associada (NOMAN; NELSON; ZUNDEL, 2001).

O modelo é um descritor de terreno que calcula a diferença de elevação entre os pixels de um MDT e o pixel relativo ao ponto de drenagem mais próximo a estes. O produto gerado, ao aplicar o modelo, é uma versão normalizada do MDT em relação à rede de canais (RENNÓ et al., 2008, NOBRE et al., 2011).

O MDT normalizado pode ser utilizado para avaliar a estrutura hidrológica da paisagem. As zonas inundáveis, do ponto de vista hidrológico, são definidas como áreas que, devido à profundidade rasa do lençol freático, possuem baixa capacidade de infiltração e, portanto, apresentam respostas rápidas à precipitação, independentemente de sua localização na unidade hidrológica da paisagem (GHARARI et al., 2011). Em termos ecológicos clássicos, essa unidade da paisagem se refere a locais onde a saturação com água é um fator dominante que influencia as espécies animais e vegetais dessa área (COWARDIN et al., 1979).

A estrutura hidrológica da paisagem pode ser decomposta em classes, de acordo com as distâncias verticais relativas aos cursos d'água mais próximos, sendo que, quanto menor a distância, maior a suscetibilidade a inundação. Isto porque o modelo classifica as células de acordo com seus potenciais de drenagem, o que permite o agrupamento em classes equipotenciais, definindo ambientes ou unidades hidrológicas da paisagem semelhantes (RENNÓ et al., 2008). As superfícies moldadas no modelo HAND indicam uma topologia de potenciais de drenagem locais, possuindo um significado hidrológico e prático (NOBRE et al., 2011).

O contorno HAND de 1m indica que quando a linha d'água aumenta em 1 m a partir do canal, as águas da inundação atingirão e corresponderão aos 1 m. A profundidade da inundação é o inverso aritmético da altura HAND, assim um mapa hipsométrico do contorno

HAND pode simultaneamente prever a extensão e a profundidade da inundação (NOBRE et al., 2015).

Os primeiros experimentos para definir os limites de classes foram realizados por RENNÓ et al. (2008) (Figura 8) e compreendem: até 5,3m para zonas inundáveis e 5,3m a 15m para ecótonos. Desníveis acima de 15, associados a declividades maiores ou iguais a 7,6% são classificadas como encostas e de 15m com declividade associada menor que 7,6% como platôs.

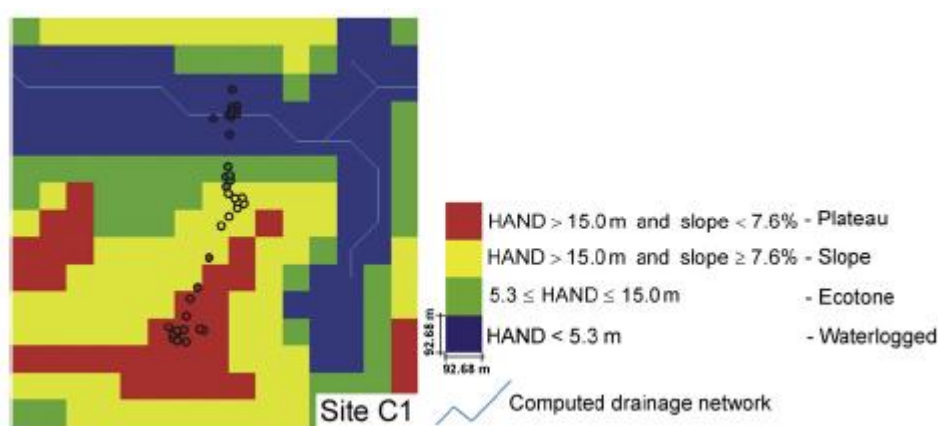


Figura 8 - Classes HAND.

Fonte: Rennó et al. (2008).

Estas classes definem diferentes padrões na estrutura da paisagem. Os ecótonos representam uma zona de tensão entre dois ecossistemas diferentes (CLEMENTS, 1905), apresentando características físicas e químicas específicas que interferem nas propriedades biológicas, fluxo de energia e ciclos de materiais, definidos pelas suas escalas de tempo, espaço e magnitudes de interações (MILAN; MORO, 2016). As encostas são áreas que conectam paisagens côncavas e convexas (CHORLEY; SCHUMM; SUGDEN, 1984) e os platôs são unidades de paisagem planas ou onduladas relativamente altas acima dos córregos (GHARARI et al., 2011), com nível de água subterrânea profundo (SAVENIJE, 2010).

Pequenas modificações foram realizadas na classificação de Rennó. Silva (2013) determinou quatro classes HAND, zonas inundáveis (até 5 m), ecótono (5 - 15m), encostas (15 - 50m) e topos de morro (> 50m). Goerl; Michel; Kobiyama, (2017) definiram um limiar até 5,5 m para identificação de zonas inundáveis.

As áreas atingidas pela inundação situam-se em áreas planas, adjacentes aos cursos d'água, as quais possuem pouca diferença de altitude com o curso d'água mais próximo. Ajustes na classe que define as zonas de inundação podem ser realizados com base no registro de histórico de inundações da paisagem hidrológica (NOBRE et al., 2015).

Desde que foi inicialmente proposto em 2008, o modelo HAND já foi aplicado para a classificação hidrológica da paisagem (GHARARI et al., 2011), para mapeamento e análise espacial de algumas características hidrológicas dos solos (NOBRE et al., 2011), mapeamento de áreas suscetíveis a inundação (SILVA et al., 2013; SANTOS, 2015; MOMO et al., 2016; NOBRE et al., 2016; GOERL; MICHEL; KOBİYAMA, 2017), zona de risco de deslizamento (NOBRE et al., 2011) e suporte para as discussões sobre as alterações do Código Florestal ao apontar com mais precisão, quais áreas devem ser protegidas ou recomendar uso e ocupação da terra adequado (SILVA et al., 2012).

A diversidade de aplicações com base no modelo HAND deve crescer ainda mais, visto que a demanda por conhecimento de propriedades hidrológicas em terrenos é cada vez maior no planejamento do espaço urbano (NOBRE et al., 2011).

O resultado da simulação do HAND é estreitamente relacionado com a qualidade (resolução espacial) do dado topográfico (MOMO et al., 2015), quanto melhor a resolução, maior o detalhe da topografia local, representando com maior grau de fidelidade a realidade.

Estudos que utilizaram MDT de alta resolução espacial para a identificação de áreas sujeitas a inundação apresentaram resultados satisfatórios (MOMO et al., 2015; NOBRE et al., 2015; SANTOS, 2015), semelhantes a modelos hidrodinâmicos que requerem uma grande quantidade de dados de entrada.

Assim, o modelo pode ser utilizado para a determinação de áreas suscetíveis a inundação no estado de Santa Catarina, onde os municípios têm levantamentos planialtimétricos obtidos com imagens aerofotogramétricas de alta resolução (MOMO et al., 2015).

2.4.3 O método do índice topográfico de umidade

2.4.3.1 Conceituação

O ITU é um parâmetro hidrogeomorfológico distribuído desenvolvido por Beven e Kirkby (1979), o qual ilustra de forma representativa a potencialidade de armazenamento de água em uma unidade de paisagem. O conceito foi testado no modelo hidrológico TOPMODEL, que é um modelo chuva-vazão semi-distribuído baseado na área variável de contribuição e em princípios físicos de conservação de massa (SILVA; VESTENA; KOBİYAMA, 2007) para indicar os locais que se tem uma maior suscetibilidade de ocorrência do escoamento superficial por saturação (LOEWEN; PINHEIRO, 2017).

Derivado a partir da topografia da bacia, o índice considera a área de contribuição e a declividade para indicar os locais com potencial para acúmulo de água (NOURANI et al., 2011). A área de contribuição específica está relacionada com o conceito de escoamento acumulado e leva em conta a complexidade da encosta, ou seja, a tendência de um local para receber a água superficial (CAPOANE et al., 2015). A declividade é um parâmetro que descreve a tendência de saída de água (GRUBER; PECKHAM, 2008).

A determinação do ITU é realizada por meio da Equação 4 (KIRKBY, 1975), a qual considera as características morfológicas quantitativas da unidade de paisagem derivadas do MDT. Dessa forma, o índice quantifica a umidade do solo pelos parâmetros topográficos da área acumulada e da declividade.

$$ITU_i = \ln \frac{Ac_i}{\tan \beta_i} \quad (4)$$

Em que:

ITU_i : ITU da *i*-ésima célula do MDT;

Ac_i : área de contribuição a montante da *i*-ésima célula do MDT por unidade de comprimento do contorno;

$\tan \beta_i$: declividade local da *i*-ésima célula do MDT.

A Equação 4 representa o comportamento hidrológico da bacia, especialmente da dinâmica das áreas de contribuição, descrevendo o balanço entre a água recebida por uma posição do terreno e a água escoada (BRESSIANI, SCHMIDT; PEREIRA, 2016). Valores altos de ITU são esperados principalmente em áreas próximas ao canal de drenagem porque a variável Ac depende da profundidade do lençol freático, que nas proximidades do canal de drenagem está perto da superfície (BEVEN; KIRKBY, 1979).

O ITU está sujeito a seguinte restrição: $0^\circ < \beta < 90^\circ$. Quando os valores de declividade são próximos a 0° , a bacia poderá apresentar um valor alto de ITU, quando o relevo plano estiver associado com uma grande área de contribuição a montante. Elevadas declividades e pequenas áreas de contribuição, condicionam a ocorrência de valores baixos de ITU (LOPES, 2012).

A Figura 9 ilustra os principais componentes usados para o cálculo do ITU em um dado ponto O dentro da área de estudo, em que A representa a bacia de captação para o ponto O e L o comprimento da linha de contorno. O comprimento de contorno é dependente da direção

de fluxo e do tamanho da célula, sendo assim, a resolução espacial adotada desempenha influência sobre os resultados obtidos do processamento de dados. No caso das direções cartesianas, o comprimento de contorno equivale à uma aresta da grade do MDT. Nas direções diagonais, esse valor é obtido através da relação trigonométrica entre catetos e hipotenusa de um triângulo retângulo (SÁ, 2014).

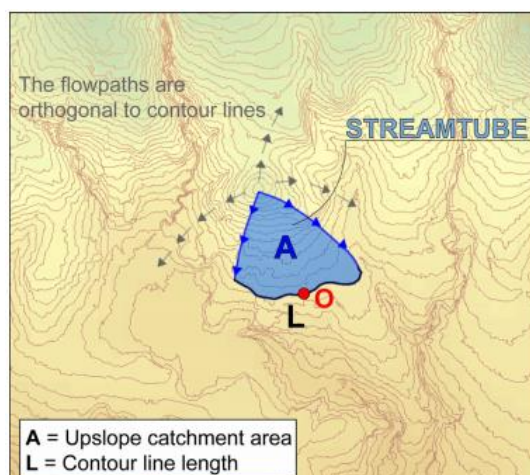


Figura 9 - Componentes para o cálculo do ITU.

Fonte: Jalayer et al. (2014).

O escoamento superficial é influenciado pela topografia da unidade da paisagem, em locais com alta umidade no solo, qualquer precipitação se tornará escoamento superficial, pelo processo de saturação do solo (TARBOTON, 2003), logo, quanto maior o valor de ITU, maior a propensão em atingir o estágio de saturação e apresentar um maior índice de umidade no solo (LOPES, 2012).

Áreas saturadas ocorrem em porções da encosta com grandes áreas de contribuição e baixas declividades, em virtude da acumulação dos fluxos subsuperficiais devido à limitada capacidade de transmissividade do solo (LIMA, 1995). A Figura 10 representa o balanço hídrico realizado para uma encosta hipotética na paisagem hidrológica, onde a precipitação (p) incide em um determinado bloco da encosta de área A e profundidade do solo D . A posição do aquífero raso é paralela a declividade do bloco (β). Assim, uma porção da precipitação (R) infiltra e atinge o nível freático. O fluxo subsuperficial gera o escoamento subsuperficial (q_b) que se movimenta pelo solo no sentido de jusante. O escoamento superficial (q_s) irá ocorrer em virtude da precipitação incidente nas áreas saturadas de áreas (A_s) e devido à ressurgência do nível freático via escoamento de retorno ou escoamento superficial por saturação.

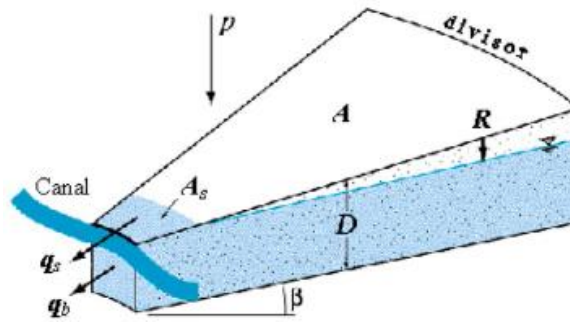


Figura 10 - Balanço hídrico de uma encosta hipotética.

Fonte: Hornberger et al. (1998).

O escoamento ao longo da rede de drenagem se propaga a partir de uma função distância-área (VESTENA, 2008), ou seja, a partir de uma organização das áreas de drenagem em função de sua distância ao exutório da paisagem hidrológica (BEVEN; KIRKBY, 1979). Esta função representa as características da estrutura da paisagem hidrológica e pode ser interpretada para mostrar o comportamento da mesma em eventos de máxima (SILVA; KOBIYAMA, 2007).

O ITU da *i*-ésima célula do MDT é obtido com auxílio do algoritmo de múltipla direção de fluxo desenvolvido por Quinn et al. (1991). Um número indicativo de uma das oito direções de fluxo possíveis é atribuído a cada pixel, como ilustrado na Figura 11.

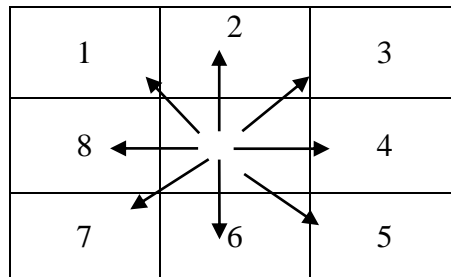


Figura 11 - Direções possíveis de uma célula.

Fonte: Adaptado de Sá (2014).

O passo da área a ser acumulada para a próxima célula *i*, na direção *k* é obtido pela Equação 5. A Figura 12 mostra um exemplo de cálculo.

$$P_{i,k} = \epsilon_{i,k} c l_k \tan \left(\frac{e_l - e_j}{d_{ik}} \right) \quad (5)$$

Em que:

$P_{i,k}$: peso de área a ser acumulada para a próxima célula;

$\epsilon_{i,k}$: peso para o comprimento de contorno na direção *k*;

cl_k : comprimento de contorno na direção k ;

el_t : cota da célula atual;

el_j : cota de célula vizinha;

di_k : distância do escoamento entre as células.

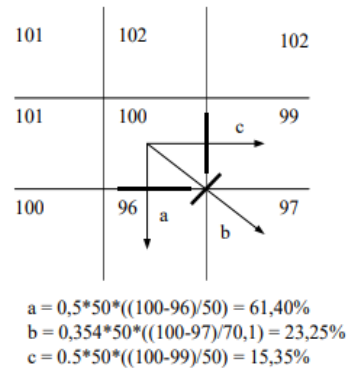


Figura 12 - Direções múltiplas de escoamento para resolução de 50 metros.

Fonte: Silva, Vestena e Kobiyama, (2007).

2.4.3.2 ITU como indicador de áreas propensas a inundação

O zoneamento de áreas sujeitas a alagamentos ou inundações pode ser realizado a partir do diagrama de frequências do ITU, a exemplo dos modelos hidrológicos que as utilizam para determinar os escoamentos de água na paisagem hidrológica.

As frequências de ITUs de uma determinada paisagem hidrológica é um parâmetro que representam a propensão de saturação do solo (BEVEN et al., 1984). Contudo, o diagrama também pode ser um indicador da estrutura da paisagem (Figura 13).

Os menores valores de ITU estão associados a presença de encostas íngremes na paisagem, enquanto os valores mais altos são indicativos de locais planos com grande área contribuinte, como o caso de zonas urbanas inundáveis.

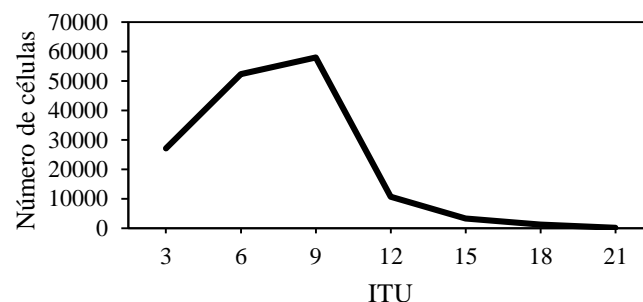


Figura 13 - Distribuição de frequência do ITU na área de estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

As células que apresentam um mesmo valor de ITU são hidrologicamente similares (SCHULER et al., 2000), sendo que, quanto maior o valor do índice, maior o potencial de acúmulo de água, devido a associação de relevos planos com grande área contribuinte (SEIFERT, 2012). Os menores valores estão relacionados a locais onde a área de contribuição é relativamente pequena e a declividade é alta, tendo como tendência a geração de pouco escoamento superficial (KULASOVA et al., 2014).

As frequências dos ITUs de uma bacia tendem a serem afetadas pela resolução espacial do MDT (SILVA; VESTENA; KOBIYAMA, 2007; FERREIRA, 2004). O efeito da resolução pode ser separado em dois componentes (WOLOCK; MCCABE, 2000): efeito de discretização e efeito de suavização. O efeito de discretização ocorre quando o número de células que divide a superfície afeta o algoritmo que calcula as características topográficas. O efeito de suavização ocorre nas resoluções mais grosseiras do MDT, cuja principal consequência é a perda de detalhes ou informação.

Os ITUs tendem a aumentar na medida em que se aumenta a grade (diminui a resolução espacial) do MDT. Isto pode estar associado ao grau de suavização que se impõe ao MDT com células maiores, como consequência da generalização cartográfica que ocorre. Wolock e McCabe (2000) demonstraram que a alteração da resolução do MDT provoca efeitos expressivos no ITU, ao estudarem 50 MDTs distribuídos nos Estados Unidos da América, em duas resoluções (100m e 1000m).

Algumas pesquisas avaliaram a distribuição do ITU para diferentes resoluções do MDT (PAN; KING, 2012, SÁ, 2014). A resolução a ser adotada deve ser de, no máximo, 50m para que represente as características geomorfológicas da área (BEVEN et al., 1995).

2.4.3.3 ITU para mapeamento de zonas inundáveis

Alguns fatores morfológicos na paisagem hidrológica, e suas relações, influenciam os escoamentos, com efeitos nas inundações provocadas por enchentes. O relevo demonstra uma considerável atuação no movimento de água tanto em superfície, quanto no subsolo, sendo o elemento de maior importância na paisagem para o controle de fluxo d'água (DUNNE, 1978; BEVEN; KIRBY, 1979). Logo, para a compreensão dos fenômenos hidrológicos, as características do relevo devem ser consideradas (WAGENER et al. 2010).

A magnitude dos picos de enchentes depende do volume de água captado e que se converte em escoamento superficial. A velocidade deste escoamento apresenta relação direta

com a declividade (OLSZEWSKI et al., 2011). Locais com ITUs altos tendem, portanto, a apresentarem baixas velocidades de escoamento superficial, em função da baixa declividade. Os locais situados próximos aos cursos d'água tendem a acumular água também em virtude de possuírem áreas de captações significativas, em relação àquelas situadas em topos de morros e que também apresentam altos valores de ITU.

O uso de MDT para extração e análise de parâmetros hidrológicos e geomorfológicos não é recente e. g. Beven; Kirkby, (1979), Moore et al., (1991). Alguns métodos simples que dependem de características morfológicas da bacia e. g., Nardi; Vivoni; Grimaldi, (2006); Rennó et al., (2008); Manfreda et al., (2011, 2014); Degiorgis et al., (2012); Jalayer et al., (2014); são utilizados para identificar os processos hidrológicos que atuam sobre a mesma.

A maior disponibilidade tecnológica para coleta de dados topográficos auxilia no detalhamento da superfície e elaboração de modelos digitais de terreno de alta resolução espacial (MANFREDA; LEO; SOLE, 2011). A representação detalhada do relevo que era uma das lacunas para o mapeamento de áreas propensas à inundação, vem sendo suprida, visto que os dados topográficos e a representação acurada do relevo são um dos fatores mais importantes ao se determinar a altura e extensão da inundação (FEMA, 2009).

O uso de descritores de terreno para o mapeamento de áreas inundáveis tem aumentado na Europa (NARDI et al., 2013, MANFREDA et al., 2014, POURALLI et al., 2014) e também no Brasil (NOBRE et al., 2015, SPECKHANN, 2018).

Dadas as características do ITU, que apresenta forte correlação com áreas onde a água decorrente da precipitação tende a se acumular (BEVEN; KIRKBY, 1979; WESTERN et al., 2002), é provável que seja também um indicativo das áreas sujeitas à inundação (JALAYER et al., 2014).

Uma limitação desse mapeamento se refere ao ITU não considerar em sua formulação informações sobre o uso e ocupação da terra e tipologia dos solos, por exemplo, os quais interferem em um maior ou menor grau de suscetibilidade a inundação. Sabendo que a evapotranspiração é a principal fonte de retirada de água do sistema (HEWLETT, 1982), uma das possibilidades a ser estudada decorre da incorporação de parâmetros de evapotranspiração, na forma de cálculo do ITU (SILVA, 2012).

Manfreda et al., (2008) investigou os atributos topográficos do terreno e observou uma forte correlação entre o ITU e as áreas sujeitas a inundações. Em particular, os autores observaram que uma maior propensão a inundações é geralmente caracterizada por alta convergência topográfica, onde a declividade é baixa e a área de contribuição específica é alta (alto ITU). As zonas da paisagem com estas características tendem à saturação do solo

(MAGANHOTTO et al., 2013). Alguns modelos hidrológicos exploram este pressuposto para estimar o escoamento superficial em bacias hidrográficas (MARTHEWS et al., 2015, VESTENA et al., 2013).

O mapeamento de zonas da paisagem hidrológica sujeitas a inundações dependem de uma classificação adequada da matriz de valores que define a distribuição espacial do ITU e, por conseguinte, a sua frequência. Não há critérios que auxiliem na determinação do valor limite para o índice, o que dificulta o enquadramento dessas zonas (QIU, 2009; MANFREDI; LEO; SOLE, 2011). Sendo assim, tem-se uma subjetividade quanto a adoção de limites de classes, variando de acordo com princípios estabelecidos para cada pesquisador, de acordo com a aplicação.

Assim como a classificação do modelo HAND, a definição das classes de ITU pode ser realizada tendo como base o conhecimento do registro histórico de inundações e por meio de visitas a campo, em que as informações coletadas a respeito da ocorrência ou não da inundação são submetidas a métodos estatísticos que permitem uma classificação consistente dos valores.

A determinação de um valor limite de ITU para uma determinada região auxilia na identificação de áreas com maior suscetibilidade a inundações. Esse processo contribui para a gestão de desastres naturais de ordem hidrológica e planejamento urbano de municípios afetados periodicamente com inundações.

Os limites de classes dependem da resolução do MDT, da estrutura hidrológica da paisagem e da aplicação. Chagas (2006) identificou, para os solos bem drenados, limites variando de 4 a 5, para indicar platôs e de 5 a 10, para indicar solos mal drenados, com caráter hidromórfico.

Muitas pesquisas já foram desenvolvidas com o ITU para determinar a ocorrência de zonas inundáveis, a partir das características pedológicas de bacias hidrográficas (SEIFERT, 2012). Mérot et al. (1995) encontraram uma boa relação entre altos valores de ITU e as áreas mais úmidas de uma bacia hidrográfica. Rodhe e Seibert (1999) verificaram que o ITU é um indicador coerente de regiões úmidas na bacia de Kassjöån, onde o relevo é descrito como moderadamente acidentado com diferenças altimétricas menores do que 150m e com vertentes possuindo comprimentos de rampa entre 500m a 2000m.

O mapeamento do ITU pode ser validado com informações coletadas a campo. A população pode contribuir na elaboração dos mapas de inundações, sendo suas memórias um importante subsídio para validar as características dos eventos, como a extensão das áreas atingidas (MEYER et al., 2012).

Os estudos que envolvem os mapeamentos de áreas sujeitas a inundações são de fundamental importância, principalmente no que se refere a execução de planejamentos urbanos (ZACHARIAS; GUERRA, 2015) que visem o ordenamento do território e caracterizam as áreas não edificáveis, com restrição a edificação e aquelas propícias a instalações urbanas (MAKRAKIS, 2017; GOERL; KOBİYAMA; PELERIM, 2012).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Geografia

O município de Lages localiza-se na região serrana do estado de Santa Catarina, situando-se a 27°49'00" de latitude sul e 50°19'35" de longitude oeste. O município é o maior estado de Santa Catarina, em extensão territorial, com área total de 2.651,4 km² (PML, 2020) e população estimada em 157.544 habitantes (IBGE, 2010). A área de estudo corresponde as sub-bacias do rio Carahá e do rio Ponte Grande e a inter-bacia Entre Rios (Tabela 3 e Figura 14), representativas da área urbana do município de Lages.

Tabela 3 - Parâmetros correspondentes a área de estudo.

Ordenamento da montante para jusante	Sub-bacias	Área (km²)	Perímetro (km)	Fator de forma (Kf)	Densidade de drenagem (Dd)	Compacidade (kc)
1	Ponte Grande	27,15	40,7	0,32	1,47	2,19
2	Entre Rios	3,58	12,47	0,66	4,08	1,84
3	Carahá	30,16	37,07	0,69	1,57	1,89

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os parâmetros morfométricos indicam uma tendência natural de formação de enchentes nas três regiões de interesse, sendo que destas, a inter-bacia Entre Rios possui a maior probabilidade de ocorrência de cheias, em função de possuir topografia acidentada e formato arredondado.

Na Figura 14 pode-se observar um dos elementos da estrutura hidrológica da paisagem, a planície topográfica de inundação do município de Lages (NETO, 2019a) ², produzida no âmbito do projeto Hidro-Lages. A identificação de pequenas planícies não esteve dentro do escopo do projeto, por isso a mesma não foi referência para o presente estudo.

Os processos hidrológicos e hidrodinâmicos do rio Caveiras produziram a planície de inundação a qual delimita a área de perigo em que os objetos nela inseridos estão sujeitos a diferentes riscos e apresentam diferentes graus de vulnerabilidade. A planície de inundação se

² O polígono de alagamento foi determinado por pontos amostrais tendo como base o evento de inundação ocorrido em 2017. A localização dos pontos foi obtida por meio de posicionamento por GNSS, com equipamento Topcon GR-3.

inicia no rio Caveiras, próximo à divisa com o município de Paineira e termina no mesmo rio, próximo à divisa com o município de Capão Alto. Esta planície é do tipo aluvial, ou seja, resulta do depósito de sedimentos não consolidados (aluviões), sujeitos a inundações periódicas (NETO, 2019a).

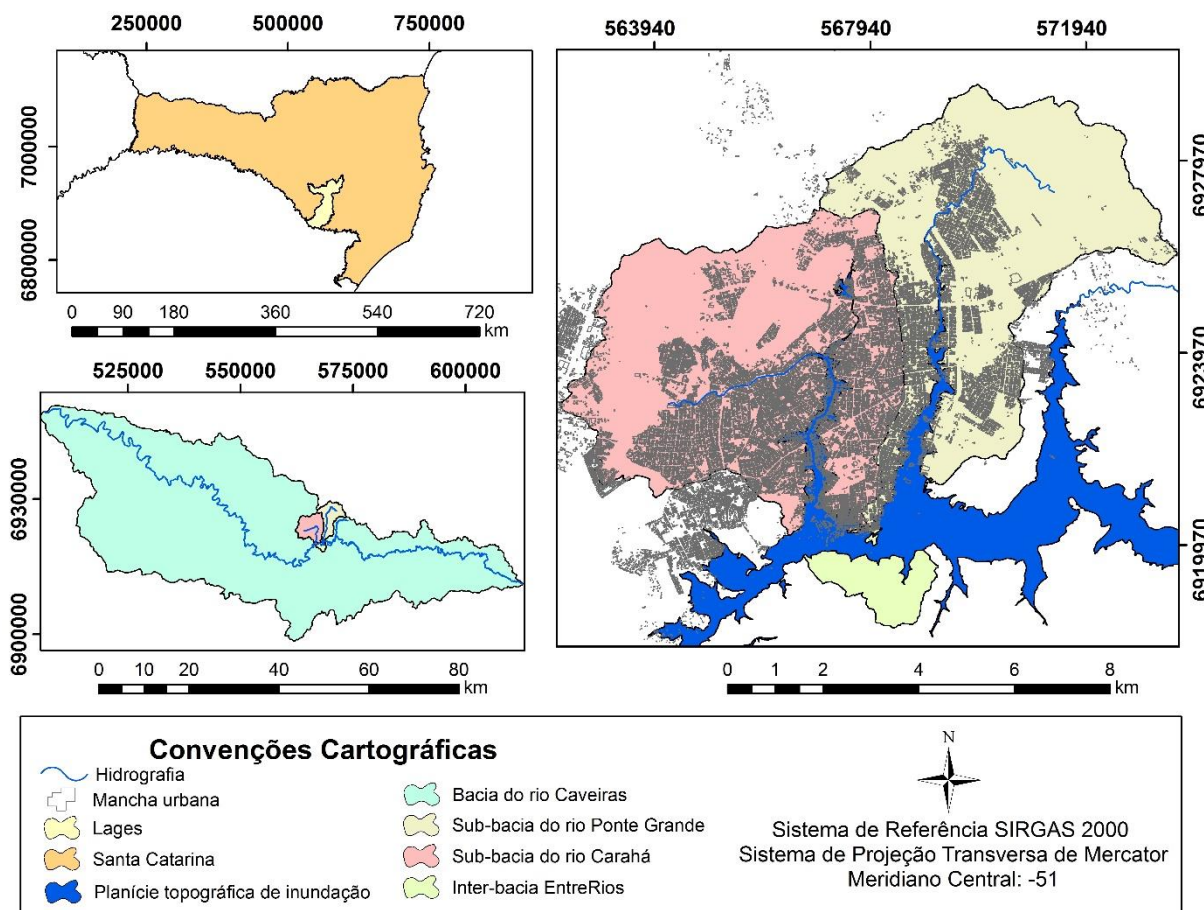


Figura 14 – Localização da área de estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O município de Lages ocupa a terceira posição em termos de frequência de inundações no estado, permanecendo atrás apenas dos municípios de Blumenau e Canoinhas (HERRMANN; KOBIYAMA; MARCELINO, 2014). Dentre os eventos de cheia já registrados no município, estão os anos de 2005, 2008, 2011, 2014 e 2017 em que houveram prejuízos sociais significativos (RAFAELI NETO et al., 2015).

Segundo o Relatório da Defesa Civil do Município de Lages (2014) a inundação do ano de 2014, ocorrida nos dias 26, 27 e 28 de junho, apresentou um índice pluviométrico superior a 70 mm nas primeiras 24 horas e acúmulo de 209 mm após as 72 horas seguintes, atingindo 47 (61% do total) bairros e deixando 149 pessoas desabrigadas.

O evento mais recente e o segundo mais extremo da série corresponde ao ano de 2017, que registrou um acúmulo de 122 mm de chuva e uma vazão máxima de $170 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nos dias 27 e 28 de maio. Nos dias 4 e 5 de junho foi registrado uma precipitação total de 163 mm e vazão máxima de $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Como consequência, 54 bairros do município foram atingidos, 7.420 pessoas foram afetadas e 406 destes desabrigados (Relatório da Defesa Civil do Município Lages, 2018).

3.1.2 Clima

Segundo a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo Cfb, ou seja, clima temperado úmido, sem estação seca definida e com verão fresco (ALVARES et al., 2014). A temperatura média anual para o município de Lages é de $15,7^\circ\text{C}$, com máximas registradas para os meses de janeiro e fevereiro e mínimos em junho (SCHIER et al., 2019). A precipitação anual média acumulada corresponde a 1.556 mm (WREGGE et al., 2011), sendo o período mais chuvoso concentrado nos meses de maio, junho, julho e agosto (SANTOS, 2010) e a umidade relativa média anual varia de 79 a 80% (WREGGE et al., 2011).

3.1.3 Vegetação

O estado de Santa Catarina apresenta três tipos de fitofisionomia: Floresta Ombrófila Mista - FOM, Floresta Ombrófila Densa - FOD e Floresta Estacional Decidual – FED (VIBRANS et al., 2013). Destes, a FOM é a fitofisionomia característica da região de estudo. A FOM é conhecida também como Floresta de Araucária devido a predominância da espécie *Araucaria angustifolia*, a qual ocupa o dossel das florestas e está presente na serra catarinense em altitudes superiores a 500 m, principalmente entre 800 e 1200 m (NETO, 2019b).

A Floresta de Araucária é frequentemente entrecortada por extensas áreas de pastagens nativas e em muitos casos, também existem campos limpos (espécies herbáceas das famílias *Gramineae*, *Cyperaceae*, *Compositae*, *Leguminosae* e *Verbenaceae*); campos sujos (arbustos com muita frequência, especialmente *Baccharis gaudichandiana*, *B. uncinella*, *Pteridium agilinum* e *Eryngium*); e campos de inundação (margens dos rios onde predominam gramíneas cespitosas do tipo *Hypogynium virgatum*, *Andropogon lateralis*, a *Leucostachyus* e a *Macrothryx*) (PADILHA, 2010).

3.1.4 Recursos hídricos

Lages localiza-se na bacia hidrográfica do rio Caveiras, com uma rede hidrográfica bem distribuída cujos principais rios que cortam o município são o Caveiras, Pelotas, Canoas, Lava-tudo, Vacas Gordas, Pelotinhas, Macacos e Pessegueiro (SANTOS, 2010). A hidrografia da área de estudo é composta pelo rio Caveiras, que abastece o município e seus afluentes, Carahá e Ponte Grande, os quais em épocas de cheia, atingem o nível máximo da calha do canal e transbordam para as áreas adjacentes, afetando inúmeras residências.

Com relação as águas subterrâneas, a área de estudo encontra-se no domínio Poroso e subdomínio Guarani (NETO, 2019). O Aquífero Guarani é constituído de rochas sedimentares, sendo o arenito Botucatu, devido a sua alta porosidade e permeabilidade, um ótimo reservatório de água (MAZZOLI; EHRHARDT-BROCARD, 2013). Zanatta e Coitinho (2002) afirmam que, no estado de Santa Catarina, o Aquífero Guarani distribui-se numa área de aproximadamente 49.200 km² e encontra-se recoberto, em quase toda sua extensão, por rochas da Formação Serra Geral, o que o torna pouco vulnerável à contaminação.

3.1.5 Relevo

A área de estudo está sob a unidade geomorfológica Planalto de Lages. Esta unidade caracteriza-se por um relevo de dissecação homogênea em forma de colina, esta homogeneidade só é quebrada pela presença de alguns morros e em alguns trechos, sua limitação é feita por escarpas (EMBRAPA, 2004). O relevo da região varia de suavemente ondulado a forte ondulado (OLIVEIRA; JACOMINE; NUNES, 1992), a associação do relevo ondulado e forte ondulado com a ocorrência de pedras reduz drasticamente a área aproveitável para a agricultura mecanizada intensiva (SANTOS, 2010; NETO, 2019).

3.1.6 Geologia

Lages está localizada sobre uma estrutura dômica pertencente à Bacia do Paraná (SCHEIBE, 1986). Esta formação é caracterizada por derrames basálticos e por arenitos da formação Botucatu (OLIVEIRA; JACOMINE; NUNES, 1992). Na área de estudo tem-se o afloramento de rochas argilosas de coloração vermelha, mais conhecidas como argilitos da Formação Rio do Rastro (NETO, 2019c), como pode ser observada na Figura 15. Esta formação apresenta-se intensamente fraturadas e falhadas, com a presença de falhas de empurrão com simetria radial e concêntrica (ROLDAN, 2010).

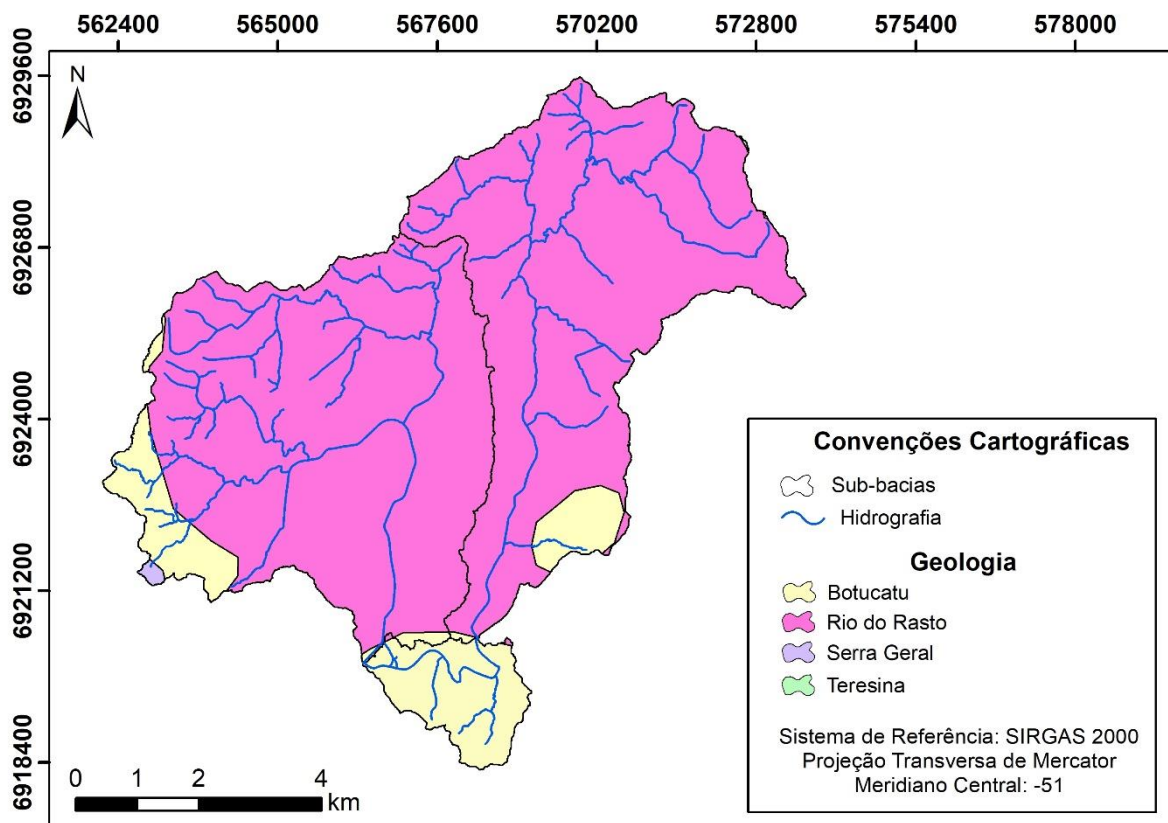


Figura 15- Geologia da área de estudo.

Fonte: Adaptado de EPAGRI-CIRAM (2004).

O Domo de Lages está condicionado, estruturalmente, ao levantamento de um grande bloco crustal limitado, ao norte, pelo alinhamento de Corupá e, ao sul, pelo do Rio Engano. No interior desse bloco, a maioria dos afloramentos se concentra segundo uma faixa de direção N 60° E (SCHEIBE, 1986).

3.1.7 Uso e ocupação da terra e tipo de solos

A classificação supervisionada de imagem Landsat-8 para o ano de 2017 (LIZ, 2018) indica que na área de estudo, tem-se a predominância de núcleo urbano (56,5%), seguido por campo (12,10%), solo exposto (10,78%), floresta nativa (8,67%), agricultura (7,11%), reflorestamento (3,4%) e corpos d'água (1,44%), como pode ser observado na Figura 16.

Os solos predominantes na região correspondem ao cambissolo e nitossolo (EMPRABA, 2004), o primeiro encontrado nas proximidades dos talvegues, variando em profundidade e o segundo, típico de encostas, são solos rasos (CORDEIRO; RAFAELI NETO, 2015).

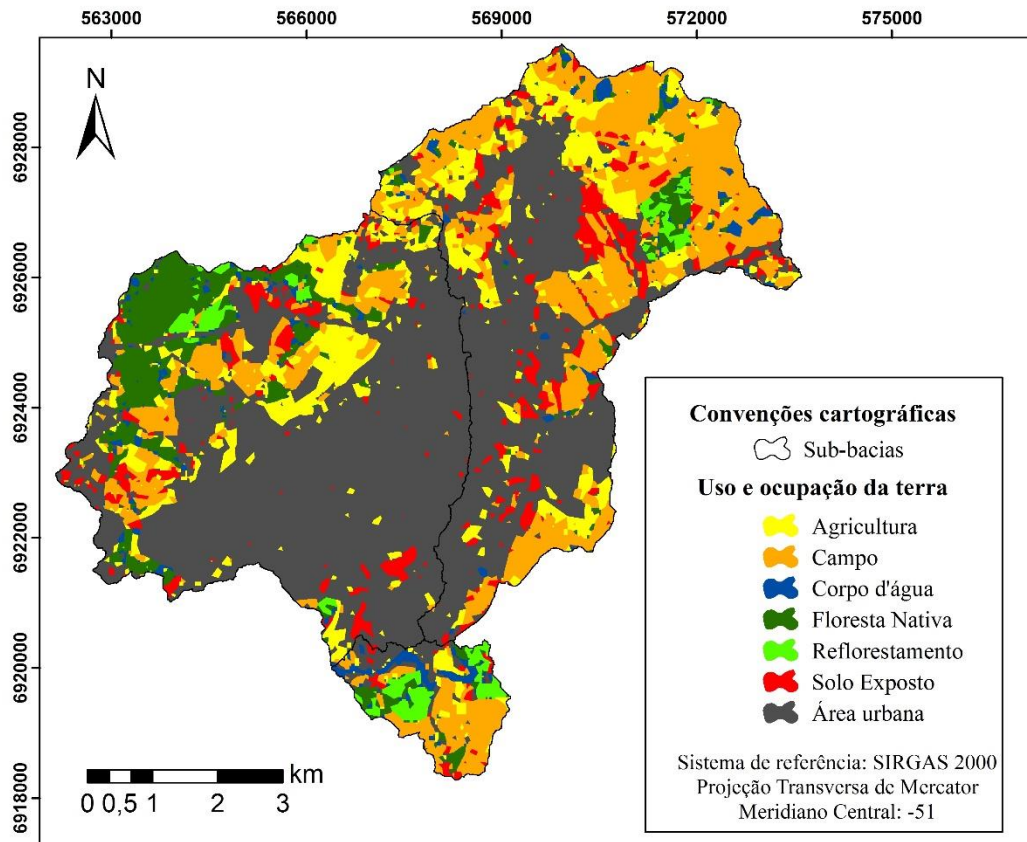


Figura 16 - Uso e ocupação da terra para a área de estudo.

Fonte: Adaptado de Liz (2018).

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A avaliação do ITU como instrumento técnico-científico de suporte à identificação de zonas inundáveis foi realizada por meio de um experimento, cuja estrutura está representada na Figura 17. A estrutura experimental foi dividida em duas etapas, denominadas de cenários: o cenário simulado e o cenário observado. O cenário simulado é resultado das determinações do ITU na área de estudo e representa o valor simulado (V_{sim}). O cenário observado é resultado das determinações das áreas inundáveis por meio dos modelos HEC-RAS e HAND e representa o valor observado (V_{obs}). Os erros foram determinados conforme a Equação 6.

$$e = V_{sim} - V_{obs} \quad (6)$$

A Equação 6 foi submetida a uma análise de desempenho binário, por meio de operações algébricas de mapas.

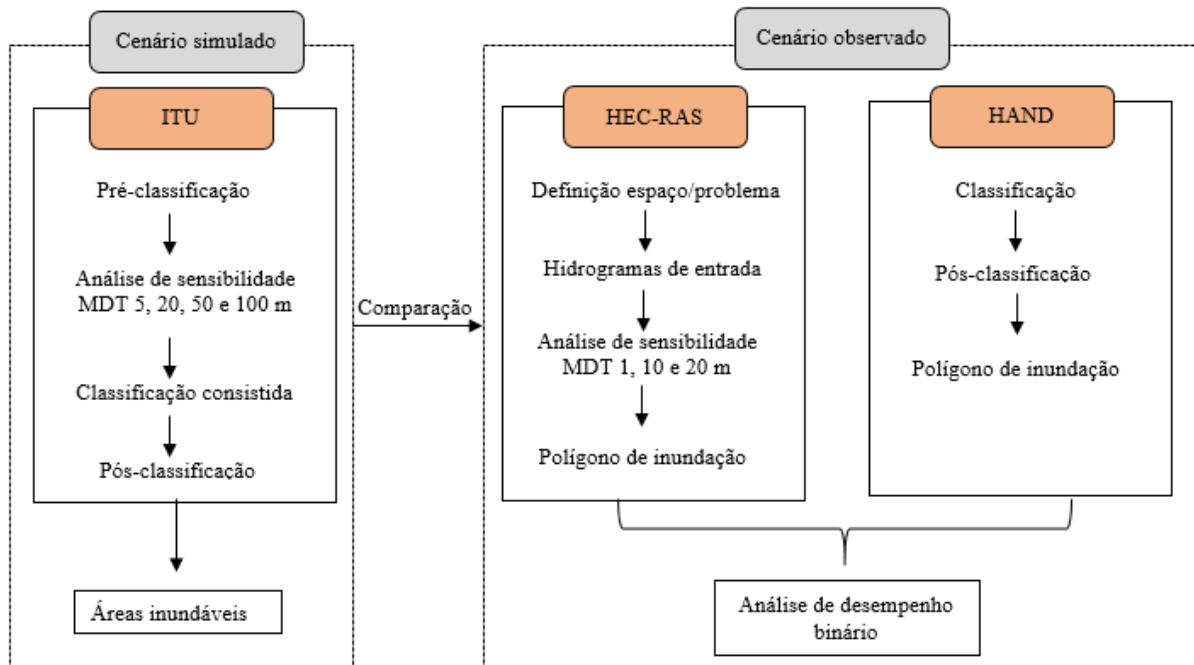


Figura 17 – Estrutura do delineamento experimental.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2.1 Determinação do ITU da paisagem hidrológica

O ITU distribuído na paisagem hidrológica foi determinado sobre o MDT da área de estudo foi obtido no Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGIS 10.5.1, conforme Quinn et al., (1991). Aplicando-se o logaritmo do quociente entre a acumulação de fluxos multiplicado pela resolução espacial do MDT e a tangente da declividade (Figura 18). A acumulação de fluxos é um produto proveniente de um pré-processamento do MDT, pelo qual se realiza o preenchimento de depressões não naturais (MDT_Fill), a determinação das direções de fluxos (Flow Direction), a determinação das células onde ocorrem as acumulações de fluxos (Flow Accumulation). Este último produto armazena a área de captação para cada célula.

O fluxo ou a área acumulada é distribuído entre as células da malha por meio da diferença de cota entre as células, o comprimento do fluxo e o comprimento do contorno.

3.2.1.1 Pré-classificação

A pré-classificação do ITU foi realizada com base no conhecimento empírico do histórico de eventos ocorridos na cidade. Para a análise foram consideradas as classes de ITU baixo, médio e alto, para avaliar qual das resoluções de MDT iria representar com maior fidelidade a paisagem hidrológica definida como área inundável (RENNÓ et al., 2008). Os histogramas de frequências de ITU também foram utilizados para avaliar o ITU nas diferentes resoluções espaciais.

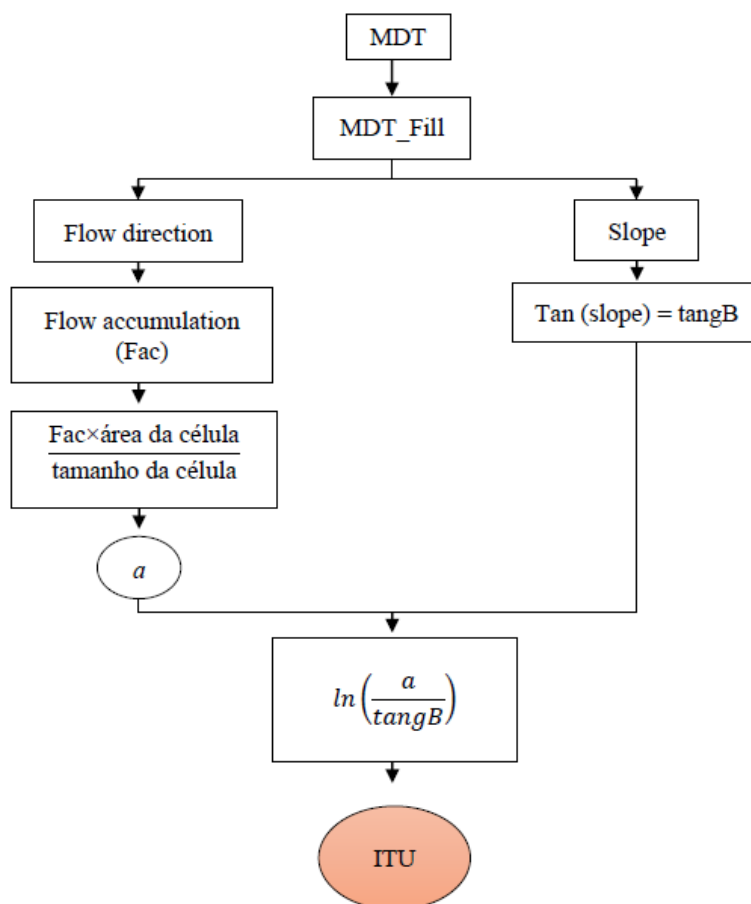


Figura 18 - Fluxograma do processo para obtenção do ITU.

Fonte: Adaptado de Shannon Siefert (2006).

3.2.1.2 Análise de sensibilidade das resoluções espaciais do MDT

A análise de sensibilidade teve por objetivo avaliar a resolução espacial do MDT que pudesse detectar as zonas inundáveis, sem que houvesse saturação de pixels ao ponto de resultar uma imagem com excesso de ruídos e também generalizada ao ponto do MDT se mostrar suavizado demais e superestimar a abrangência espacial das planícies inundáveis.

O MDT deste estudo foi obtido a partir do levantamento aerofotogramétrico da Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Sustentável de Santa Catarina (SDS-SC, 2013),

com resolução espacial de 1 metro. O MDT foi reamostrado para as resoluções espaciais de 5, 20, 50 e 100 m com a ferramenta *Resample* do SIG. A resolução de 5m foi escolhida por revelar feições semelhantes às feições geográficas reveladas na resolução de 1m, com o benefício de gerar menores arquivos de dados e processamentos computacionais mais rápidos (SÁ, et al, 2015).

A resolução de 20m foi escolhida a partir de observações de campo em trabalho exploratório preliminar, em toda a área de estudo. A resolução de 50m foi selecionada por ser considerada uma resolução limite, a partir da qual as planícies inundáveis estariam sendo superestimadas. A resolução de 100m foi escolhida como limiar em que o MDT estaria excessivamente suavizado e, como consequência, as zonas inundáveis estariam superestimadas.

3.2.1.3 Classificação consistida do ITU

Para uma análise exploratória do método e uma classificação consistida do ITU, foram realizados 94 levantamentos a campo em pontos distribuídos espacialmente na área de estudo (Figura 19). Nesses locais, verificou-se com a população se alguma vez já houve a ocorrência ou não de inundações, independente se o local foi atingido pelo evento de 2017 ou por eventos anteriores a este. Para tanto, foi utilizado como resposta categórica 1 ou 0 (já houve ocorrência ou não houve ocorrência, respectivamente).

Os valores de ITU relativos aos pontos levantados a campo e os atributos de ocorrência ou não de inundação, foram submetidos à construção de um modelo de regressão logística binária no programa IBM SPSS *Statistics* 22 para a definição dos limites das classes de índices topográficos de umidade, conforme demonstrado na Equação 7.

$$RLB : p = \Pr[Y=1] = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1)}} \quad (7)$$

Em que:

Y: variável dependente (1 ou 0);

X₁: conjunto de variáveis independentes (ITU);

Pr: probabilidade do método do uso do ITU alto, definir áreas com inundação e ser positivo e;

β_0, β_1 : coeficientes dos parâmetros estimados pelo método da máxima verossimilhança.

Este modelo estatístico permite ajustar o conjunto de variáveis independentes a uma variável de resposta dependente de forma a estimar a probabilidade associada a ocorrência do evento (LEITE et al., 2011), além de estabelecer um limiar para o ITU.

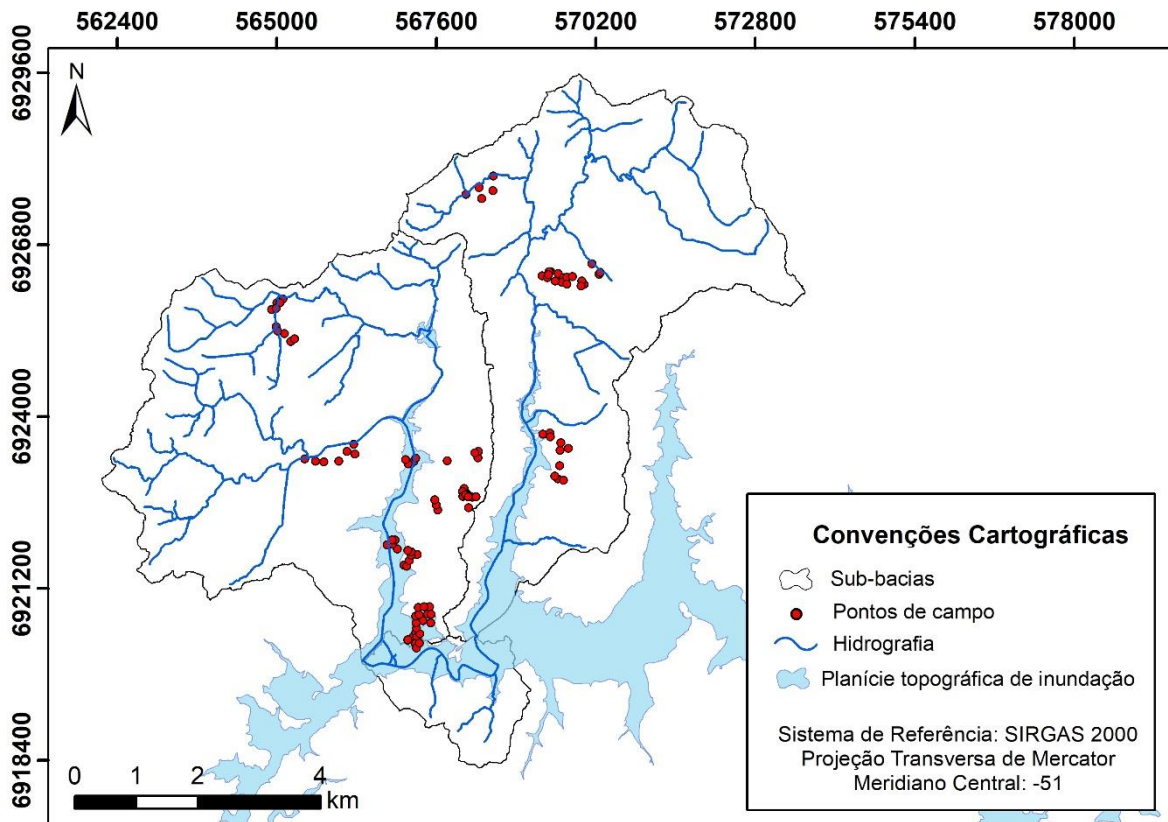


Figura 19 - Pontos visitados a campo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2.1.4 Pós-classificação

A classe alta de ITU, representativa de zonas inundáveis, foi extraída e submetida a uma pós-classificação tendo como critério a altitude de células associada a locais em que historicamente tem-se o registro de inundações. As classes foram atribuídas ao perigo de inundação muito alto, alto e médio para evidenciar os locais que oferecem maior perigo para a população e, portanto, não deveriam ser ocupados.

3.2.2 HEC-RAS

O modelo HEC-RAS 5.0.6 é uma simplificação do complexo sistema hidráulico e hidrológico que ocorre em um real corpo hídrico (SILVA, 2016) um dos mais difundidos em estudos que abrangem delineamento de planícies de inundações (USACE, 2016).

Para a construção do modelo hidrodinâmico, utilizou-se MDT disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDS, 2013). O MDT constitui-se de um dado de alta precisão, visto que possui resolução espacial de 1 metro para todo o território mapeado.

Os MDTs com precisão geométrica de 1x1m impactam diretamente na qualidade da modelagem hidrológica, possibilitando que sejam identificadas as áreas suscetíveis a inundação com maior fidelidade (MILANESI; QUADROS; LAHM, 2017).

O modelo unidimensional foi utilizado para realizar as simulações devido a declividade dos canais serem baixas, a velocidade e a profundidade da água não variarem bruscamente e não haver mudanças na direção de fluxo. O modelo 1D necessita de dados de entrada como contornos geométricos do canal, valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n), coeficientes de expansão e de contração e hidrogramas de cheia para a realização da simulação hidrodinâmica.

Os contornos geométricos do canal foram desenhados manualmente pelo RAS Mapper sobre o MDT com ferramenta específica de delimitação de áreas e o coeficiente de Manning foi inserido manualmente de acordo com os valores de referência para as características dos canais presentes em Chow (1959). Os coeficientes de expansão e de contração são determinados automaticamente. Em locais onde a mudança na seção transversal do rio é pequena e o fluxo é subcrítico, os coeficientes são tipicamente da ordem de 0,1 e 0,3 (USACE, 2016).

3.2.2.1 Definição espaço/problema

Foi definido cinco espaços/problemas com base na análise do mapeamento consistido do ITU em locais que apresentavam um agrupamento de valores de pixels altos, associados com a resposta categórica da ocorrência de inundação pela população. Nos espaços/problemas foi testado três resoluções diferentes, de 1, 10 e 20 m e calculado os índices de avaliação binários para avaliar qual a resolução com melhor desempenho.

3.2.2.2 Obtenção das isócronas e do hidrograma de entrada

Para a obtenção do hidrograma de cheia o tempo de concentração inicialmente foi calculado através do traçado das isócronas (Apêndice A) gerada pela ferramenta “Watershed Isochrones” acoplada no SIG ArcGIS 10.5.1, desenvolvida no Laboratório de Hidrologia e Modelagem Hidrológica, vinculado ao curso de graduação em Engenharia Hídrica e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Pelotas.

A ferramenta considera cada célula da bacia hidrográfica, de forma independente, determina o tempo de viagem até a seção de controle e, a partir destas informações distribuídas no espaço, consegue traçar as isócronas e o histograma-tempo-área (HTA) (LUZ et al., 2014).

A discretização temporal de um acontecimento pluviométrico é fornecida por meio de diagramas cronológicos dos sucessivos valores da precipitação. Tais diagramas podem ser contínuos ou discretos, designando-se, neste último caso, por hietogramas de precipitação estimados com base nas relações de intensidade-duração-frequência (IDF).

Para a transformação da chuva bruta e posterior construção dos hidrogramas de projeto foi utilizada a equação de curva IDF proposta por Back, Henn e Oliveira (2011) para o município de Lages (Equação 8) utilizando o tempo de retorno de 20 anos.

$$i = \frac{1051.2T^{0,1717}}{(t+21,1)^{0,7618}} \quad (8)$$

Em que:

i: máxima média de precipitação (mmh^{-1});

T: tempo de retorno (anos);

t: duração da chuva (minutos).

Para o cálculo do hietograma, utilizou-se o método dos blocos alternados. Na determinação da precipitação efetiva, aplicou-se o método da Curve Number (CN), desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (CN-SCS), atualmente chamado de Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS). Esta estimativa se baseia em dados que são relativamente facilmente obtidos, como uso e cobertura da terra, precipitação e o grupo hidrológico do solo (ALVES, 2016).

O método consiste em estimar a precipitação efetiva, a parcela do volume precipitado que forma o escoamento superficial, e com isto o escoamento superficial. Para estimar a precipitação efetiva, aplicou-se a Equação 9.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \text{ para } P > I_a \text{ e 0 os demais casos} \quad (9)$$

Em que:

P_e : chuva efetiva (mm);

P : precipitação total (mm);

I_a : abstração inicial (mm);

S : potencial máximo de retenção do solo (mm).

Para I_a adotou-se o valor de $0,2S$, conforme recomendado pelo NRCS. Assim, a Equação 6 pode ser reescrita na forma da Equação 10.

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (10)$$

O potencial máximo de retenção do solo está associado às características físicas da bacia, em termos de solos e cobertura vegetal (Equação 11).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (11)$$

O CN foi estimado tendo como base as características de uso e ocupação da terra para cada grupo hidrológico de solos (SAROTI; GENOVEZ; LOMBARDI NETO, 2009; TUCCI, 2009). O valor representativo de cada espaço/problema foi obtido por meio da ponderação dos valores associados a cada isócrona pela proporção de área associadas a este valor (Equação 12).

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n cn_i a_i}{A} \quad (12)$$

Em que:

CN: número da curva;

A : área do espaço/problema;

cn_i : número da curva de cada isócrona;

a_i : área associada a isócrona.

O hidrograma de cheia foi obtido a partir do hietograma da chuva, pelo método do Hidrograma Unitário Triangular (HUT) do NRCS (1972). Desenhado a partir de elementos estimados através de características físicas da bacia o HUT é um hidrograma unitário adimensional (SILVEIRA, 2016). Este método é mais indicado para estudos de macrodrenagem, pois considera características específicas da bacia hidrográfica e também a variação temporal da intensidade da chuva, não sendo recomendado a sua aplicação para sistemas de microdrenagem.

O método tem como parâmetro o tempo de concentração, sendo o adotado o Watt e Chow (1985) (Equação 13), tempo de pico (Equação 13), tempo de subida (Equação 15), tempo de base (Equação 16) e a vazão de pico (Equação 17). A partir desses dados, se obtém as ordenadas do Hidrograma Unitário da Área, através do HUT.

$$t_c = 7,68 \left(\frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,79} \quad (13)$$

$$t_p = 0,6 \cdot t_c + 0,5 \cdot d \quad (14)$$

$$T_p = t_p + \frac{d}{2} \quad (15)$$

$$t_b = T_p + 1,67 T_p \quad (16)$$

$$q_p = \frac{2,08 \times A}{T_p} \quad (17)$$

Em que:

t_c : tempo de concentração (minutos);

L: comprimento da bacia (m);

S: declividade do talvegue principal (m/m);

t_p : tempo de pico (hr);

d: duração da chuva (hr);

T_p : tempo de subida (hr);

t_b : tempo de base (hr);

q_p : vazão de pico ($m^3 s^{-1}$);

A: área (km²).

Cabe salientar que a metodologia empregada envolve uma série de incertezas e imprecisões, como é natural em qualquer método de cálculo de engenharia.

3.2.3 Modelo Height Above Nearest Drainage - HAND

O HAND (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011) é uma denominação equivalente à de modelo digital de terreno, pois é uma versão de um MDT normalizado pela rede de drenagem (MOMO et al., 2015) o qual leva em consideração a diferença de altitude do terreno e a altitude da rede de drenagem mais próxima de cada pixel (SPECKHANN, 2018). Como resultado tem-se o mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação, fundamentando-se na distância vertical à drenagem mais próxima (MENGUE et al., 2017). A partir do dado de entrada são executadas três etapas:

i. Etapa 1: correção do MDT e direção de drenagem local

O primeiro passo para a obtenção do HAND consiste na correção do MDT em gerar a direção de fluxo a partir do método D8 (Deterministic EightNeighbors) inicialmente proposto por O'Callaghan e Mark (1984). Nesta etapa define-se para cada ponto de grade, a direção do fluxo d'água, tendo como regra a maior declividade (MOMO, 2015).

O resultado é uma grade de pontos chamada LDD (Direção de Drenagem Local) utilizada para definir as áreas de drenagem acumuladas (Figura 20). Desta forma, a direção do escoamento superficial e a conexão entre os pontos hidrológicos na formação da rede de drenagem na grade, são com base na força gravitacional, seguindo sempre para o ponto mais baixo (NOBRE et al., 2011).

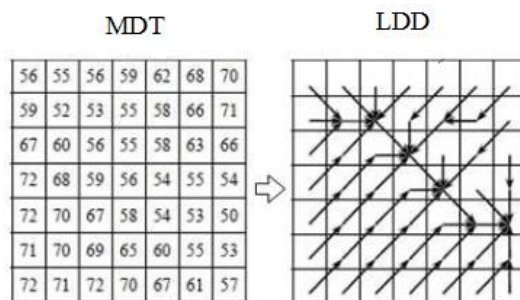


Figura 20 – Procedimento para gerar a matriz de direção de drenagem local.

Fonte: Adaptado de Milanese, Quadros e Lahm (2017).

Entretanto, se uma célula processada é menor ou igual do que os seus oito vizinhos ela será identificada como área de poço ou sumidouro no MDT. O algoritmo HAND para regularizar estas incoerências hidrológicas do MDT utiliza estratégia de regularização de áreas chamada breaching (corte para escoamento), que corrige essas incoerências hidrológicas do dado topográfico (MOMO, 2015).

ii. Etapa 2: obtenção da rede de drenagem

A correção do MDT e a definição da direção do fluxo de drenagem leva ao cálculo para cada célula da grade os valores acumulados de fluxo recebidos, aonde células com valores altos indicam uma maior concentração de fluxo acumulado.

Dessa forma, o método da área de contribuição é utilizado, a partir do qual um parâmetro limiar para identificar as células da grade nos quais se iniciam o canal deve ser ajustado (BRESSIANI; SCHMIDT; PEREIRA, 2018). A rede de drenagem é assim definida por aqueles pontos de grade que possuem uma área de contribuição maior que um dado limite, quanto menor o limiar, maior a densidade de rede de drenagem resultante (GOERL; MICHEL; KOBAYAMA, 2017).

Com base nas cotas de drenagem é feita a normalização da altimetria, assim o MDT é reclassificado com base nas distâncias verticais relativas, ao longo das trajetórias superficiais de fluxo, para o curso d'água mais próximo (MOMO et al., 2015) gerando o MDT-HAND. Assim, cada ponto de grade é ajustado um novo valor altimétrico referenciado topograficamente com a rede de drenagem (MENGUE et al., 2016).

iii. Etapa 3: aplicação do modelo HAND

A última etapa classifica os pontos da grade HAND com base em seus potenciais gravitacionais de forma a agrupar alturas relativas em classes equipotenciais arbitrárias (Figura 21). As áreas são definidas por propriedades hidrológicas, associadas a rede de drenagem, definindo ambientais com propriedades hidrológicas semelhantes (RENNÓ et al., 2008).

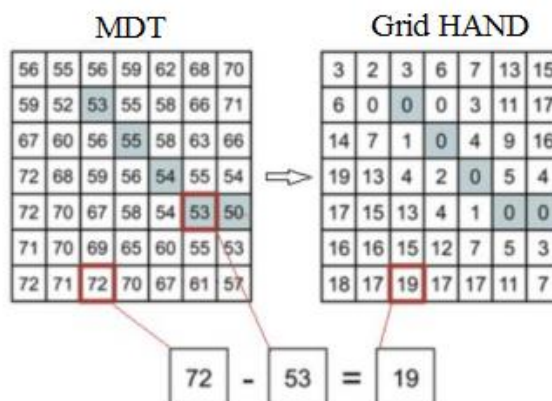


Figura 21 - Comparação de MDT e Grid HAND.

Fonte: Adaptado de Rennó et al. (2008).

O modelo HAND foi processado no TerraView Hydro 0.4.4 (DPI-INPE, 2015) utilizando um MDT com resolução de 1 m (SDS, 2013) para evitar o efeito da suavização e para a obtenção de uma representação real com a maior fidelidade possível dos canais com larguras iguais ou inferiores a 1m com os detalhes representativos da paisagem.

Goerl, Michel e Kobiyama (2017) observaram que ao utilizar MDT com menor resolução de grade, a área inundável gerada pelo HAND foi menor do que resoluções mais precisas devido a suavização da topografia próxima ao canal e das rugosidades/ ruídos atrelados ao MDT. Milanesi, Quadro e Lahm (2017) utilizaram MDT com resolução espacial de 1m obtiveram um melhor detalhamento das áreas com suscetibilidade a inundação.

O limite de área de contribuição adotado para gerar uma densidade de drenagem representativa da realidade, foi de 0,025 km² para a inter-bacia Entre Rios, 0,25 km² para a sub-bacia do rio Carahá e 0,55 km² para a sub-bacia do rio Ponte Grande.

Rennó et al. (2008) propuseram quatro classes para o fatiamento dos resultados do HAND, alagamento, ecótono, encostas e topos de morro. Silva et al. (2013) fizeram pequenas alterações, definindo a classe de alagamento até 5 m. Goerl, Michel e Kobiyama (2017) consideraram a classe de alagamento para definir áreas suscetíveis a inundação.

A partir da matriz HAND gerada, utilizou-se o programa ArcGIS 10.5.1 para realizar a classificação tendo como base o estudo desenvolvido por Goerl, Michel e Kobiyama (2017) o qual adotaram o limiar de 5 m para fatiamento de áreas de inundação. Posteriormente, uma nova classificação foi adotada para o estabelecimento de classes alta, média e baixa suscetibilidade a inundação.

3.2.4 Índices binários para a avaliação dos modelos

Medidas quantitativas possibilitam uma avaliação objetiva do desempenho do modelo simulado (VIANINI NETO, 2016). A abordagem quantitativa mais comum é a análise pixel-a-pixel, denominada também de comparação binária (ARONICA et al., 2002; WERNER et al., 2005; HUNTER et al., 2005; PAPPENBERGER et al., 2007).

Os indicadores numéricos de desempenho binário foram utilizados para quantificar o desempenho do ITU com relação ao modelo HEC-RAS e HAND. Para o cálculo dos índices de desempenho binários são necessários rasters inteiros da superfície da inundação, para comparação entre a área base e a área simulada (LIZ, 2018). Nessa abordagem, todas as células da área de estudo são analisadas e enquadradas em um dos conjuntos descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de contingência com as possibilidades de combinações conforme a classificação binária.

	Presente na observação	Ausente na observação
Presente na simulação	A	B
Ausente na simulação	C	D

Fonte: Vianini Neto (2016).

A observação refere-se a área inundada obtida pelos modelos consolidados HEC-RAS e HAND e o modelo simulado ao mapeamento do ITU. Os processamentos para obtenção da tabela de contingência foram realizados com ferramentas de manipulação rasters no ArcGIS 10.5.1.

Para avaliar o desempenho dos modelos, foram escolhidas variáveis que determinam o acerto, omissão e a comissão. As áreas de acerto são aquelas que coincidem no cenário observado e no simulado (MOMO et al., 2015). As áreas de omissão são aquelas presentes na observação como área inundável, mas que não foi obtida o polígono de inundação pelo modelo simulado. As áreas de comissão são aquelas que o cenário observado não indica como área inundável, mas que são classificadas pelo modelo simulado como zonas inundáveis. As possibilidades descritas pelas letras A, B, C e D são utilizadas em equações (Tabela 5), obtidas através dos estudos de Horrit e Bates (2001); Aronica et al., (2002); Hunter (2005); Pappenberger et al., (2007); Cook e Merwade (2009); Schumann et al., (2009) e Rocha (2015). O emprego de índices de performance garante uma análise integral das estimativas sob diferentes aspectos (CHERUBINI et al., 2002).

Tabela 5- Indicadores numéricos de desempenho binário para estudos em inundações.

Nome	Equação	Intervalo	Comentário
Viés (BIAS)	$\frac{A + B}{A + C}$	$(0, \infty)$ e igual a 1 para uma predição correta.	Balço entre sub e superestimativa da inundação.
Medidas de acerto (H)	$\frac{A}{A + C}$	$(0,1)$	Percentual da cheia observada corretamente previsto. Apresenta como ponto negativo o fato de sempre aumentar com o aumento da inundação prevista pelo modelo; portanto, pode ser manipulado pelo incremento de células inundadas.
Alarme falso (F)	$\frac{B}{B + D}$	$(0,1)$	Percentual de áreas secas que foram incorretamente previstas.
F^{<3>}	$\frac{A - C}{A + B + C}$	$(-1,1)$	Desenvolvido para quantificar a subestimativa da cheia.
F^{<4>}	$\frac{A - B}{A + B + C}$	$(-1,1)$	Desenvolvido para quantificar a superestimativa da cheia.

Fonte: Adaptado de Rocha (2015).

O parâmetro Viés apresenta qual é a tendência de erro por omissão ou por comissão na simulação do modelo (STEPHENSON, 2000). A medida de acerto representa as células corretamente previstas, quando o cenário observado e a área simulada coincidem perfeitamente (YU; LANE, 2006; BATES; DE ROO, 2000; HORRITT; BATTES, 2002).

O parâmetro F ou alarme falso, refere-se a áreas em que não é observada a inundação, mas que o modelo simulado aponta como área inundável. O índice F^{<3>} indica a omissão na simulação do modelo e o F^{<4>} a comissão associada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MDT

Na pré-classificação do ITU foram estabelecidos os limites de classe apresentados na Tabela 6. Os valores mais baixos indicam os locais com menor probabilidade de acúmulo de água, enquanto que os mais elevados são representativos de regiões com maior suscetibilidade a ocorrência de eventos de cheia por serem propícios naturalmente ao acúmulo de água.

Tabela 6 - Pré-classificação do ITU

ITU	Classe
< 6	Baixo
6 - 9	Médio
> 9	Alto

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os principais parâmetros referentes ao MDT e ao ITU para as resoluções de 5, 20,50 e 100 m estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros relativos ao MDT e ao ITU.

Resolução da grade	MDT		ITU			
	Min	Máx	Min	Máx	Média	Amplitude
5mx5m	868,18	1109,23	-1,7	23,1	10,7	24,8
20mx20m	868,43	1108,95	0,15	21,72	10,94	21,57
50mx50m	870,05	1103,04	1,51	20,74	11,13	19,23
100mx100m	871,39	1092,15	2,54	19,35	10,95	16,81

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

São observadas modificações significativas nos valores dos parâmetros do MDT e do ITU para cada resolução espacial. Conforme o tamanho das células aumenta, ocorre uma redução na amplitude dos dados (SILVA; VESTENA; KOBİYAMA, 2007; SARTORI, 2018) verificado a partir do aumento dos valores mínimos e redução dos valores máximos (OLIVEIRA, 2015), essa perda de valores extremos não é apresentada em resoluções menores.

Os valores mínimos de ITU são afetados principalmente pela resolução, em que resoluções de grade maiores, estão associadas a valores mínimos mais altos (QUINN et al., 1991). O impacto da resolução do MDT nos detalhes da distribuição do ITU da área úmida também foi evidenciado por Zhang e Montgomery (1994).

As características hidrológicas são afetadas pela resolução adotada, resoluções mais grosseiras, por exemplo, tendem a diminuir a profundidade média da água (suavização do MDT) e aumentar o escoamento superficial (WOLOCK; PRICE, 1994).

O modelo com 100mx100m apresenta suavização bastante pronunciada, o ITU máximo não ultrapassa 19,35. O efeito de suavização que ocorre em resoluções grosseiras do MDT, tem como principal consequência a perda de detalhes ou informações (SÁ et al., 2015).

A variação na amplitude dos dados também foi evidenciada pelos resultados de Sá (2014), quanto maior a grade utilizada, menor a amplitude nos valores de ITU, variando de 16,13 para 12,07 de amplitude correspondentes a grade de 300 e 900 m respectivamente.

A Figura 22 apresenta o histograma de frequência dos ITU para as resoluções espaciais adotadas no estudo.

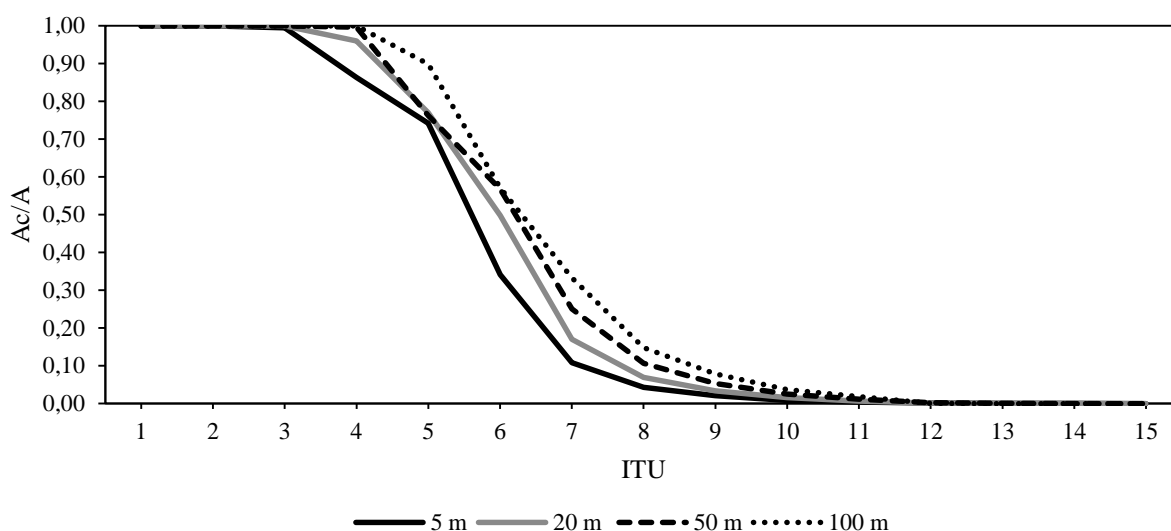


Figura 22 - Histograma de frequência do ITU.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O efeito de suavização que ocorre pela diminuição da resolução espacial influencia na distribuição do ITU. Na medida que o tamanho da célula aumenta, há um deslocamento na direção dos valores mais altos e mais generalizada fica a sua distribuição na unidade da paisagem.

A utilização de resoluções menores, como a de 5m provoca um detalhamento sobretudo nos atributos topográficos (SILVEIRA; SILVEIRA, 2015), enquanto que a forte suavização do relevo, não preserva as feições geomorfológicas da superfície, como encostas e topos de morros (OLIVEIRA, 2015).

Variações na resolução de MDTs diferem significativamente nos dados morfométricos (SILVEIRA; SILVEIRA, 2015), como pode ser evidenciado pela distribuição espacial do índice topográfico, intimamente ligada a resolução adotada (MANFREDA; LEO; SOLE, 2011).

Em seu estudo Gharari et al. (2011) identificaram que MDT com resoluções superiores a 20 m não possuem detalhes suficientes que caracterizam a paisagem, introduzindo erros consideráveis para a representação de vales profundos ou pequenas cabeceiras.

A célula de 5 m é a que melhor representa as feições do terreno (Figura 23), contudo, quanto menor for a célula, mais interferência do terreno local e individualização dos pixels ocorrem (QUINN et al., 1991) em função do efeito do microrelevo, caracterizando pontos irrelevantes para o objetivo em questão. Outro aspecto, se refere aos ruídos observados em células de alta precisão, em que alguns pixels possuem características completamente diferentes dos pixels vizinhos (GHARARI et al., 2011).

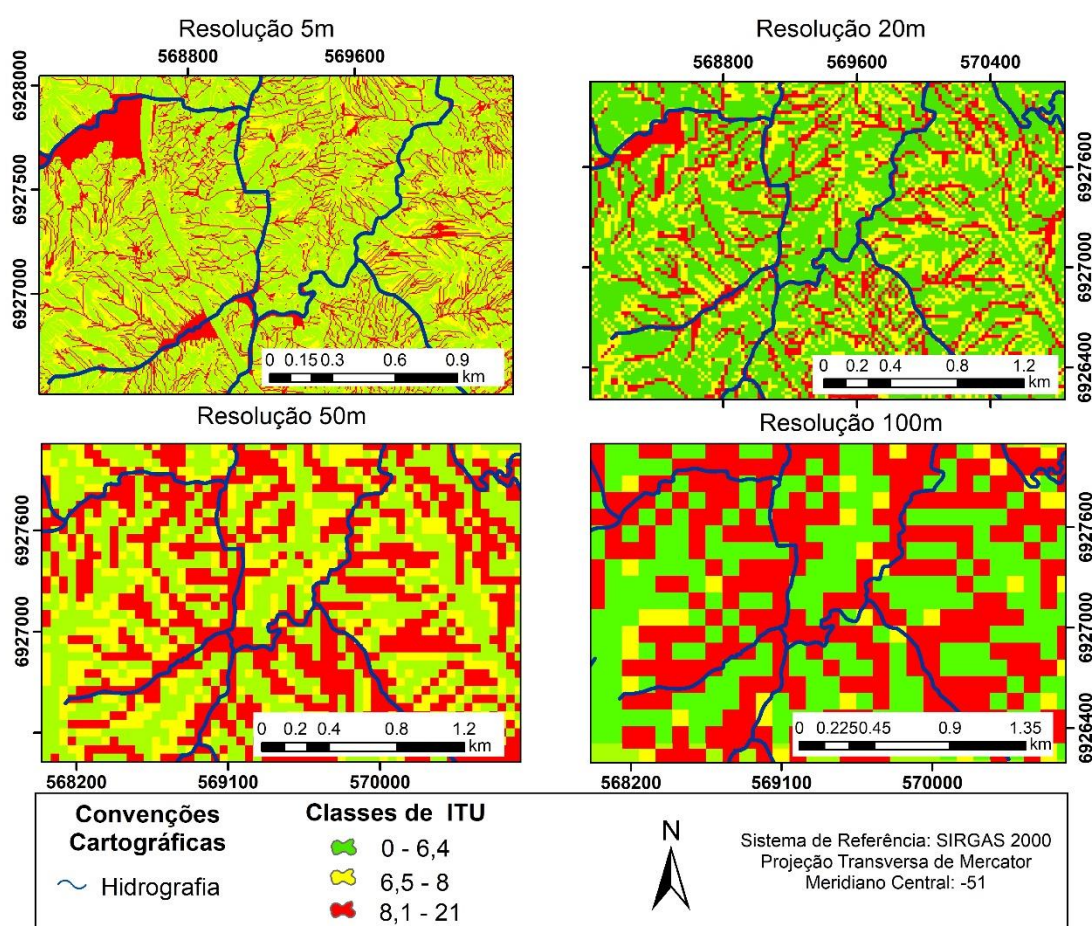


Figura 23 - Efeito da suavização do índice topográfico para diferentes resoluções.
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para o tamanho de células de 50 e 100 m, teve-se a atuação do macrorrelevo e uma generalização significativa das características morfológicas da unidade hidrológica da paisagem, as quais não condizem com a realidade e não se demonstram parcimoniosas. Grandes malhas não são representativas de detalhes em uma bacia pelas variáveis do terreno possuírem baixo detalhamento (CAPOANE et al., 2015).

Para identificar as áreas propensas a inundações em 11 sub-bacias com áreas entre 6.929 e 489 km², Manfreda, Leo e Sole (2011) avaliaram resoluções com tamanho de célula variando de 20 a 720 metros as quais demonstram dependência da escala proposta. Para o caso de estudo, a resolução de 100 m, que apresenta descrição geral das características geomorfológicas médias da planície de inundação, possui melhor desempenho do que as células com maior detalhamento espacial.

Lopes (2012), adotou uma resolução espacial de 30 m para uma área de estudo 788 km², a mesma demonstrou-se representativa das áreas mais propícias a saturação e geração de escoamento superficial. Zhang e Montgomery (1994) observaram que as malhas com 10 m de dimensão registraram melhor desempenho em relação as de 30 e 90 m.

Thompson e Moore (1996) recomendam tamanhos de malhas menores que 30 m, preferivelmente a adoção de 10 m, dependendo da disponibilidade de dados. A ampla disponibilidade de MDTs de resolução moderada (30-100m) para muitas regiões, permite a utilização de técnicas simples que identificam adequadamente as planícies de inundação na escala de interesse (NARDI; VIVONI; GRIMALDI, 2006).

Tendo como critério de convergência à identificação da paisagem hidrológica de zonas inundáveis no município de Lages a alta representatividade pela resolução de 20 m, fez com que essa fosse a escolhida. Esse tamanho de célula mostrou-se adequado para a área de estudo em específico, para demais regiões, as análises de sensibilidades devem ser realizadas.

4.2 CLASSIFICAÇÃO CONSISTIDA DO ITU

As visitas a campo indicaram 53 pontos em áreas que se tem registros de inundações, 31 em regiões que não ocorre inundações e 10 em locais que ocorre alagamentos possivelmente devido a ineficiência na rede de drenagem.

Na Tabela 8 é apresentada a correspondência entre os locais historicamente inundáveis observados pelas visitas a campo e os valores respectivos de ITU. A regressão logística binária indicou uma porcentagem de acertos de aproximadamente 80%. Ressalta-se que, quanto maior o número de observações coletadas a campo, maior é a precisão da extensão das inundações.

Tabela 8 - Classificação de acertos.

Tabela de Classificação				
Observado		Previsto		
		Categoria independente		Porcentagem correta
		0	1	
Categoria Independente	0 = não ocorre inundação	27	6	81,8%
	1 = ocorre inundação	13	48	78,7%
Porcentagem global				79,8%

Fonte: SPSS.

Para os casos em que o ITU baixo coincide com locais de não ocorrência de inundação a porcentagem de acerto foi de 81,8%. A relação entre valores elevados de índice topográfico com a ocorrência de inundações, foi de 78,7%.

Em 18,2% dos casos o ITU alto corresponde a locais que não apresenta registros de inundação. Embora a topografia favoreça o acúmulo de água, processos naturais ou induzidos por atividades humanas como obras de drenagem, aterramentos e crescimento da vegetação causam modificações na hidrodinâmica fluvial e alteram a suscetibilidade a inundação.

Essas alterações se desenvolvem ao longo do tempo e dos cursos de água (rios principais e afluentes) e fazem parte da dinâmica de ocupação da paisagem, sobretudo em áreas urbanas, com ocupação desordenada (MOMO et al., 2016).

Dados observados a campo e obtidos pelo ITU são provenientes de erros de precisão na geração e processamento do MDT. Os modelos utilizados possuem imprecisões embutidas (SILVEIRA; SILVEIRA, 2015), visto que são representações aproximadas dos terrenos geradas por processo de amostragem e que as propriedades obtidas a partir desse modelo podem ser diferentes das propriedades reais observadas (MOREIRA, 2012).

Os erros em MDT podem variar espacialmente devido a limitação de informações ou erros aleatórios associados à complexidade na captação e pré-processamento de dados, (WILSON, 2012), além disso, alguns tipos de processamento, tais como, o preenchimento de depressões ou a suavização do relevo, alteram a precisão vertical dos MDTs, o que pode diminuir a quantidade de erros ou criar novos (ENDRENY; WOOD; LETTENMAIER, 2000).

As classes de ITU definidas pela regressão logística (Equação 18) estão apresentadas na Tabela 9. A probabilidade associada a cada classe se refere a capacidade de o limite de classe indicar a planície inundável. Informações coletadas a campo aliado a métodos estatísticos

contribuem na determinação dos valores limites para o ITU (BALLERINE, 2017), o qual é característico do perfil topográfico da área de estudo. Cabe destacar que essa classificação não está associada a um tempo de retorno específico.

$$RLB : p = \Pr[Y = 1] = \frac{1}{1 + e^{-(-6,577 + 0,916 ITU)}} \quad (18)$$

Em que:

ITU: valor do índice topográfico de umidade.

Tabela 9 - Classes de ITU consistido

Probabilidade (%)	ITU	Classes
< 33	< 6,4	Baixo
33 - 68	6,5 – 8	Médio
> 68	> 8	Alto

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

As classes de ITU gerada pelo método estatístico se revelaram condizente com o esperado. Valores de ITU baixos correspondem a locais com alta declividade e pouca área de contribuição (MOTA et al., 2013), enquanto que os valores mais altos estão ligados a relevos planos e com maior área de contribuição (SEIFERT, 2015), indicando a tendência do local à saturação hídrica (HUNG et al., 2016).

A relação entre valores de ITU e zonas inundáveis já era esperada pelas pesquisas em literatura. Além disso, a topografia é o principal fator hidrológico atuante na umidade do solo (AGNEW et al., 2006).

Devido a área de estudo apresentar características geomorfológicas particulares, a mesma classe de ITU pode não representar com a mesma precisão zonas inundáveis de outras paisagens hidrológicas. Os limites de valores de ITU apropriado em uma determinada região, pode não satisfazer outra área em razão das características geomorfológicas associadas (SHESHUKOV, A. Y.; SEKALUVU, L. HUTCHINSON, 2018).

Locais com ITU entre 4 e 5 são considerados como solos bem drenados, valores entre 5 e 7 são representativos de solos moderadamente drenados e a cima de 7, solos mal drenados (LIN et al., 2006) característicos de fundo de vale com grande concentração de umidade, pois apresenta baixa distância vertical em relação ao canal de drenagem (PRATES; SOUZA; JUNIOR, 2012).

Os valores de ITU obtidos são adimensionais e sofrem variação com base no perfil topográfico da região e a resolução do MDT adotada (BALLERINE, 2017). Normalmente, os valores de índice apresentam-se entre -3 e 30 (MINELLA; MERTEN, 2012; MOTA et al., 2013; SÁ, 2014; SEIFERT, 2015). Células com valor de ITU baixo representa áreas com alta declividade e solos rasos, normalmente áreas de recarga de água subterrânea (LOPES, 2012).

Em seu estudo Seifert (2012) classificou o ITU, tendo como referência áreas de saturação permanente e temporárias identificadas em campo e em fotografias aéreas. Em suas considerações, valores inferiores a 7,49 foram tidos como baixo e acima de 11 como altos. Os resultados mostraram-se satisfatórios e compatíveis com a distribuição espacial das áreas saturadas da bacia determinada.

A Figura 24, apresenta a distribuição do ITU e o mapa de declividade realizado a partir das classes determinadas pela Embrapa (1979). É possível notar a existência de uma relação entre o ITU alto e as zonas inundáveis, sendo estas localizadas principalmente nas áreas próximas dos cursos d'água, que apresentam altos valores de probabilidade de saturação, devido à proximidade do lençol freático.

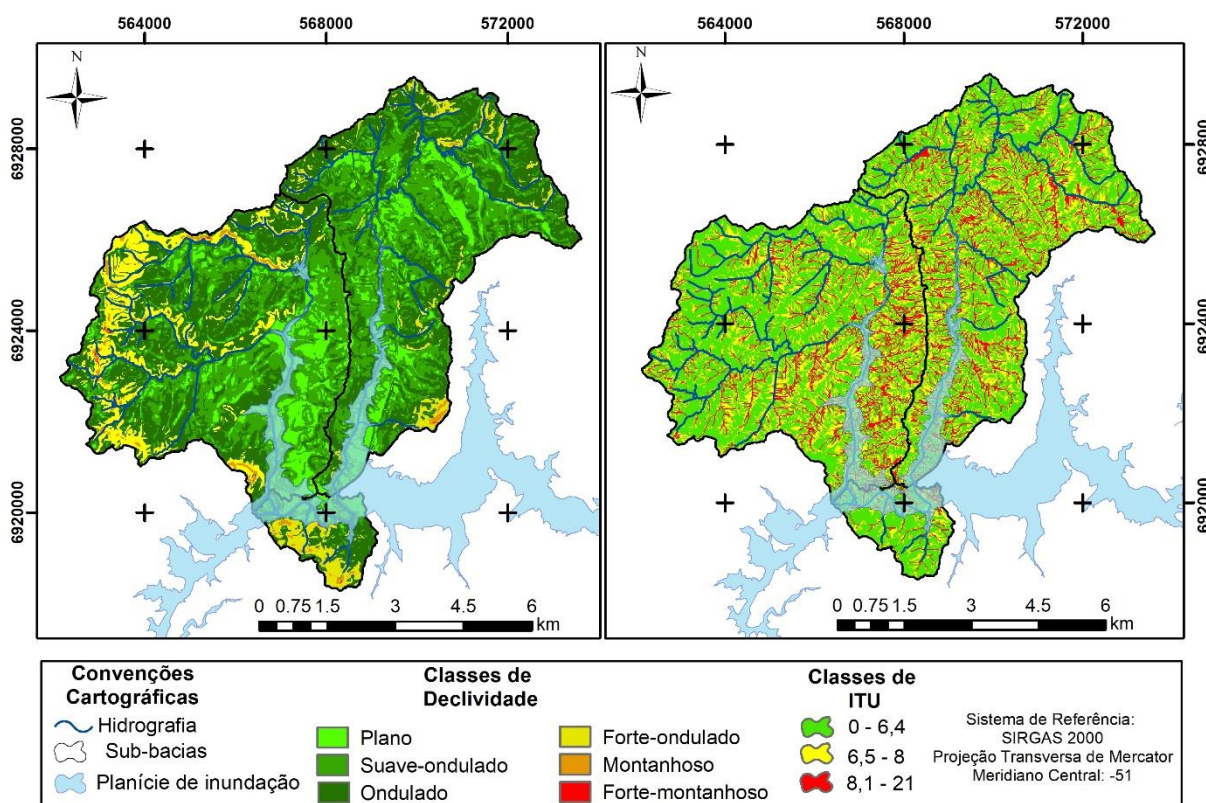


Figura 24 - Classes de declividade e ITU.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Grande parte das ocupações que mencionaram ser afetadas pela inundação, são localizadas em cotas baixas, favoráveis ao acúmulo de água. As menores declividades da bacia, consideradas planas, encontram-se principalmente na região central, onde há maior concentração da área urbana de Lages e também valores altos de ITU, associados a planície de inundação. A região oeste, sul e sudeste da área de estudo, são locais caracterizados por altitudes e declividades elevadas, com predominância de valores baixos de ITU.

O ITU representa a relação da declividade nos processos hidrológicos, ou seja, o ITU descreve a tendência da água se acumular em um dado ponto e a declividade, indica o efeito das forças gravitacionais no movimento da água (POURALI et al., 2014). Valores de índices topográficos de umidade baixos apresentam alta declividade a qual provoca menor a infiltração de água no solo e maior escoamento superficial (JENNY, 1994).

Os locais associados a elevados valores de ITU, estão concentrados em relevos planos e suave ondulado, representativos de locais com potencial acúmulo de água dentro do perímetro urbano de Lages. Regiões com relevos planos, apresentam maior suscetibilidade ao acúmulo de água, pois a baixa inclinação do terreno facilita a concentração da lâmina de água. Os menores valores de índice são evidenciados em divisores de água e locais com declividade acentuada.

As áreas geradas pelo agrupamento de pixels de ITU considerado como alto, demonstraram-se estar em consonância com os locais em que se tem registro de inundações em razão de precipitações extremas, sendo, portanto, um indicativo de que o referido índice pode ser utilizado para a identificação de planícies inundáveis.

Gharari et al., (2011) observaram que as classes de ITU apresentam mudanças no comportamento quanto às proporções de cada unidade hidrológica da paisagem. A medida que o valor do ITU aumenta, a proporção de platôs e de zonas inundáveis aumenta e a proporção de encostas diminui.

Manfreda et al. (2014) investigou o papel de diferentes índices na identificação de áreas propensas a inundações ao longo da bacia do rio Tibre, entre eles, o ITU, o qual demonstrou ser um dos indicadores com melhor desempenho.

Em um estudo semelhante desenvolvido na cidade de Inverloch, Pourali et al., (2014) provou que o ITU pode ser útil no início do estágio do planejamento do uso e ocupação da terra para o desenvolvimento residencial, uma vez que o mesmo fornece uma abordagem mais econômica para a determinação de locais com suscetibilidade a inundação quando comparado com modelos hidrodinâmicos convencionais.

Embora tenha-se técnicas mais precisas para a identificação de planícies de inundação, como o caso da modelagem hidrodinâmica, que representa em detalhe os processos físicos

envolvidos nas inundações, em razão da necessidade de vários dados de entrada, do alto custo agregado e do tempo despendido para a realização do mapeamento, o processamento de MDTs vem ganhando espaço na área ambiental.

4.3 PÓS-CLASSIFICAÇÃO DO ITU

As variações de altitude influenciam no perigo a inundação principalmente em função do acúmulo de água nas regiões de baixa altitude (MAGALHÃES et al., 2011), por essa razão um refinamento foi aplicado sobre a classe alta de ITU. Os valores de altitude associados a classe alta foram classificados em muito alto, alto e médio perigo a inundações (Tabela 10 e Figura 25).

Com esta pós-classificação, as áreas previstas pelo ITU foram filtradas, reduzindo uma superestimação do mapeamento. A identificação de áreas com maior grau de suscetibilidade auxilia na adoção de medidas preventivas, as quais necessitam serem mais efetivas nestas áreas.

Tabela 10 - Classificação da altitude

Altitude (m)	Classes de perigo
< 885	Muito alto
885 - 901	Alto
> 901	Médio

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Áreas com alto ITU associada a altitude menores (< 885 m) por serem planas e apresentarem menor distância vertical dos corpos hídricos são mais suscetíveis ao extravasamento do canal do que áreas associadas a altitudes elevadas as quais encontram-se mais distantes verticalmente dos canais. Como pode-se observar a maioria dos pontos levantados a campo situam-se em altitudes inferiores a 901 m.

Áreas de maior altitude apresentam condições favoráveis ao escoamento de água (RIGHI; ROBAINA, 2010) enquanto que nas áreas de menor altitude ocorre a acumulação hídrica (OGASSAWARA; GASS, 2018).

O método do ITU não considera qualquer intervenção antrópica que tenha ocorrido no terreno. Entretanto, a impermeabilização do solo, resultante da infraestrutura urbana, além de outras interferências humanas, possuem potencial para intensificar o escoamento superficial e favorecer a ocorrência de inundações (TUCCI, 2014).

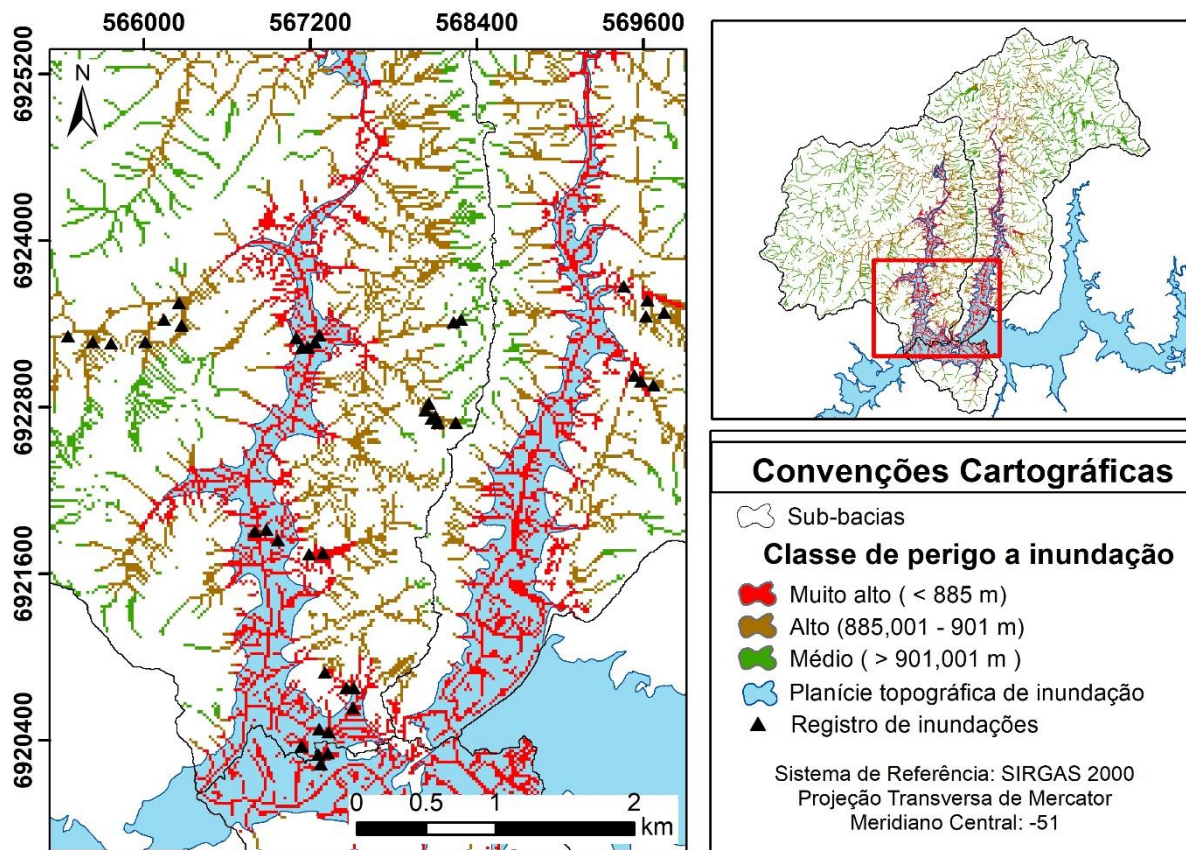


Figura 25 - Classes de perigo a inundação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O mapeamento obtido contribui para a identificação de áreas em que não deve ocorrer o crescimento urbano (GOERL, 2010), tendo portado o equilíbrio entre a ocupação antrópica e as limitações naturais (GOERL; KOBAYAMA; PELERIM, 2012).

Nos casos em que já se tem uma ocupação nos locais considerados como de perigo, as entidades responsáveis por atuar em auxílio da população podem desenvolver um trabalho com maior eficiência devido a seu preparo (MAKRAKIS, 2017). Além de reconhecer a priori os locais em que necessitam de medidas de drenagem necessárias à prevenção e à mitigação de impactos (BRASIL, 2001).

Também é possível realizar um zoneamento do território para promover usos produtivos e menos sujeitos a danos (MENEZES, 2014) e evitar o crescimento desordenado das cidades (SANTOS, 2012) essas ações se baseadas em preceitos legais, tornam mais eficazes os trabalhos da Defesa Civil (BRASIL, 2007).

4.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

4.4.1 Hidrogramas de entrada

A geometria criada para cada espaço/problema pode ser observada na Figura 26, nela está representada a calha do rio (*river*), suas junções (*junction*) e suas margens (*bank lines*), as seções transversais (*cross section*) e a área por onde está previsto o fluxo de água (*flow path*).

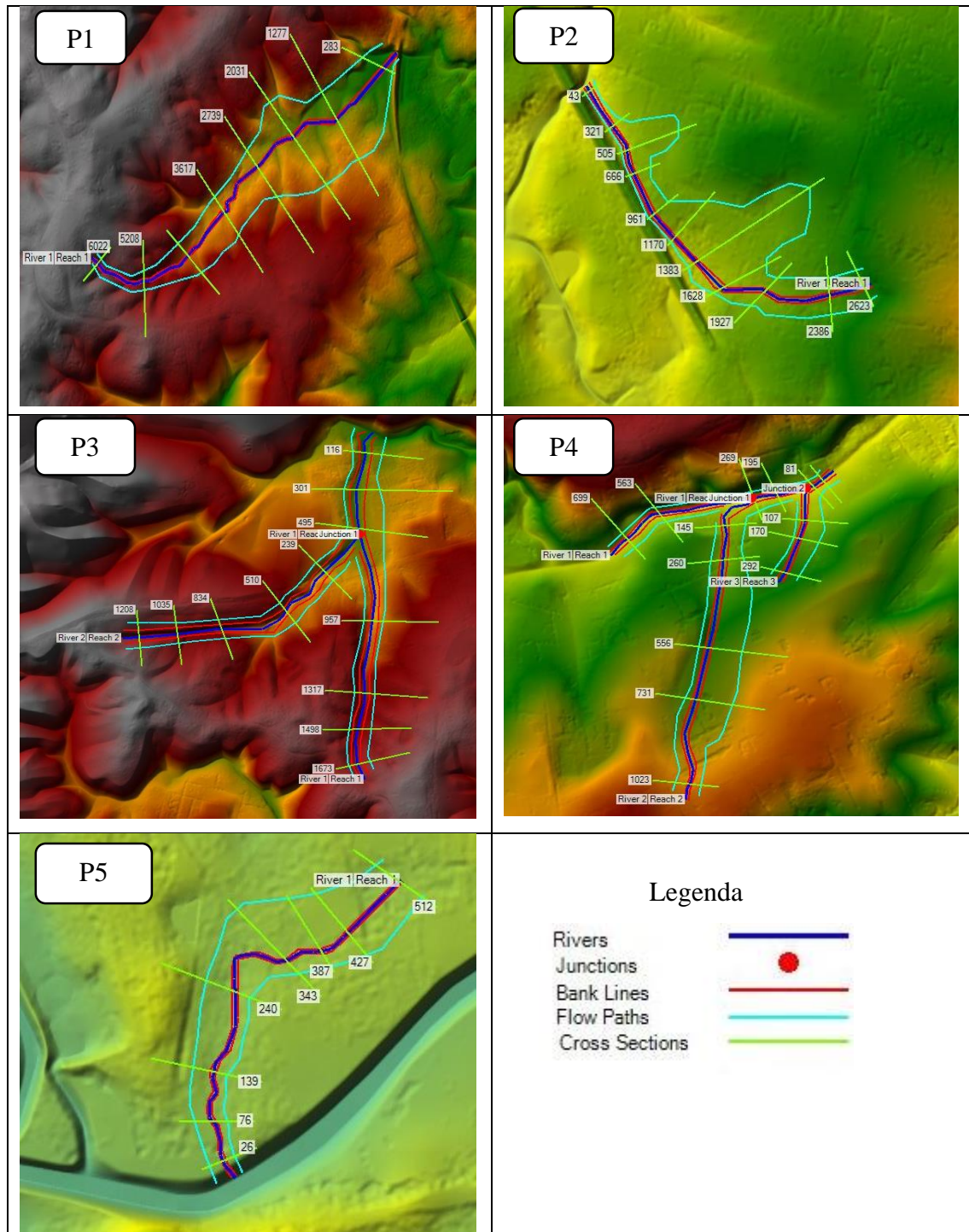


Figura 26 - Geometria para cada espaço/problema.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os cinco espaços/problemas foram visitados a campo (Figura 27) para uma melhor representação de sua geometria. Dois destes pontos estão localizados na sub-bacia do rio Ponte Grande (P1 e P2), dois na sub-bacia do rio Carahá (P3 e P4) e um na inter-bacia Entre Rios (P5). Os pontos 1 e 2 localizam-se em região de baixada, com a presença de banhados e residências próximas ao curso d'água. Enquanto que os outros pontos se situam em áreas planas, propícias ao acúmulo de água. Todos os pontos possuem histórico de inundações.

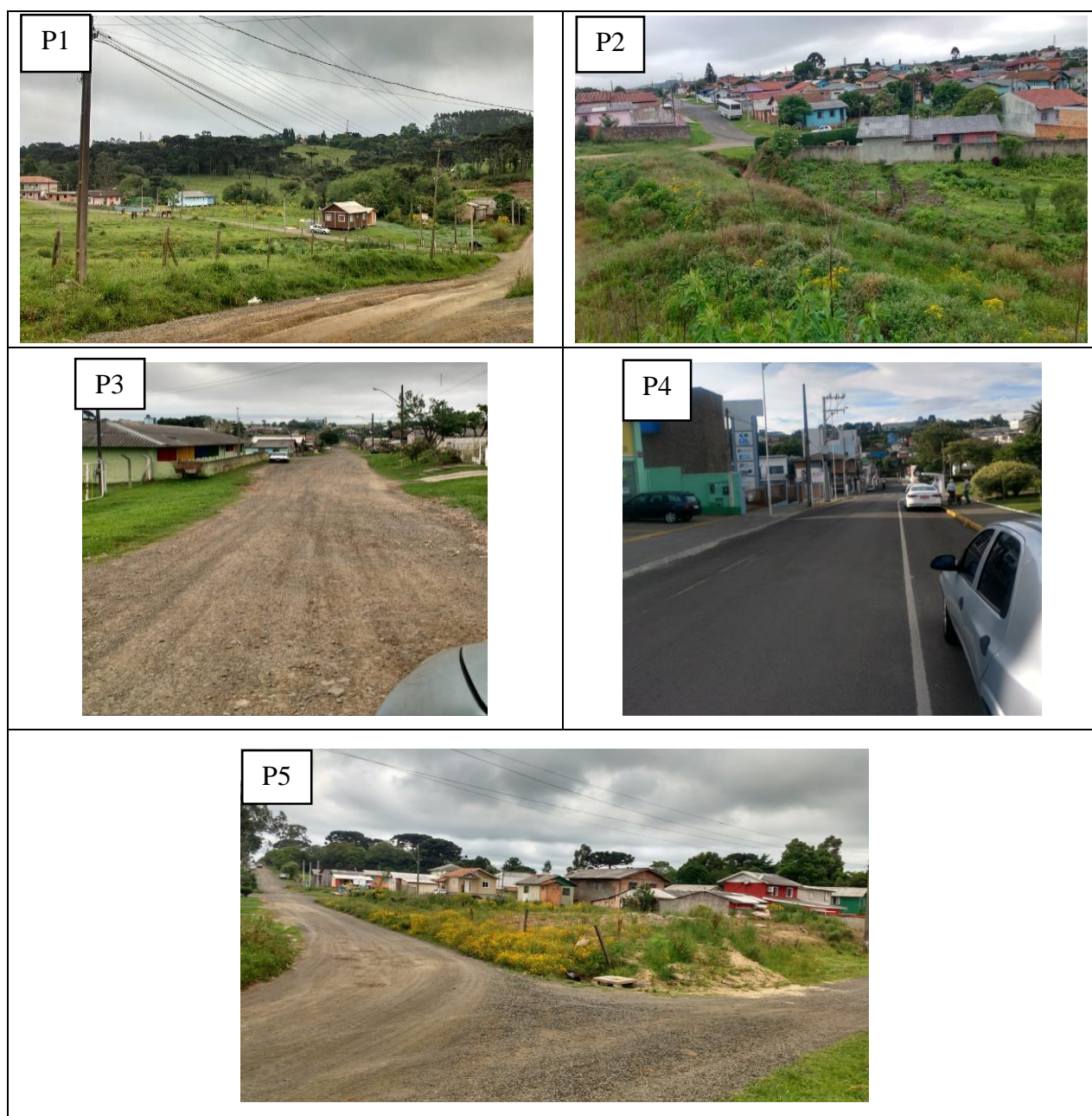


Figura 27 - Espaços/problemas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com os tipos de solos predominantes na região de estudo e as relações estabelecidas por Sartori, Genovez e Lombardi Neto (2005), o grupo hidrológico representativo das sub-bacias Carahá e Ponte Grande e interbacia Entre Rios referem-se ao grupo C. Os solos referentes a esse grupo são moderadamente profundos (0,5 a 2,0 m), com baixa permeabilidade superficial e baixa resistência à erosão (ALVES, 2016).

Após a identificação do grupo hidrológico do solo foi calculado o CN para cada uso e ocupação da terra presente no espaço/problema a fim de se encontrar um valor médio representativo (Tabela 11). O parâmetro CN varia desde uma cobertura muito permeável (CN = 0) em que toda precipitação é absorvida pelo solo até uma cobertura completamente impermeável (CN = 100) em que não há armazenamento de água pelo solo, toda precipitação é convertida em escoamento superficial direto (MILIANI et al., 2011).

Tabela 11 - Valores de CN para os espaços/problemas

Espaço/problema	CN
P1	77,56
P2	89,85
P3	79,51
P4	90
P5	89,28

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O CN expressa as características referentes ao potencial de escoamento superficial nas diferentes superfícies do terreno, a Figura 28 apresenta as porcentagens de uso e ocupação da terra para cada espaço/problema. O espaço/problema 1 tem como principais classes de uso e ocupação a agricultura (37%), campo (36%) e área urbana (15%), os quais possuem CN de 84, 75 e 90, respectivamente, para o grupo hidrológico de solos C, de acordo com Tucci (2009).

O segundo espaço/problema apresenta apenas as classes de agricultura, área urbana e solo exposto, sendo que destes, a área urbana é predominante (97%). Devido a impermeabilização da superfície que ocorre nessas áreas, a infiltração de água no solo é muito baixa, a precipitação é convertida em sua maior parte em escoamento superficial direto, esta condição associa-se com valores altos de CN.

No terceiro espaço/problema tem-se o predomínio de área urbana (38%) seguida pelo campo (31%) e floresta nativa (12%). Sendo assim, a capacidade de geração de escoamento superficial é maior que o espaço/problema 1 e menor que o espaço/problema 2 (CN = 79,51). O quarto espaço/problema, por se localizar no centro da cidade, tem como uso e ocupação

apenas a classe de área urbana, no qual o CN é elevado, em função da baixa capacidade de infiltração de água no solo.

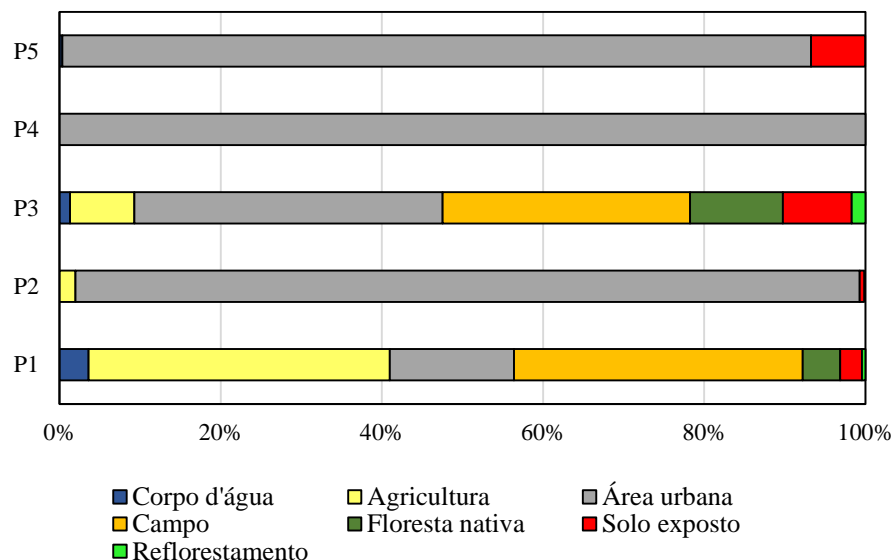


Figura 28 - Uso e ocupação da terra para cada espaço/problema.

Fonte: Adaptado de Liz (2018).

O quinto espaço/problema possui condição parecida com o P4, em que se tem a presença apenas da classe de área urbana (97%) e solo exposto (3%), possuindo valor alto de CN em razão da baixa permeabilidade de áreas com essas características.

O coeficiente de Manning adotado para os canais presentes na área de estudo foi de 0,02 (CHOW, 1959), relativo a canais naturais com vegetação média. Os hidrogramas inseridos em cada espaço/problema estão presentes nas Figura 29 a 33. Cada espaço/problema possui precipitações associada a um determinado intervalo de tempo, além de uma área de contribuição e CN específico, fazendo com que os hidrogramas sejam distintos em cada caso.

No primeiro e segundo espaço/problema (P1 e P2) foi necessário o cálculo de um hidrograma de entrada para cada ponto, já na simulação do terceiro espaço/problema (P3) dois hidrogramas foram inseridos, um para o canal I e outro para o canal II.

No quarto espaço/problema (P4) três hidrogramas foram inseridos, um para o canal principal e depois para os canais secundários. No último ponto (P5) apenas um hidrograma foi necessário ser calculado.

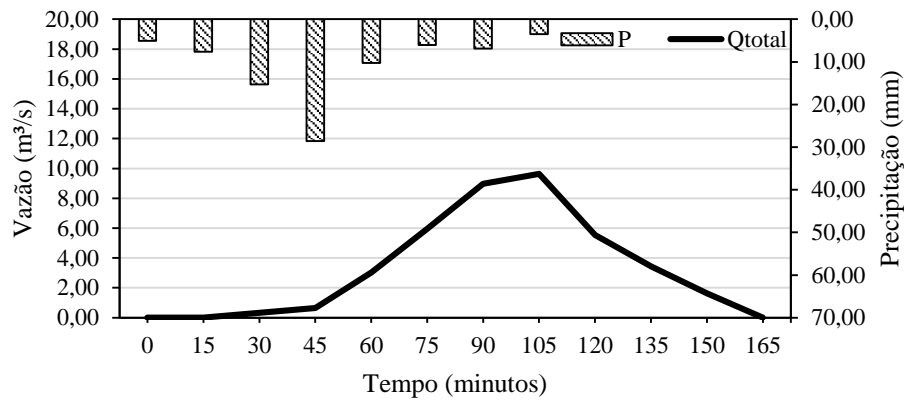


Figura 29- Hidrograma unitário espaço/problema 1.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

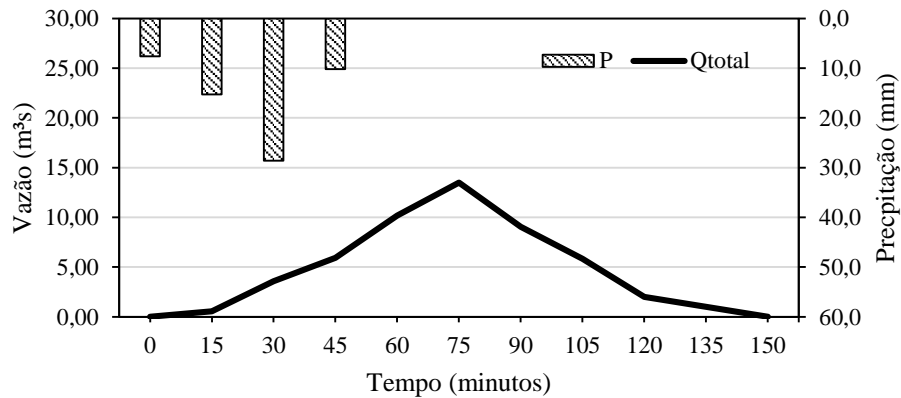


Figura 30- Hidrograma unitário espaço/problema 2.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

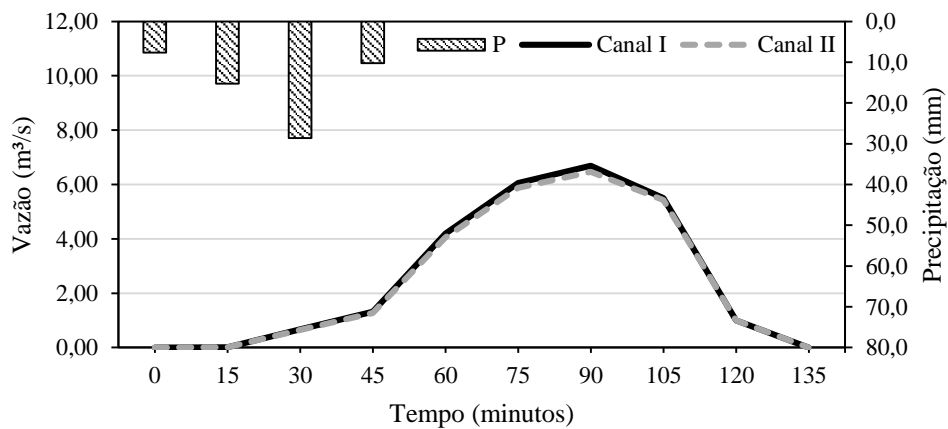


Figura 31 - Hidrograma unitário espaço/problema 3.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

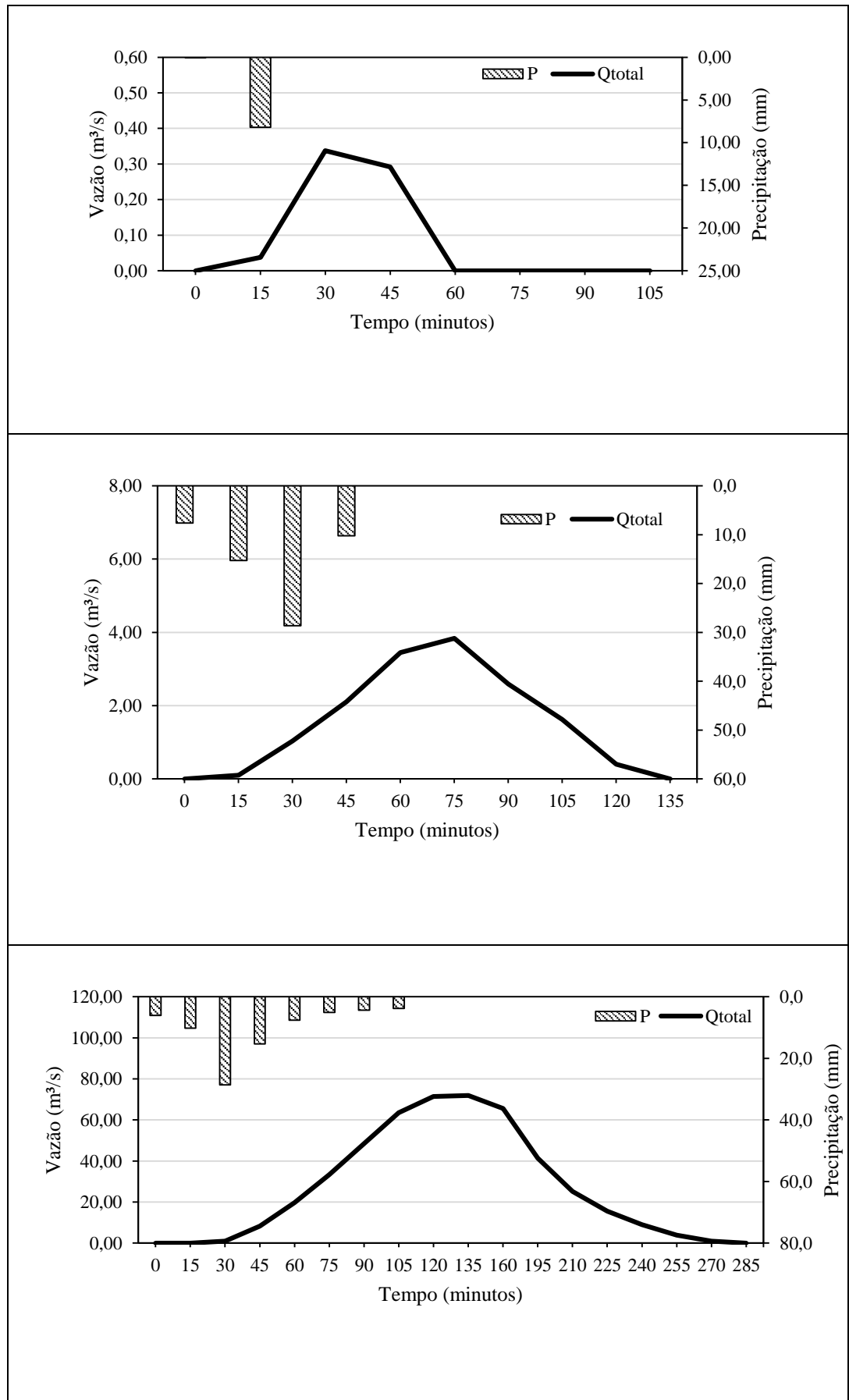


Figura 32- Hidrograma unitário espaço/problema 4.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

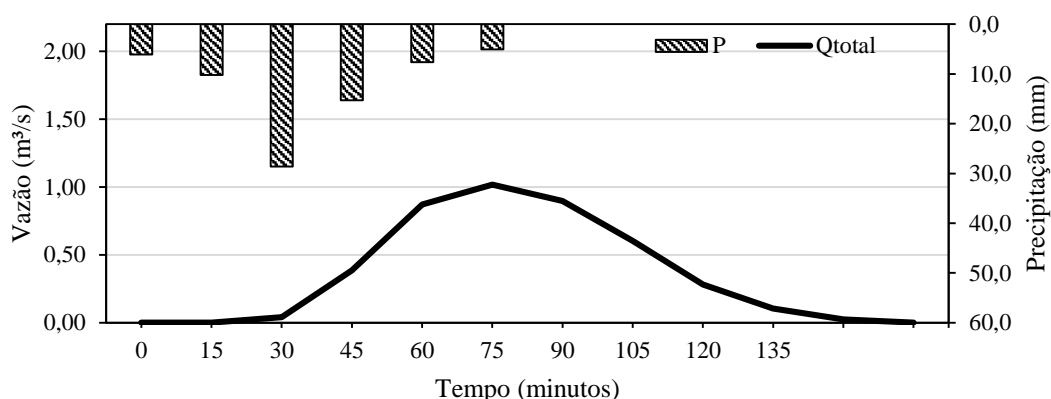


Figura 33 - Hidrograma unitário espaço/problema 5.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O primeiro espaço/problema teve sua vazão máxima aos 105 minutos, sendo esta de $9,63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, já o segundo espaço/problema por apresentar um maior grau de impermeabilidade quando comparado com o primeiro caso, apresentou o pico do hidrogramas em 75 minutos, sendo a vazão correspondente de $13,49 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Os dois hidrogramas do terceiro espaço/problema tiveram comportamento semelhante, sendo as vazões máximas $6,69 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $6,47 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ambas em 90 minutos. O quarto espaço/problema possui três hidrogramas com comportamentos distintos entre si, em função de cada um destes estar relacionado com uma área e tempo de concentração específicos, o pico do hidrogramas ocorreu em 30, 75 e 135 minutos com vazões de $0,34$, $2,84$ e $71,91 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ respectivamente. O quinto espaço/problema teve sua vazão máxima de $1,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ aos 75 minutos.

Pode-se notar a relação entre os hidrogramas e seus respectivos CN's, nos espaços/problemas em que a área de contribuição é ocupada predominantemente por moradias, o terreno encontra-se altamente impermeabilizado, seu valor de CN é alto e a vazão atinge seu pico em um menor espaço de tempo quando comparado com locais que possuem um menor grau de impermeabilização.

4.4.2 Análise de sensibilidade do ITU com relação ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS

A resolução que se apresentou mais adequada para a realização das simulações de acordo com os indicadores numéricos de desempenho binário foi a de 1 m (Apêndice B).

Dados de alta resolução são valiosos, pois permitem que áreas cada vez menores dentro da planície de inundação sejam representadas com precisão (SAVAGE et al., 2016). Resoluções grosseiras estão sujeitas ao efeito de suavização do MDT (SÁ et al., 2015), a qual tende a causar uma redução na declividade do terreno (VALERIANO, 2015). O uso de MDTs com resoluções menos detalhadas podem comprometer medidas preventivas e/ou locais prioritários para alertas, implicando na desvalorização do preço de um lote, ou ainda, dar falsa sensação de segurança (GOERL; MICHEL; KOBAYAMA, 2017).

As superfícies de inundações obtidas nos cinco espaços/problemas foram comparadas com o mapeamento obtido pelo ITU. As áreas simuladas podem ser observadas na Figura 34. A análise visual dos resultados indica uma relação entre ITU altos e os polígonos de inundação. Em todos os pontos simulados a área de inundação abrangeu principalmente os pixels referentes a terceira classe de ITU (>8), definida neste estudo como sendo a indicativa de zonas inundáveis (Figura 35).

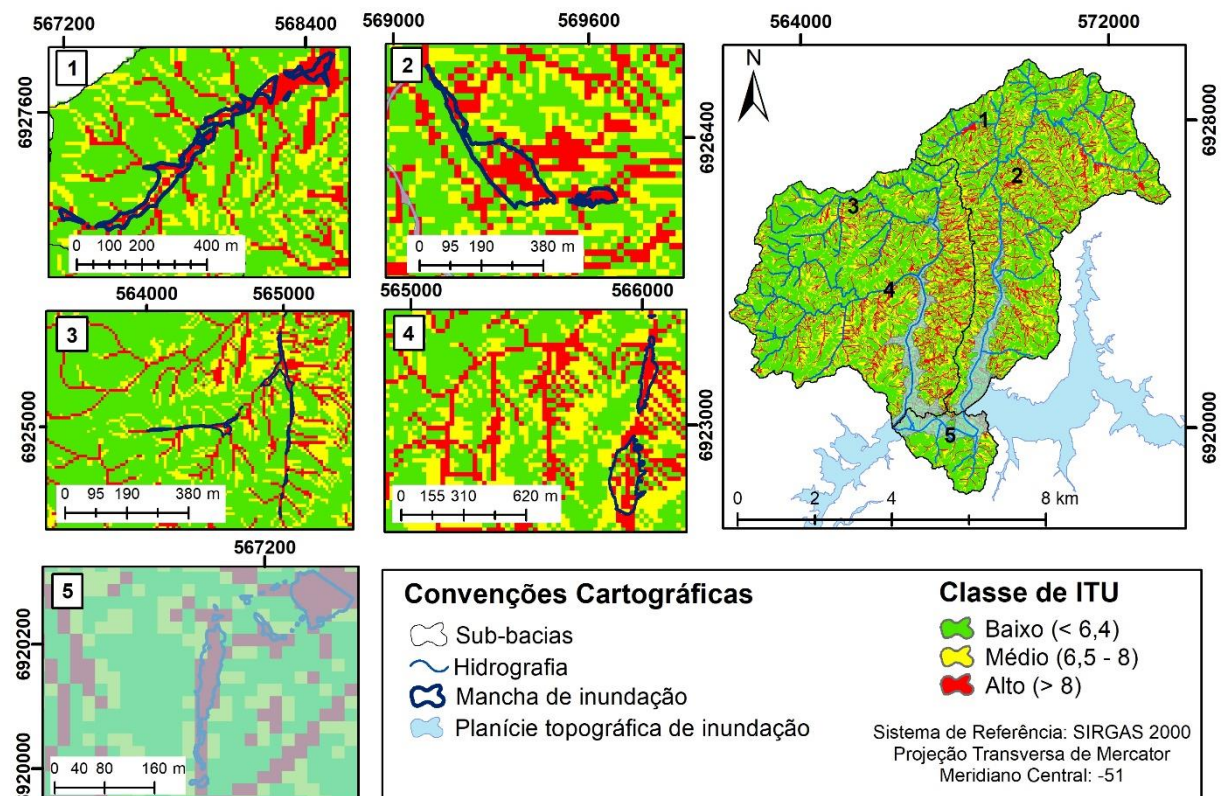


Figura 34 - Área de inundação nos espaços problemas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

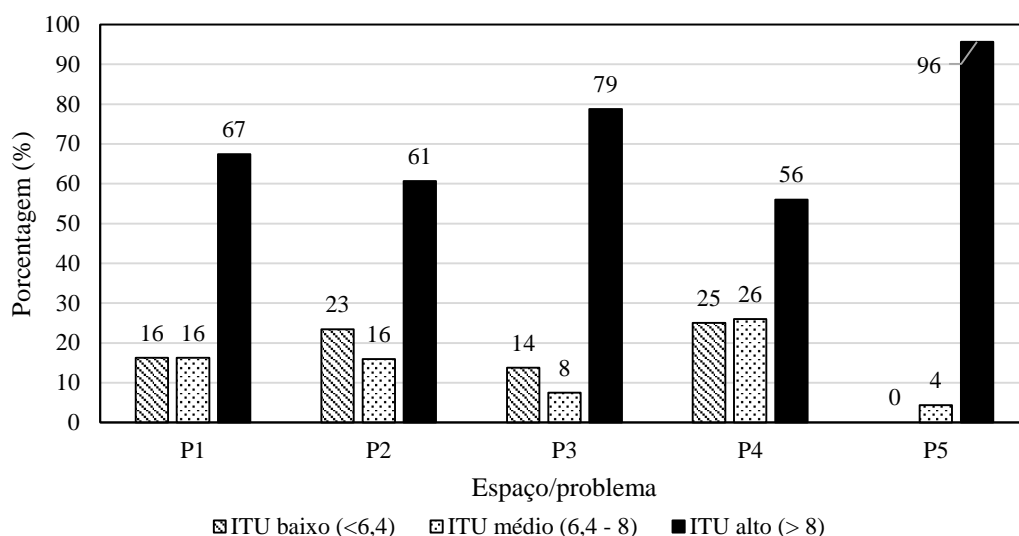


Figura 35 – Porcentagem das classes de ITU abrangidas pelo polígono de inundação nos espaços/problemas. Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em todos os espaços/problemas a correspondência entre o polígono de inundação e a classe alta de ITU foi superior a 50%, o qual indica uma boa predição dos locais classificados como áreas inundáveis de acordo com o índice. No evento de máxima ocorrido no município em 2017, ambos os locais foram afetados pelas inundações, como confirmado pela população local.

A extensão do polígono de inundação no ponto 1 afeta 14 residências³, visto que é uma área mais distante do núcleo populacional. O ponto 2, por sua vez situa-se ao lado do trilho do trem, em um bairro carente e que sofre constantemente com os eventos de máxima, o polígono de inundação hidrodinâmica neste local abrange 114 residências.

Em ambos os pontos o polígono de inundação abrangeu parte dos pixels de índice topográficos de umidade altos. Vale ressaltar que o ITU por possuir valores altos em locais com relevo plano, coincide com os cursos d'água e em muitos desses, considerando que não há ocorrência de inundação quando a água fica contida na calha do rio. Sendo assim, não é visualizado um extravasamento da calha do canal e geração do polígono de inundação pelo modelo hidrodinâmico, mas são locais com potencial de acúmulo de água devido a topografia existente.

O ponto 3 encontra-se mais afastado do núcleo urbano e o ponto 4 localiza-se no centro do município. Em chuvas intensas ambos os pontos são atingidos pelo extravasamento do canal. O polígono de inundação gerado pelo modelo hidrodinâmico se estende por 43 e 209

³ Número de edificações obtidas pelo shapefile de edificações fornecido pelo projeto Hidro-Lages (NETO, 2019d).

residências, respectivamente. O ponto P5 situa-se em uma região bastante afetada por inundações. O polígono de inundação obtido pelo modelo abrange 17 residências.

O tempo de retorno utilizado para a modelagem hidrodinâmica é de extrema importância na caracterização das chuvas intensas e está diretamente relacionado ao polígono de inundação gerado (MONTE et al., 2015), logo diferentes tempos de retornos poderiam representar com maior ou menor fidelidade o ITU. Outro ponto a ser considerado se refere as incertezas hidrológicas decorrentes das simplificações matemáticas ou falta de conhecimento da natureza (MONTEIRO; KOBAYAMA, ZAMBRANO, 2015). Falhas humanas e computacionais também influenciam no grau de exatidão dos resultados obtidos pelo modelo, além da qualidade dos dados de entrada.

A performance do ITU com relação ao modelo hidrodinâmico está presente na Tabela 12. O cenário simulado foi estabelecido como o ITU por ser o método a ser validado. A área inundável observada pode ser relacionada a um polígono obtido no cenário base pré-estabelecido, caso não se tenha um polígono de inundação observado real (VIANINI NETO, 2016).

Tabela 12 - Performance do ITU com relação do modelo HEC-RAS em termos de área e número de pixels para os índices A,B, C e D.

Espaço/ problema	AS (km²)	AO (km²)	AS/AO	A	B	C	D
P1	0,165	0,069	2,37	120	90	58	2700
P2	0,060	0,036	1,64	57	93	37	226
P3	0,077	0,036	2,11	63	131	17	3050
P4	0,049	0,042	1,05	56	56	51	599
P5	0,018	0,010	1,72	22	23	1	154

Nota: AS significa área simulada e AO significa área observada; a letra A indica o número de células corretamente simuladas, B significa o número de células superprevistas, C indica o número de células subprevistas e D indica o número de células não observadas/não previstas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O índice AS/AO indica a relação entre a área simulada e as áreas observadas pelo modelo HEC-RAS. O polígono de inundação obtido no mapeamento do ITU em todos os pontos foi superestimado com relação ao polígono observado. Os agrupamentos de pixels de ITU alto coincidem com a área inundada do modelo HEC-RAS, porém os pixels do mapeamento com o índice topográfico possuem uma resolução de 20m de grade, ocupando uma maior área.

A modelagem hidrodinâmica requer cálculos numéricos complexos, ligados a vários parâmetros de entrada que influenciam em seu procedimento (DI BALDASSARRE, UHLENBROOK; 2012), portanto, a previsão de eventos de inundação pode não ser precisa.

Um dos fatores que justifica a baixa correspondência entre o modelo observado e o simulado refere-se ao grande número de pixels com valores de índice topográfico alto e sem área de inundação observada (letra B). Parte desses rasters são canais em que a água se limita a calha natural e não ocorre o seu extravasamento, ou seja, são áreas com potencial natural de acúmulo de água (IT alto) em função da declividade e área de contribuição, mas que esta não forma uma planície em que ocorre inundação.

Outro aspecto é que o ITU não leva em consideração a distância dos cursos d'água, isso faz com que seja atribuído valores altos de ITU em locais planos, mas com altitudes elevadas (platôs). Nestes locais, o potencial de acúmulo de água não está associado com os canais e, portanto, não é indicado na modelagem hidrodinâmica.

Os índices de desempenho associados à avaliação do modelo simulado com relação ao polígono de inundação obtido pelo modelo HEC-RAS estão presentes na Figura 36. O Viés próximo a 1 obtido nos pontos 1 e 4 indicam que estes dois pontos foram os que representaram com maior fidelidade o cenário observado. Em ambos os pontos o erro por comissão dos dados foi maior que os erros de omissão, pois seu valor encontra-se acima de 1, o que indica que o ITU superestimou a área de inundação.

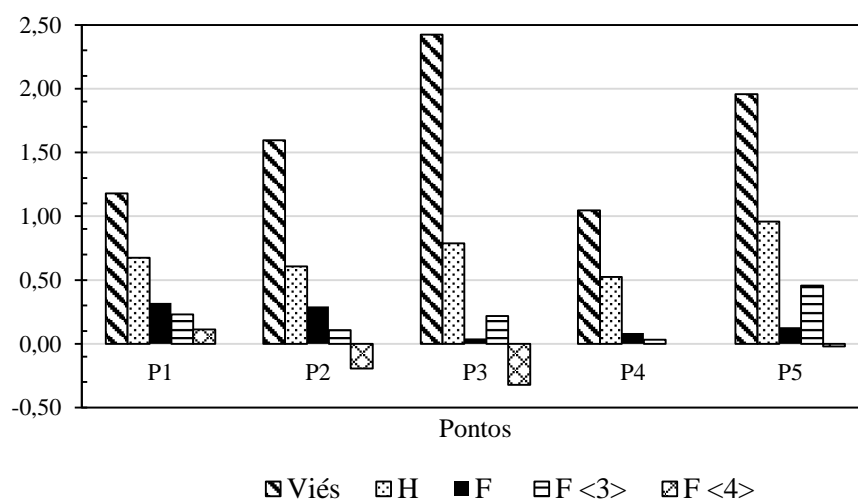


Figura 36 - Índices de desempenho atrelados ao ITU para a área observada no modelo HEC-RAS.
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O índice da medida de acerto (H) aponta que em todos os pontos houve coincidência entre o cenário simulado e observado superior a 50%, com ênfase para o ponto 5 em que 95% da área inundada foi corretamente prevista pelo índice topográfico.

O percentual de áreas secas incorretamente previstas foi baixo, indicadas pelo índice F. O maior número de pixel referente ao item B fez com que o parâmetro $F^{<3>}$ apresentasse

valores superiores ao $F^{<4>}$ em todos os pontos, dessa forma, houve uma superpredição de dados pelo ITU.

O ITU não utiliza variáveis que incorporem os diferentes parâmetros utilizados no modelo hidrodinâmico, como características do uso e ocupação da terra, as quais estão relacionadas ao grau de impermeabilidade do terreno e no favorecimento, ou não, dos processos de inundação.

Outro aspecto se refere a incertezas hidrológicas relacionadas ao método chuva-vazão. As relações de intensidade, duração e frequência da precipitação pluvial tem como base as chuvas convectivas, as quais são intensas e de curta duração, abrangendo áreas relativamente pequenas, causando, portanto, alagamento em pequenas bacias hidrográficas (MELLO; VIOLA, 2013). Sendo assim, este método não é aplicável em eventos de maior duração associados a intensidade de chuva baixa a moderada, podendo apresentar incoerências.

Pelos resultados do índice dependerem unicamente do modelo digital do terreno, é esperado diferenças nos polígonos de inundações obtidos por cada modelo. Contudo, o uso do índice continua a ser interessante na ausência de dados ou recursos que permitam delimitar zonas inundáveis com uso de modelos hidrodinâmicos, que definem tais áreas com maior precisão.

4.5 MODELO HAND

O resultado da simulação do modelo HAND é estreitamente relacionado com a qualidade (resolução espacial) do dado topográfico (MOMO et al., 2016). O modelo HAND normaliza a rede de drenagem e iguala as células com a mesma distância vertical relativa ao canal, independentemente se essas células estão em diferentes alturas topográficas (RENNÓ et al., 2016) logo, resoluções grosseiras, sujeitas ao efeito de suavização do terreno, afetam diretamente nos valores HAND.

A superfície de inundação gerada com o MDT de 1 m foi de 9,95 km², a qual coincide com 85% dos pontos verificados a campo em locais com registro de inundações (Figura 37). O HAND, enquanto modelo geomorfológico que indica locais do terreno sujeitos à inundação, está sendo estudado como preditor de perigo de desastres hidrológicos (MILANESI; QUADROS; LAHM, 2017). No Brasil o algoritmo foi aplicado para a delimitação do terreno sujeito à inundação nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro (NOBRE et al., 2010).

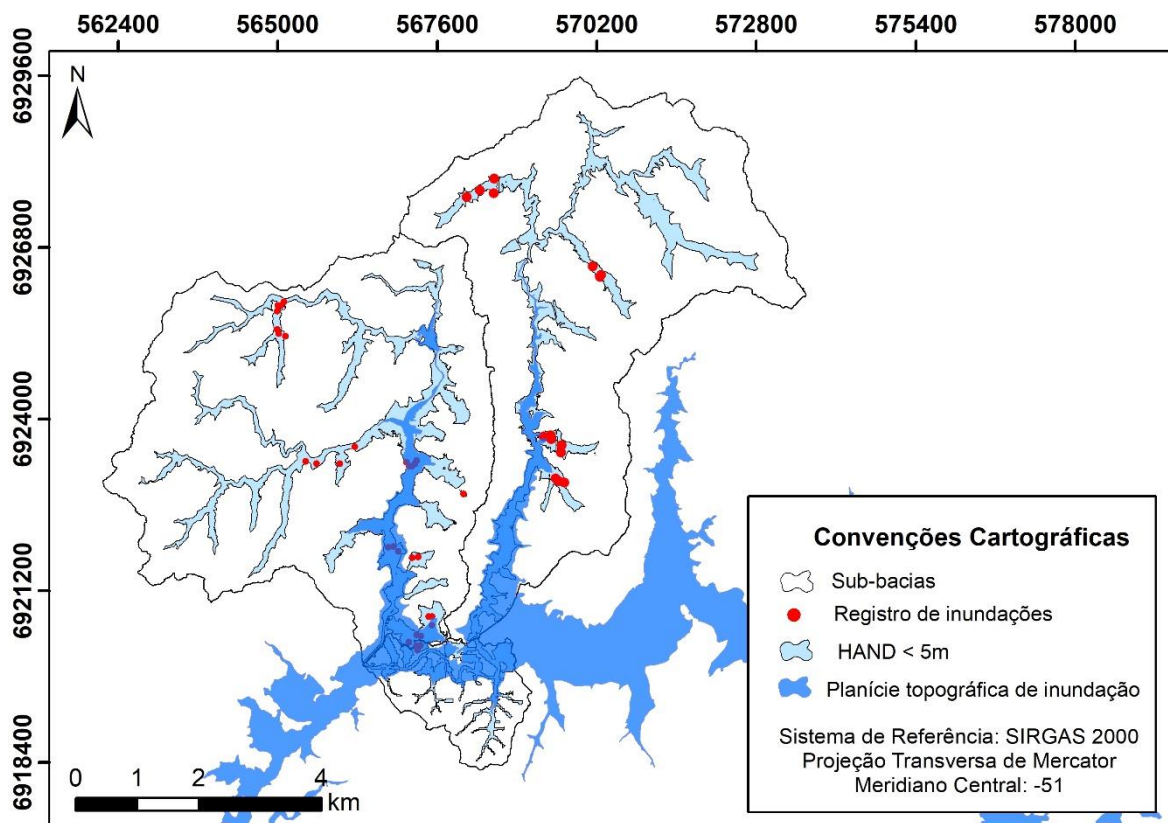


Figura 37 - Polígono de inundação para a área de estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A área de inundação gerada para a sub-bacia do rio Carahá é a que abrange um maior número de edificações, sendo este número igual a 9.946. A área de inundação da sub-bacia do rio Ponte Grande engloba 2.991 edificações e 257 edificações pela área de inundação da inter-bacia Entre Rios de acordo com o levantamento feito em 2014 pelo Sistema de Informações Geográficas Municipal - GEO Lages.

A comparação entre o mapeamento do ITU e o cenário observado (polígono de inundação gerado pelo modelo HAND) na área de estudo estão presentes na Figura 38. Pode-se notar que, embora o cenário simulado e o cenário observado coincidam parcialmente, houve uma subestimação pelo ITU. Esse resultado também foi observado por Bressiani, Schmidt e Perreira (2018) em que o modelo HAND aumentou as áreas de classe de vulnerabilidade alta em comparação ao índice topográfico, implicando em maiores áreas de acúmulo.

Um dos fatores que justificam este comportamento é que apesar de possuírem formulações semelhantes, o ITU se baseia na declividade e na área específica de contribuição da unidade hidrológica da paisagem, enquanto o modelo HAND, a distância vertical até à rede de drenagem mais próxima.

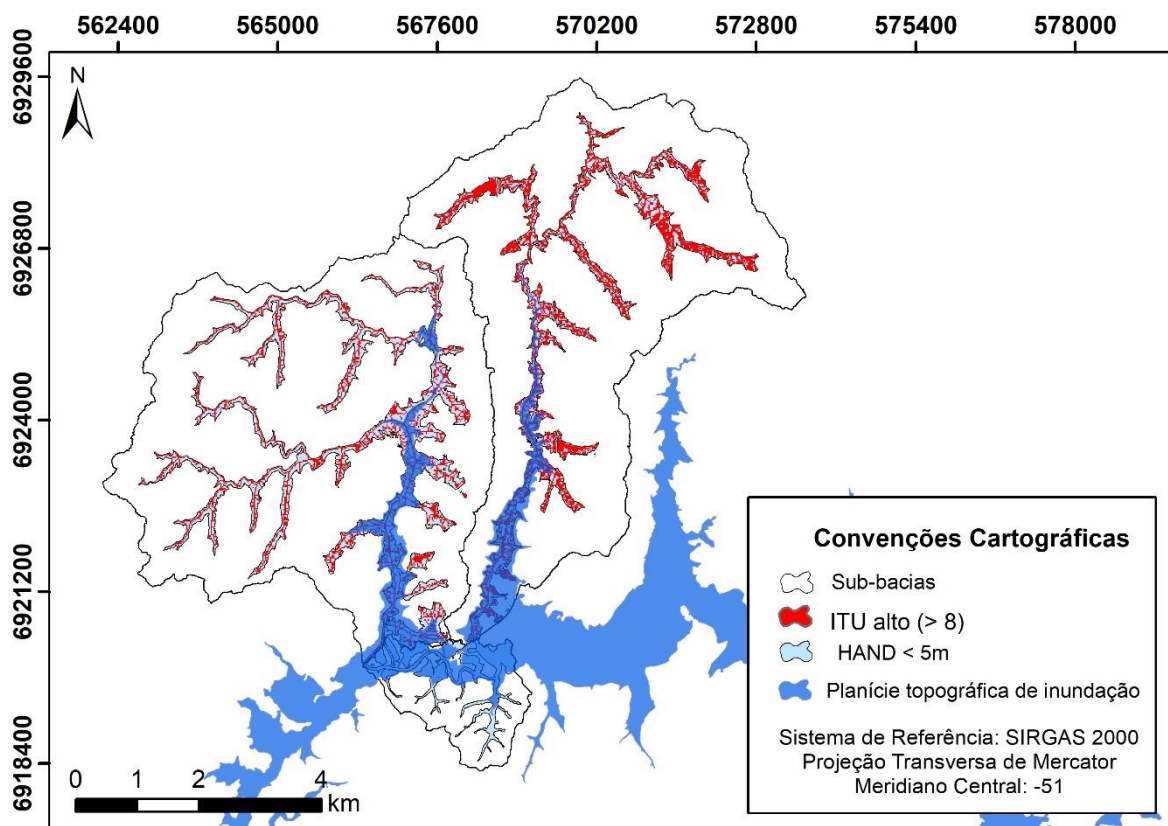


Figura 38 – Comparação entre o cenário observado e o cenário simulado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em sua formulação o modelo HAND pode atribuir valores semelhantes para zonas inundáveis planas ou íngremes, apesar de sua declividade se distinguir em cada caso. Gharari et al. (2011) colocam que as zonas inundáveis identificadas pelo HAND exigem uma subdivisão em zonas inundáveis planas, caracterizadas por declives modestos e zonas inundáveis inclinadas em que o terreno é consideravelmente inclinado ao longo da direção de fluxo.

Descritores de terreno apresentam uma quantidade significativa de informações sobre a exposição a fenômenos de inundação, principalmente no que diz respeito ao comportamento da propagação da onda de inundação (MANFREDI et al., 2014). Segundo o INPE, no entanto, falhas no modelo podem ocorrer devido às incertezas provenientes do MDT (INPE, 2019).

Classes de suscetibilidade a inundação podem ser adotadas para um determinado limiar de fatiamento HAND, pois pelo seu princípio de funcionamento, quanto menor a variação altimétrica entre um determinado ponto e o canal mais próximo, maior o seu potencial de inundação. Para classificar a área inundada em alta, média e baixa suscetibilidade a

inundação, foram adotados os valores propostos por Goerl; Michel; Kpbiyama (2017) variando de 0m a 5,5m (Figura 39).

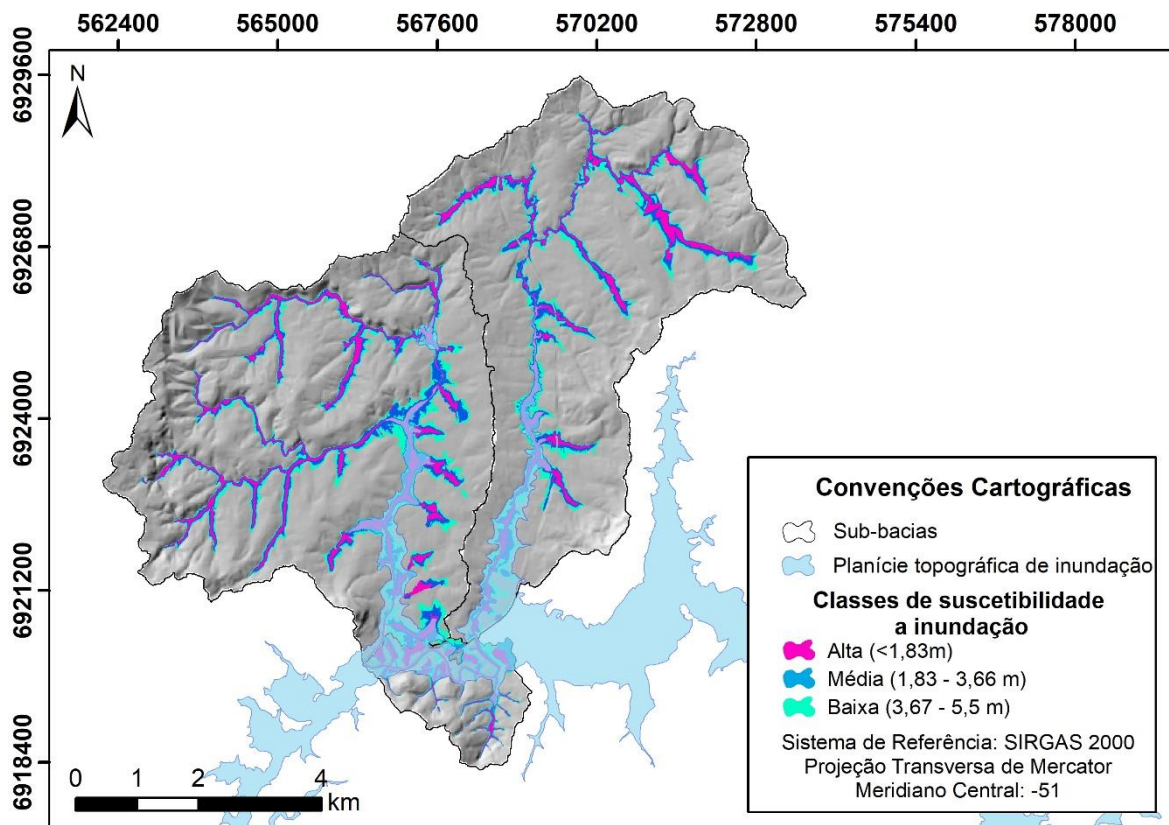


Figura 39 - Classes HAND de suscetibilidade a inundação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A classe alta de suscetibilidade a inundação compreendem a áreas com distância vertical de até 1,83 m do curso d'água mais próximos, pode-se observar que nas áreas mais planas a um adensamento do polígono de inundação. Este fato reforça a relação entre a vulnerabilidade à inundação e a ocupação urbana localizada em planícies inundáveis (MILANESI; QUADROS; LAHM, 2017).

A classe de média e baixa suscetibilidade a inundação ocupam áreas com menores proporções, quando comparada a classe alta. Devido as características altimétricas da sub-bacia pode-se notar na porção noroeste e sul da sub-bacia do rio Carahá um polígono de classe média e baixa que se sobressai aos demais.

Os valores de ITU alto, representativo dos locais com potencial acúmulo de água, coincidem com a classe de suscetibilidade alta de inundação do modelo HAND (Figura 40). A mesma relação ocorre com a classe de suscetibilidade baixa que coincide com a classe de ITU baixo. Na classe de suscetibilidade média não houve relação com o ITU, porém pode-se notar

que quanto menor a suscetibilidade a inundação, menor a quantidade de células representativas do ITU alto e maior a quantidade de células representativas de ITU baixo.

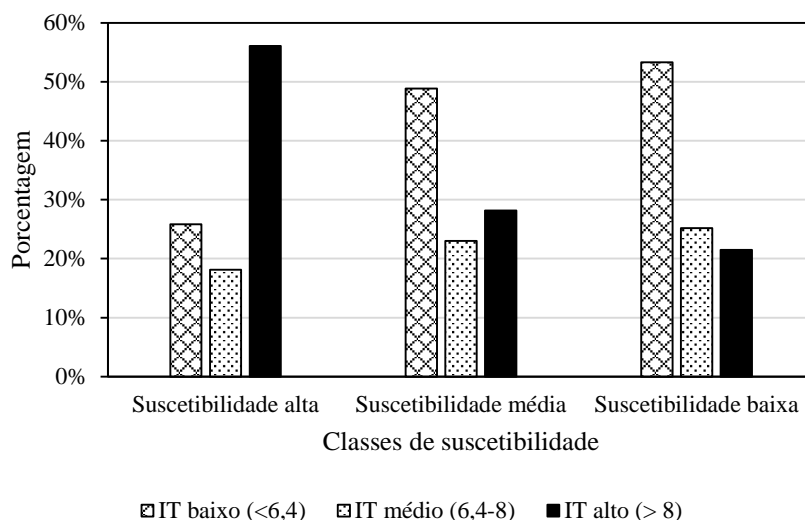


Figura 40 - Relação entre as classes de suscetibilidade HAND e o ITU.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Apesar de não considerar a distância vertical até os canais próximos em sua formulação, Prates, Souza e Junior (2012) evidenciaram que valores baixos de ITU são característicos de solos bem drenados e estes, possuem distância vertical até o canal mais próximo de até 25 m. Valores altos de ITU apresentaram menor distância vertical, variando de 0,01 a 1,27 m.

Locais próximos verticalmente de canais de drenagem, são caracterizados como solos mal drenados (ROMÃO, 2006) em que o lençol freático apresenta-se próximo da superfície (BÖHNER et al.; 2002) e, portanto, possuem alta concentração de umidade, sendo indicado pelo ITU com valores superiores a 8 e classe HAND indicativa de áreas de inundação.

Os locais com acúmulo de pixels altos de ITU apresentam pouca variação altimétrica com relação ao canal mais próximo, o que configura a classe de suscetibilidade alta de inundação pelo modelo HAND (Figura 41). O ITU apresenta uma subestimativa em 24% da área de inundação, observada principalmente ao entorno dos canais principais. Enquanto o polígono de suscetibilidade alta gerada pelo modelo HAND ocupa uma área de 0,50 km² o índice topográfico alto acusa 0,38 km².

O ITU caracteriza as zonas de saturação de água superficial e o conteúdo de água nos solos (PEI et al., 2010), diversos estudos reconheceram uma correlação entre solos hidromórficos e valores de índice topográfico altos, entre 7 e 12 (KUNTZ, 2017; REGO, 2013; PRATES; SOUZA; JUNIOR, 2012).

Solos mal drenados encontram-se verticalmente próximos aos canais (ROMÃO, 2006), sendo assim, o conhecimento sobre o seu teor de umidade está relacionado como uma maior ou menor suscetibilidade de determinada área a inundações.

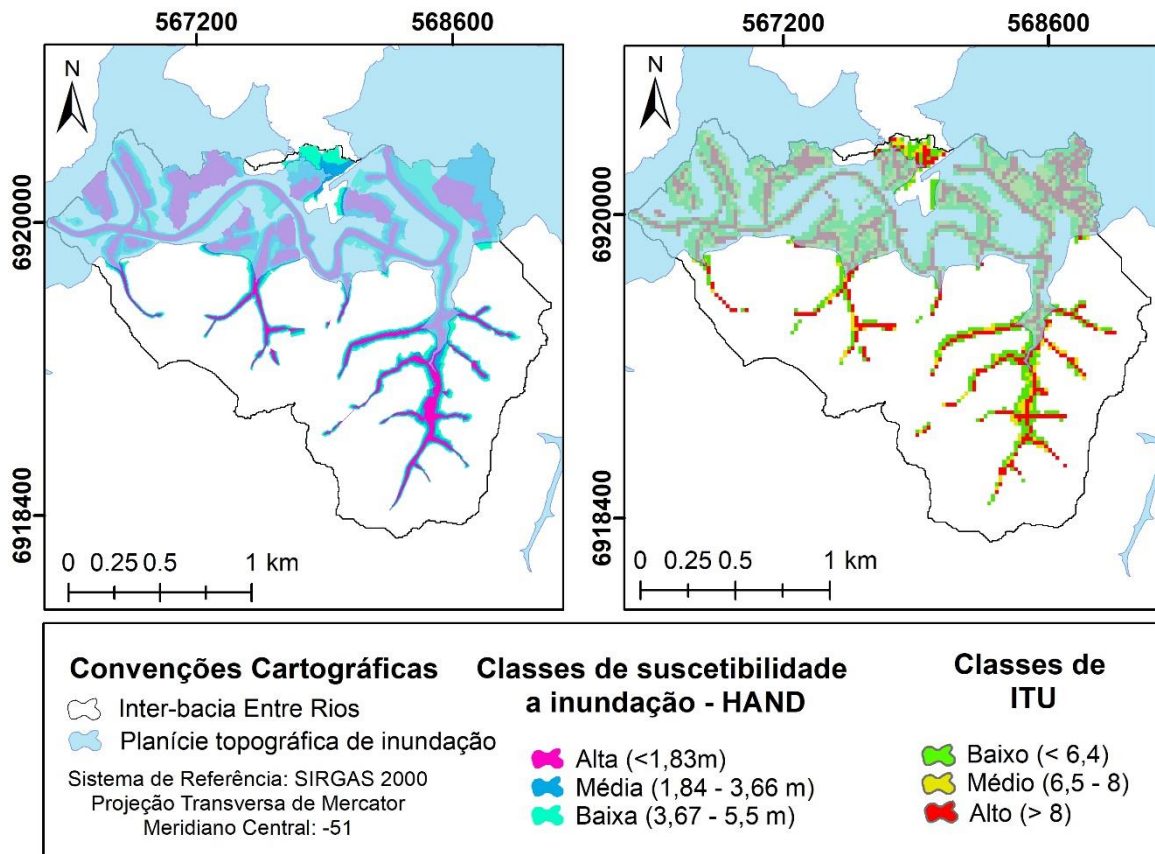


Figura 41 - Relação entre as classes de suscetibilidade de inundação e o ITU na inter-bacia Entre Rios.
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Índices de representação da paisagem podem ser utilizados como apoio na identificação e delimitação de áreas inundáveis como uma abordagem alternativa a modelos hidráulicos, por exemplo, HEC-RAS, que possui um processo intensivo e requer grande quantidade de dados (ZHENG et al., 2017).

4.5.1 Análise de sensibilidade do ITU com relação ao modelo HAND

A performance do ITU com relação ao modelo HAND está presente na Tabela 13. O índice AS/AO abaixo de 1 indica que em ambas as áreas de estudo o ITU subestimou a área de inundação proveniente do modelo HAND.

O polígono de inundação obtido pelo modelo HAND abrange uma maior quantidade de pixels quando comparado com a área ocupada por ITU alto. Apesar de ambos os modelos se

basearem na topografia do terreno e terem usado a mesma resolução de grade, um dos fatores que justifica esse comportamento é que o modelo HAND, diferente do ITU, considera em sua formulação a distância até o curso d'água mais próximo.

Tabela 13 – Performance do ITU com relação do modelo HAND em termos de área e número de pixels para os índices A,B,C e D.

Área de estudo	AS (km ²)	AO (km ²)	AS/AO	A	B	C	D
Sub-bacia Ponte Grande	1,467	5,08	0,288	3662	8106	5879	50165
Sub-bacia Carahá	1,836	3,82	0,481	4589	7228	8111	55318
Inter-bacia Entre Rios	0,377	1,06	0,355	942	360	1680	6386

Nota: AS significa área simulada e AO significa área observada; a letra A indica o número de células corretamente simuladas, B significa o número de células superprevistas, C indica o número de células subprevistas e D indica o número de células não observadas/não previstas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os valores de ITU alto apresentam uma distribuição semelhante aos cursos d'água (BRESSIANI, 2016), porém tem como variável única o modelo digital de terreno (SILVA, 2012). Valores de ITU médio e baixo em alguns casos foram considerados como pixels inundáveis pelo modelo HAND (letra C).

Na Figura 42 apresentam-se os índices de desempenho associados à avaliação da simulação HAND. Na sub-bacia do rio Ponte Grande houve uma superestimativa da área de inundação (Viés superior a 1) retratada pela área de células pertencentes a letra B, serem maiores que a área representada pela letra C. O valor de Viés baixo na inter-bacia Entre Rios indica uma maior subpredição de áreas, o modelo observado aponta uma área de inundação não evidenciada pelo ITU.

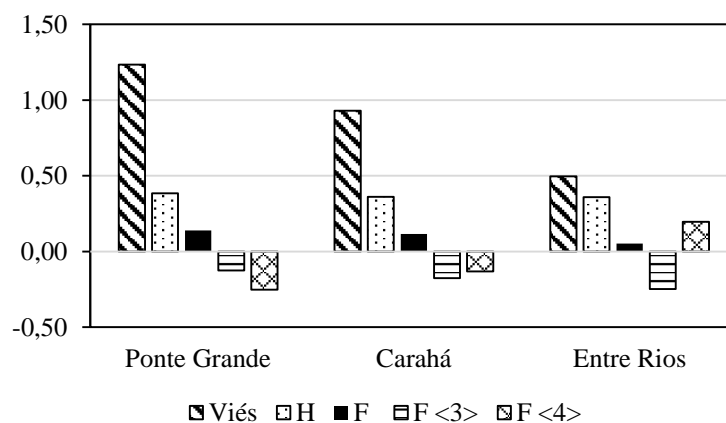


Figura 42 - Índices de desempenho atrelados ao ITU para a área observada no modelo HAND.
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O índice da medida de acerto (H) reflete a capacidade do modelo em simular a área efetivamente inundada, mas não inclui a área não inundável que foi simulada corretamente, apenas o percentual da cheia corretamente previsto e este ficou em torno de 40% em ambos os locais de estudo.

Esse fato pode estar relacionado com a qualidade do MDT utilizado. Embora que a resolução espacial do MDT seja de 1m, isso não implica necessariamente na alta qualidade do MDT, uma vez que este depende de outros fatores, como o método de obtenção.

Apesar da representação do MDT possa realizar-se com mais ou menos exatidão, dependendo do método de coleta de dados utilizados; os modelos são criados, distribuídos e usados muito frequentemente sem qualquer referência à magnitude do erro ou ao método aplicado para sua detecção ou correção (FELICÍSIMO, 1994).

Erros presentes em um MDT podem confundir as relações esperadas entre atributos do terreno computados e as condições locais. Esses problemas podem ser amplificados quando atributos de primeira e segunda ordens são computados (BOLSTAD; STOWE, 1994) sendo encontrados, usualmente, problemas mais sérios quando atributos secundários são derivados (CHAGAS et al., 2010).

Os baixos valores obtidos para F indicam que poucas células foram incorretamente previstas. Os parâmetros $F^{<3>}$ e $F^{<4>}$ indicam uma maior subestimativa da cheia pelo índice topográfico, porém em níveis baixos.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A indicação de áreas com potencial acúmulo de água, suscetíveis as ocorrências de inundação, contribuem para o processo de planejamento do espaço territorial na determinação do uso e ocupação da terra adequada, além da adoção de medidas de caráter preventivos que possuem potencial de minimizar e/ou evitar impactos de ordem econômica, social e ambiental.

O índice topográfico de umidade obtido a partir da resolução de 20m de grade apresentou uma distribuição espacial mais condizente com o histórico de inundação do município quando comparada com as resoluções de 5, 50 e 100m.

Os erros associados a omissão ou comissão dos valores de ITU com as informações verificadas a campo estão relacionados com imprecisões na geração de MDT e a interferências naturais e humanas que eventualmente foram desenvolvidas na área de estudo. É importante levar em consideração as limitações do uso do ITU isoladamente, tendo em vista que ele não considera em sua equação as variações no uso e cobertura da terra e nem pelos tipos de solo, dependendo unicamente do MDT, inerentes a transformações ocorridas no terreno, os resultados podem diferir da realidade observada em alguns pontos.

A classe de valores de ITU alto foi a que melhor representou as áreas de inundação geradas pelo modelo hidrodinâmico HEC-RAS, porém houveram variações na porcentagem de acerto para cada espaço/problema. Essas variações são justificadas pelo modelo hidrodinâmico depender de uma série de dados de entrada que influenciam diretamente no polígono de inundação obtido. Apesar de ser um modelo consolidado para esse tipo de mapeamento, qualquer falha humana ou computacional no pré-processamento resulta em resultados mais ou menos satisfatórios, além das incertezas associadas a metodologia hidrológica.

O ITU subestimou as áreas de inundação com relação ao modelo HAND. Ambos mapeamentos são gerados a partir de modelos digitais de terreno e possuem formulações semelhantes, porém o estabelecimento de um limiar de distância vertical das células até o canal mais próximo faz com que a distribuição de classes HAND seja mais uniformemente distribuída ao entorno dos corpos d'água.

O ITU, ao determinar o potencial de drenagem do terreno, estabelece uma relação da proximidade vertical até os canais. Essa semelhança entre os modelos é observada pelas classes de ITU adotadas coincidirem em grande parte com as classes HAND de suscetibilidade a inundação. Apesar das vantagens em se utilizar o ITU, o modelo morfológico HAND demonstrou ter uma aplicação ainda mais pratica e rápida, além de sua facilidade na

interpretação dos resultados ser intuitiva, já que normalmente espera-se que quanto mais próxima a um canal, maior a probabilidade de ocorrência de inundações.

A utilização de índices de representação da paisagem é atrativa na determinação a priori de zonas urbanas inundáveis, além de apresentar desempenho considerável, a obtenção do ITU requer poucos dados de entrada, seu processamento é consideravelmente rápido e menos complexos do que o realizado em modelos hidrodinâmicos, por exemplo. Entretanto, os resultados apresentados não garantem a sua utilização isolada como indicador de zonas urbanas inundáveis na unidade hidrológica da paisagem.

Esse mapeamento pode ser utilizado por gestores municipais no estabelecimento de políticas públicas territoriais e ambientais para contribuir no planejamento do espaço e no processo de tomada de decisões atuando com caráter preventivo na gestão de desastres hidrológicos. Ressalta-se que a obtenção desse mapeamento não isenta a realização de estudos mais detalhados e específicos na unidade hidrológica da paisagem quando este for necessário, mas constitui-se como um instrumento complementar para ser consultado e discutido.

Sugere-se para estudos posteriores, a inclusão da análise de sensibilidade do ITU para diferentes tempos de retorno na modelagem hidrodinâmica, a fim de se obter resultados mais satisfatórios. Simulações bidimensionais para os espaços/problemas podem ser realizadas para verificar o comportamento do movimento da água na paisagem e se esse, difere do polígono de inundação obtido com o modelo unidimensional.

Recomenda-se ainda o ajuste do polígono de inundação obtido pelo modelo morfológico HAND com os dados verificados a campo, para que se adote um limiar com maior representatividade possível das áreas atingidas por eventos de máxima.

Outro aspecto refere-se à validação dos modelos propostos com cenários reais observados, a exemplo de imagens de satélite, fotografias aéreas e dados levantados a campo, para uma predição de qual modelo é o mais representativo das inundações ocorridas no município de Lages.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELBASSET, M. et al. Integration of gis and hec-ras in floods modeling of the ouergha river, northern morocco. **European Scientific Journal**, v. 11, n. 2, p. 196-204, 2015.
- AGNEW, L. J. et al. Identifying hydrologically sensitive areas: Bridging the gap between science and application. **Journal of Environmental Management**, v. 78, p.63-76, 2006.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- ALVES, G. J. Aplicabilidade do método CN-SCS a uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos no sul de MG. 156p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- ANACONA, P.I.; MACKINTOSH, A.; NORTON, K. Reconstruction of a glacial lake outburst flood (GLOF) in the Engaño Valley, Chilean Patagonia: Lessons for GLOF risk management. **Science of The Total Environment**, v. 527, p. 1-11, 2015.
- ARYAL, S.; BATES, B. Effects of catchment discretization on topographic index distributions. **Journal of Hydrology**, v. 359, p. 150-163, 2008.
- ARONICA, G.; BATES, P. D.; HORRITT, M. S. Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 10, p. 2001-2016, 2002.
- ARRIGHI, C., et al. Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modelling and census data. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** v.13, p.1375–1391, 2013.
- BACK, J. A.; HENN, A. OLIVEIRA; J. L. R. Heavy rainfall equations for Santa Catarina, Brazil. **R. Bras. Ci. Solo**, v.35, p. 2127-2134, 2011.
- BALLERINE, C. Topographic Wetness Index Urban Flooding Awareness Act Action Support Will and DuPage Counties, Illinois. **Contract Report**. v.2, 2017.
- BAPTISTA, M. B.; et al. **Hidráulica Aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH. 621 p. v. 8. 2003.
- BATES, P.; DE ROO, A. P. A simple raster-based model for flood inundation simulation. **Journal of Hydrology**, v. 236, n.1-2, p.54–77, 2000.
- BATES, P.D. et al. Simplified two dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications. **Coastal Engineering**, v. 52, p. 793-810, 2005.
- BEHRENS, T. et al. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping, *Geoderma*, v.155, p.175–185, 2010.
- BEVEN, K. J. et al. **Topmodel**. In: SINGH, V. P. Computer Models of Watershed. 1 ed. Local: Water Resources Publication, p. 627 – 668, 1995.

BEVEN, K. J. et al. Testing a Physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.69, p. 119-143, 1984.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrol. Sci. Bull.**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

BITAR, O. Y. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações 1:25.000: nota técnica explicativa**. São Paulo: IPT, 2014. 124p.

BRASIL. (2001, 11 de julho). Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, seção 1, edição nº 133.

BRASIL. Ministério das Cidades. Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. (2007). Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios. In C. S. Carvalho, E. S. Macedo, & A. T. Ogura (Orgs.), Gerenciamento de áreas de risco: medidas estruturais e não-estruturais (p. 125-139). Brasília.

BRASIL. Lei nº 12.608/2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm>. Acesso em: 14 set. 2019.

BRESSIANI, J. X. Delimitação de áreas variáveis de afluência em ambientes de microbacias urbanas através da comparação dos métodos TauDEM e HAND. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

BRESSIANI, J. X; SCHMIDT, M. A. R.; PEREIRA, C. E. **Identificação de Áreas Urbanas Inundáveis pela Avaliação de Áreas Variáveis de Afluência**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. v. 41, p. 677-684. 2018.

BOBOC, N. et al. **Utilization of the HEC-RAS for flood wave modeling on example of the Prut River**. Geographic Information Systems. Vulnerability and risk assessment using GIS Cluj-Napoca, Romania, p. 71-76, 2012.

BÖHNER, J. et al. Soil Regionalisation by means of terrain analysis and process parameterisation. In: MICHELI, E.; NACHTERGAELE, F.; MONTANARELLA, L. (Eds): Soil Classification. Joint Research Centre: Ispra, p.213-222, 2002.

BOLSTAD, P. V.; STOWE, T. An evaluation of DEM accuracy – elevation, slope, and aspect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.60, p.1327-1332, 1994.

BOLETIM EPIDEMIOLÓGICO. Secretaria de Vigilância em Saúde. Ministério da Saúde. V. 49, nº 10, 2018. Disponível em: <<http://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/22/2017-032-Publicacao.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

BUTT, M. J.; UMAR, M.; QAMAR, R. Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in Northern Pakistan. **Natural hazards**, v. 65, n. 1, p. 241-254, 2013.

CAI, X.; WANG, D. Spatial autocorrelation of topographic index in catchments. **Journal of Hydrology**, v. 328, p. 581-591, 2006.

CANHOLI, A. P. (2014). **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos.

CAPOANE, V. et al. Influência da resolução do modelo digital de elevação na determinação do índice topográfico de umidade e na capacidade de predição dos teores carbono orgânico do solo. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 144-155, 2015.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

CAZETTA, V. O status de realidade das fotografias aéreas verticais no contexto dos estudos geográficos. **Pro-Posições**. v. 20, n. 3, p. 71-86, 2009.

Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres - **CEPED**. Universidade Federal de Santa Catarina. Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2014. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres; Banco Mundial - Florianópolis: CEPED UFDSC, 2016. 230 p.

CHAGAS, C. S. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.2, p.218–226, 2010.

CHAGAS, C. S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. 238p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2006.

CHAUDHRY, M. H. **Open-Channel Flow**. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

CHERUBINI, T. et al. Verification of precipitation forecasts over the Alpine region using a high-density observing network. **Weather and Forecasting**, v. 17, p. 238-249, 2002.

CHORLEY, R. J., SCHUMM, S. A., SUGDEN, D. E.: **Geomorphology**, Methuen&Co. Ltd, 1984.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**, New York, USA, 1959.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hydrology. [S.l.]: McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 1988.

CLEMENTS, F.E. **Research methods in Ecology**. Nebraska: University Publishing Co., 1905. 512p.

COOK, A.; MERWADE, V. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. **Journal of Hydrology**, v. 377, p. 131-142, 2009.

CORDEIRO, M. T. A.; RAFAELI NETO, S. L. Análise do comportamento de sistemas urbanos por meio de componentes de sistemas hidrológicos. **GEOUSP**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 142 – 155, 2015.

COUTINHO, M.M. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. 260 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

COWARDIN, L. M. et al. **Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States**, U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, DC, 1979.

CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M.; VERNEY, A. **Practical aspects of computational river hydraulics**. London: Pitman Advanced. XVI, 1980. 420p.

CUNHA, L. K.; KRAJEWSKI, W. F.; MANTILLA, R. A framework for flood risk assessment under nonstationary conditions or in the absence of historical data. **Journal of Flood Risk Management**, v. 4, p. 3–22, 2011.

CURMI, P. et al. Hydromorphic soils, hydrology and water quality: Spatial distribution and functional modelling at different scales. **Nutrient Cycling Agroecosyst.**, v.50, p.127– 142, 1998.

DANTAS, C. E. O. **Previsão e controle de inundações em meio urbano com suporte de informações espaciais de alta resolução**. 223p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

DECINA, T. G. T.; BRANDÃO, J. L. B. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. **Eng Sanit Ambient**, v. 21, n. 1, p. 207–217, 2016.

Defesa Civil do Município de Lages. Relatório de Inundação de 2014. 2014. Lages – SC.

Defesa Civil do Município de Lages. Relatório de Inundação de 2018. 2018. Lages – SC.

DEGIORGIS, M. et al. Classifiers for the detection of floodprone areas using remote sensed elevation data. **Journal of Hydrology**, v. 470-471. p. 302-315, 2012.

DETTY, J. M.; MCGUIRE, K. J.: Topographic controls on shallow groundwater dynamics: implications of hydrologic connectivity between hillslopes and riparian zones in a till mantled catchment, **Hydrol. Process.**, v.24, p.2222–2236, 2010.

DEVRIES, P.; ALDRICH, R. Assessment Approach for Identifying Compatibility of Restoration Projects with Geomorphic and Flooding Processes in Gravel Bed Rivers. **Environmental management**, p. 1-20, 2015.

DI BALDASSARRE, G., et al.. Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.17, p.3295-3303, 2013.

DPI-INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (Brasil). Divisão de Processamento de Imagens. *TerraViewHidro*. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/~alexandre/TerraHidro/>>. Acessado em: 10 out. 2019.

DUNNE, T. **Field studies of hillslope flow processes**, In: KIRKBY, M.J.Z. (ed.) *Hillslope Hydrology*. New York: JohnWiley and Sons, p. 227–293, 1978.

EM-DAT. 2018: Extreme weather events affected 60 million people. 2019. Disponível em: <<https://www.emdat.be/publications>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83 p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 745 p. 2004.

ENDRENY, T. A.; WOOD, E.F., LETTENMAIER, D.P. Satellite-derived digital elevation model accuracy: hydrogeomorphological analysis requirements. **Hydrological Processes**. v. 14, p. 1-20, 2000.

EPAGRI-CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina. **MAPAS DIGITAIS DE SANTA CATARINA**. 2004. DISPONIVEL EM: <<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>>. Acesso em: 25 jun 2019.

FELICÍSIMO, A. M. **Modelos digitais del terreno: Introducción aplicaciones en las ciencias ambientales**. Oviedo: Universidad de Oviedo, 1994. v.07 2005.

FEMA – Federal Emergency Management Agency. **Mapping the Zone: Improving Flood Map Accuracy**. Washington, DC: National Academies Press, 2009. 122 p

FERNANDEZ, P., MOURATO, S. E MOREIRA, M. Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. **Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos**. v. 34, n.01, 2013.

FERREIRA, D. M.; FERNANDES, C. V. S. F.; KAVISKI, E. Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente. **RBRH**. v.21, n.3, 2016.

FERREIRA, L. Simulação Hidrológica utilizando o Modelo TOPMODEL em Bacias Rurais, Estudo de Caso na bacia do Ribeirão dos Marins – Seção Monjolinho (SP). 205 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas., Campinas, 2004.

FILHO, K. Z.; MARTINS, J. R. S.; PORTO, M. F. A. **Inundações Urbanas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. v. 27, 2012.

FRITZEN, M.; BINDA, A. L. Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidade, hidrologia e impactos no ambiente. **Revista eletrônica ateliê geográfico**, v.5, n. 3, p. 239-254, 2011.

GAIN, A .K.; HOQUE, M. M. Flood risk assessment and its application in the eastern part of Dhaka City, Bangladesh. **Journal of Flood Risk Management**, v. 6, n. 3, p. 219–228, 2013.

GHARARI, S. et al. Hydrological landscape classification: Investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 15, 3275–3291, 2011.

GODBOUT, L. D. **Error assessment for Height Above the Nearest Drainage inundation mapping**. Dissertação de mestrado. The University of Texas, Austin, 2018.

GOERL, R. F. **Estudo de inundações em Rio Negrinho - SC sob a ótica dos desastres naturais**. 121 p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis. 2010.

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M. Redução dos desastres naturais: desafio dos geógrafos. **Ambiência Guarapuava (PR)**. v.9 n.1 p. 145 – 172, 2013.

GOERL, R.F.; MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.69, p.61-69, 2017.

GONÇALVES, M. O. **Análise comparativa entre modelo reduzido e modelos computacionais uni e bidimensionais**. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M.; PELLERIN, J. R. G. M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. **Bol. geogr.**, v. 30, n. 1, p. 81-100, 2012.

GRABS, T. et al. Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. **Journal of Hydrology**, v. 373, p. 15-23, 2009.

GRUBER, S; PECKHAM, S. Land-Surface parameters and objects in hydrology. In: Hengl, T; Reuter, H I. **Geomorphometry**. Amsterdam, p. 171-194. 2008.

GUERRA, A. T. **Recursos naturais do Brasil**. Ln: GUERRA Ignez A. L. T.; 3ed. **Rev. Rio de Janeiro**, IBGE. 1980.

GUPTA, A.; AHMAD, R. Geomorphology and the urban tropics: building an interface between research and usage. **Geomorphology**, 31, 1999. 133-149.

HASANI, H. Determination of flood plain zoning in zarigol river using the hydraulic model of HEC-RAS. **International Research Journal of Applied and Basic Sciences**, v. 4, n. 0, p. 4300-4304, 2013.

HENDRIKS, P.; VRIENS, D. **Collaborative exploration of spatial problems**. London: NCGIA. 1995.

HEWLETT, J.D. **Principles of forest hydrology**. Athens, Georgia: University of Georgia Press, 1982. 183 p.

HERRMANN, M. L. P.; KOBAYAMA, M.; MARCELINO, E. V. Inundação gradual. In: HERRMANN (Org.). **Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina: período de 1980 a 2010**. 2. ed. Florianópolis, SC: IHGSC/Cadernos Geográficos, 2014. 219 p.

HORA, S. B.; GOMES, R. L. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do rio cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA. **Sociedade & Natureza**. v.21, n.2, p.57-75, 2009.

HORNBERGER, G. M. et al. **Elements of Physical Hydrology**. J. Hopkins, p. 302, 1998.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**, v.268, n.1, p.87-99, 2002.

HUNG, M. N. W. B et al. **Utilização do índice topográfico de umidade como suporte ao planejamento e gestão ambiental de unidades de conservação de uso sustentável**. In: 1ºSinageo. 2016.

HUNTER, N. M. et al. An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. **Advances in Water Resources**, v.28 n.9, p.975-991, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa de Informações Básicas Municipais 2013**. Rio de Janeiro, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **População estimada**: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1o de julho de 2019. Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, 2019. Software desenvolvido pelo INPE simula a trajetória da lama no colapso da barragem em Brumadinho/MG. Disponível em:< <http://www.obt.inpe.br/OBT/noticias/software-desenvolvido-pelo-inpe-simula-a-trajetoria-da-lama-no-colapso-da-barragem-em-brumadinho-mg>> . Acesso em: 11 nov. 2019.

JALAYER, F. et al. Probabilistic GIS-based method for delineation of urban flooding risk hotspots. **Natural Hazards**, v.73, n.2, p.975-1001, 2014.

JENNY, H. **Factors of soil formation-a system of quantitative pedology**. New York: McGraw-Hill, 1994. 288p.

JHA, A. K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. **Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century**. The World Bank, 2012.

JHA, A. K.; BLOCH, R.; LEMOND, J. Cities and Flooding: a Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century. **Washington: The World Bank**, 2011.

JUNIOR, V. J. S.; SANTOS, C. O. A evolução da urbanização e os processos de produção de inundações urbanas. **Estação Científica (UNIFAP)**. v.3 n. 1, p. 19-30, 2013.

JUSTINO, L. E. L. **Análise da eficiência do dique de cruz do Espírito Santo (PB) por meio do modelo HAND João Pessoa - PB. 59p.** Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) -Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

KIRKBY, M. J. "Hydrograph modelling strategies." Progress in physical and human geography, R. F. Peel, M. D. Chisholm, and P. Haggett, eds., **Heinemann, London**, p. 69–90, 1975.

KOBIYAMA, M. et al. **Mapeamento de Áreas de Risco para Prevenção de Desastres Hidrológicos com Ênfase em Modelagem Hidrogeomorfológica.** 4 ed. Porto Alegre: UFRGS/IPH/GPDEN, 2017. 442p.

KULASOVA, A. et al. Comparison of saturated areas mapping methods in the Jizera Mountains, Czech Republic. **Journal of Hydrolougy & Hydromechanics**, v.62, p.160-168, 2014.

KUNTZ, K. M. **Mapeamento digital de solos por meio de índices de relevo na bacia hidrográfica do rio do Lontra, PR.** 51p. Monografia (Bacharel em Engenharia Florestal). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2017.

Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais – LSIE. **Produto Meta 1 – projeto de revisão metodológica dos processos normativos de identificação das áreas da união descrição do estado da arte na definição de áreas inundáveis usando técnicas de geoprocessamento.** 2017. Disponível em: <
http://www.planejamento.gov.br/assuntos/patrimonio-da-uniao/programa-de-modernizacao/linha-do-tempo/04-ted-unb_produto_1-1-especificacao-tecnica-requisitos.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2020.

LEANDRO, G. R. S.; SOUZA, C. A. Pantanal de Cáceres: composição granulométrica dos sedimentos de fundo no rio Paraguai entre a foz do rio Cabaçal e a cidade de Cáceres, Mato Grosso, Brasil. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. v. 7, n.2, 2012.

LEE, L. et al. Chromatin remodeling factors Isw and In regulate checkpoint activity and chromatin structure in S phase. **Genetics**. v.199, n.4, p.1077-1091, 2015.

LEITE, R. C. M. et al. Utilização de regressão logística simples na verificação da qualidade do ar atmosférico de Uberlândia. **Eng Sanit Ambient**, v.16, n.1, p. 175-180, 2011.

LIMA, W.P., 1989. Função hidrológica da mata ciliar. Simpósio sobre Mata Ciliar. Fundação Cargill, p. 25-42.

LOEWEN, A. R.; PINHEIRO, A. Mecanismos de geração de escoamento superficial na bacia do ribeirão Concórdia, Santa Catarina, Sul do Brasil. **RBRH**. v.22, e4, 2017.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. **Fluvial processes in geomorphology.** San Francisco: Freedman, 1964. p. 319.

LI U, Y. Y. et al. CyberGIS Approach to Generating High-resolution Height Above Nearest Drainage (HAND) Raster for National Flood Mapping. CyberGIS 16, **Urbana**, p. 24-26, Illinois, 2016.

LIN, B. et al. Integrating 1D and 2D hydrodynamic models for flood simulation. **Water Management**, 159 Issue WM1, p.19-25, 2005.

LIN, H.S. et al. Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydropedological perspective. **Geoderma**, v.131, p.345-368, 2006.

LIN, H.; ZHOU, X. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment, Eur. **J. Soil Sci.**, v.59, p.34-49, 2008.

LIZ, M. S. M. **Influência do rio Caveiras nas inundações dos rios Carahá e Ponte Grande**. 161p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

LOPES, F. C. A. Uso de atributo topográfico para estabelecer relação topografia-vazão na bacia do Altíssimo rio Negro, PR/SC. **Revista Geonorte**, edição especial, v.3, n.4, p. 1320-1331, 2012.

LUZ, E. P. D. et al. **Ferramenta computacional "Isochrones": Análise na bacia hidrográfica do arroio Pelotas visando modelagem de cheias**. Anais do XXIII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: UFPel. p. 1-4, 2014.

MACHADO, P. J. de O.; TORRES, F. T. P. **Introdução à hidrogeografia**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

MAGALHÃES, I. A. L. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: Uma análise comparativa entre dois métodos. **Caderno de Geociências**. v. 8, p.63-70, 2011.

MAGANHOTTO, R. F. et al. A aplicação dos índices de representação do relevo como ferramenta de suporte no planejamento ambiental de unidades de conservação - Estudo de caso Floresta Nacional de Irati. **Revista Geografar**. v.8, n.2, p.205-236, 2013.

MALIK, M. I.; AHMAD, F. Flood Inundation Mapping and Risk Zoning of the Swat River Pakistan using HEC-RAS Model. **Lasbela. Uni. J. Sci., Tech.**, v.3, p. 45-52, 2014.

MAKRAKIS, M. **Mapeamento e análise das áreas suscetíveis a inundações no município de Lages-SC**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MANFREDA, S. et al. Investigation on the Use of Geomorphic Approaches for the Delineation of Flood Prone Areas, **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 863-876, 2014.

MANFREDA, S.; LEO, M. D.; SOLE, A. Detection of Flood Prone Areas using Digital Elevation Models, **Journal of Hydrologic Engineering**, v.16, n. 10, p.781-790, 2011.

MANFREDA, S.; SOLE, A.; FIORENTINO, M. “Can the basin morphology alone provide an insight on floodplain delineation?” On flood recovery innovation and response, WIT, **Southampton**, UK, p. 47–56, 2008.

MARINHO, R. R. et al. Aplicação de imagens SAR orbitais em desastres naturais: mapeamento das inundações de 2008 no Vale do Itajaí, SC. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 64, n.3, p. 317-330, 2012.

MARTHEWS, T. R. et al. High-resolution global topographic index values for use in large-scale hydrological modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* v. 19, p. 91–104, 2015.

MATA-LIMA, H. et al. Impactos dos desastres naturais nos sistemas ambiental e socioeconômico: o que faz a diferença?. **Ambiente & Sociedade**.v. XVI, n. 3 v p. 45-64, 2013.

MAZZOLLI, M.; EHRHARDT-BROCARD, N. C. M. “Ocupação irregular em áreas de recarga do Aquífero Guarani e vegetação ripária em Lages-SC.” **GEOSUL**28, n.55, P. 163-180, 2013.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v.37 n.1., 2013.

MEYER, D.J. et al. Summary of the validation of the second version of the ASTER GDEM, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXIX-B4:291-293, 2012.

MENEZES, D. J. **Zoneamento das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul – RS**. 137p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2014.

MENGUE, V. P. et al. Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai. **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n.1, p. 41-53, 2016.

MENGUE, V. et. al. Análise da expansão urbana em áreas suscetíveis à inundação utilizando o modelo HAND: o caso da Região Metropolitana de Porto Alegre, Brasil. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)**, n.º 12, p. 231-253, 2017.

MÉROT, P. et al. Mapping waterlogging of soils using digital terrain models. **Hydrological Processes**. v. 9, p.27-34, 1995.

MERZ, B., et al. Charting unknown waters — On the role of surprise in flood risk assessment and management, **Water Resour. Res.**, v.51, 2015.

MILANESI, J. QUADROS, E. L. L.; LAHM, R. E.. Utilização do modelo hand no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação – Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Cartografia**. v.4, n 69, p.675-686, 2017.

MILAN, E.; MORO, R. O conceito biogeográfico de ecótono. **Terr@Plural**, v.10, n.1, p. 75-88, 2016.

MILIANI, F.; RAVAZZANI, G.; MANCINI, M.. Adaptation of precipitation index for the estimation of antecedent moisture condition in large mountainous basins. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 3, p. 218-227, 2011.

MINELLA, J.P.G. et al. Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1455-1462, 2010.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural, Santa Maria**, v.42, n.9, p.1575-1582, 2012.

MOMO, M. R. **Avaliação da aplicação do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis a inundação no município de Blumenau**. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2015.

MOMO, M. R. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **RBRH**. v. 21 n.1, p. 200 – 208, 2016.

MONTE, B. E. O. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **RBRH**. v. 21, n.1, p. 152 – 167, 2015.

MONTE, B. E. O. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **RBRH**. v. 21 n.1, p.152 – 167, 2016.

MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M. **Influência da distribuição temporal da precipitação em inundações**. In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (2011: Maceió) Maceió: ABRH, Anais, 2011. 16p.

MONTEIRO, L. R. KOBIYAMA, M.; ZAMBRANO, F. C. **Mapeamento de Perigo de Inundação - Porto Alegre**: UFRGS/IPH/GPDEN,2015, 91p.

MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **REGA**. v. 10, n. 2, p. 13-25, 2014.

MOORE, I. D.; BURCH, G. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1294-1298, 1986.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital Terrain Modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**. v. 5. p. 3-30, 1991.

MOREIRA, G. T. G. **Métrica para avaliação da inconsistência hidrológica de terrenos representados por MDT**. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

MOTA, A. A.; GRISON, F.; KOBIYAMA, M. Relação entre sinuosidade e índices topográficos na zona topográfica fluvial. **Revista Geonorte**, v.9, n.1, p.42-60, 2013.

MOYA QUIROGA, V. et al. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: application of the new HEC-RAS version 5. **Revista Iberoamericana del Agua**. v. 3, p. 25-33, 2016.

MULONGO, H. Estudo de inundação na bacia do campus da UFSC. 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MUNICH, 2013. Re NatCatSERVICE Database (Munich Reinsurance Company, Geo Risks Research, 2013).

NARDI, F. et al. Comparing a large-scale DEM-based floodplain delineation algorithm with standard flood maps: the Tiber river basin case study. **Irrig. Drain**. v.62, n.2, 11-19, 2013

NARDI, F.; VIVONI, E. R.; GRIMALDI, S. Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. **Water Resources Research**., v.42, p. 1-15, 2006.

NEAL, J.; SCHUMANN, G.; BATES, P.D. A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. **Water Resour. Res.** v.48. 2012.

NEGRÃO, A. C. Modelagem hidrodinâmica unidimensional da passagem de onda de cheia em um córrego urbano considerando escoamento transcrito. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

NETO, S. L. R. Meta 4 – **Modelagem hidrodinâmica: áreas inundáveis – unidades e lotes em área de perigo**. Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages: Udesc/CAV, 2019a, 53.

NETO, S. L. R. Meta 5 – **Estudos Ambientais: cenário I**. Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages: Udesc/CAV, 2019b, 53.

NETO, S. L. R. Meta 6 – **Sondagens preliminares: mapa geológico**. Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages: Udesc/CAV, 2019c, 53.

NETO, S. L. R. Meta 4 – **Modelagem hidrodinâmica: número de edificações em áreas de risco de inundação**. Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages: Udesc/CAV, 2019d, 53.

NEW SOUTH WALES - NSW. **Risk management toolkit**. Sidney, 2012.

NOBRE, A. D. et al. HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent. **Hydrol. Process**. 2015.

NOBRE, A. D. et al. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1, p. 13-29, 2011.

- NOBRE, A. D. et al. HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 320-333, 2016.
- NOBRE, C. A. et al. M. **Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo – Sumário Executivo**. INPE, UNICAMP, USP, IPT, UNESP, p. 32, São Paulo, 2010.
- NOMAN, N.S.; NELSON, E.J.; ZUNDEL, A.K., A review of automated flood plain delineation from digital terrain models. **ASCE Journal Water Resources Planning and Management**. v.127, p.394–402, 2001.
- NOURANI, V.; ROUGHANI, A.; GEBREMICHAEL, M. Topmodel capability for rainfall-runoff modeling of the Ammameh watershed at different time scales using different terrain algorithms. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 5, n. 1, p. 1–14, 2011.
- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital Elevation Data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**. v.28, p.328-344, 1984.
- OGASSAWARA, J. F.; GASS, S. L. B. Análise morfométrica dos afluentes principais da bacia hidrográfica do rio Uruguai e sua influência nas inundações na cidade de Itaquí, Rio Grande do Sul, Brasil. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 222-240, 2018.
- OLIVEIRA, G. C. **Precisão de modelos digitais de terreno, mapeamento automático de apps em topos de morros e a eficácia do novo Código Florestal**. 152p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.
- OLIVEIRA, J. B. O.; JACOMINE, P. K. T.; NUNES, M. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. 2 ed. Jaboticabal, FUNEP, 1992. 201 p.
- OLSZEWSKI, N. et al. Morfologia e aspectos hidrológicos da bacia hidrográfica do Rio Preto, divisa dos estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.3, p.485-492, 2011.
- PADILHA, A. C. M. **Estratégia & conhecimento: demandas emergentes no turismo rural**. São Luis: EDUFMA, 2010, 314p.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M. Modelo hidrodinâmico 1D para redes de canais baseado no esquema numérico de MacCormack. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.16, n.3, p.151-161, 2011.
- PAN, F.; KING, A. W. Downscaling 1-km topographic index distributions to a finer resolution for the TOPMODEL-Based GCM hydrological modeling. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.17, p.243-251, 2012.
- PAPPENBERGER, F. et al. Grasping the unavoidable subjectivity in calibration of flood inundation models: A vulnerability weighted approach. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2, p. 275-287, 2007.
- PARK, S.; VAN DE GIESEN, N.: Soil-landscape delineation to define spatial sampling domains for hillslope hydrology, **J. Hydrol.**, v.295, p.28–46, 2004.

PELLETIER, J. D.; RASMUSSEN, C.: Geomorphically based predictive mapping of soil thickness in upland watersheds, **Water Resour. Res.**, v.45, 2009.

PEREIRA, C. E. et al. Comparação entre modelos simplificados e o modelo HEC-RAS no estudo de áreas de inundação para o caso de Minas Gerais, Brasil. **Revista Recursos Hídricos**, v. 38, n. 1, p. 75–90, 2017.

POURALI, S.H. et al. Topography wetness index application in flood-risk-based land use planning. **Applied Spatial Analysis and Policy**. p. 1-16, 2014.

PRATES, V.; SOUZA, L. C. P.; JUNIOR, J. C. O. Índices para a representação da paisagem como apoio para levantamento pedológico em ambiente de geoprocessamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.16, n.4, p.408–414, 2012.

Prefeitura Municipal de Lages – PML, 2020. Disponível em: < <https://www.lages.sc.gov.br/>>. Acesso em: 29 jan. 2020.

PREISSMANN, A., 1961. **Propagation Des Intumescences Dans Les Canaux Et Rivières**, In: 1st Congress of the French Association for Computation (AFCALTI), Grenoble.

QIU, Z. Assessing Critical Source Areas in Watersheds for Conservation Buffer Planning and Riparian Restoration. **Environmental Management**, v. 44, p. 968-980, 2009.

QUINN, F. et al. Representation of the gender of human faces by infants: A preference for female. *Perception*. v.31, p.1109-1122, 2002.

QUINN, F. The $\ln(A/\tan\beta)$ index: How to calculate it and how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework, *Hydrol. Process.*, v.9, p.161–182, 1995.

QUINN, P.; et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological processes**, v. 5, n. 1, p. 59-79, 1991.

RAFAELI NETO, S. L. et al. Modelagem hidráulica dos eventos de inundações em Lages (SC). In: VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, p. 1 – 7, 2015.

RAFAELI NETO, S. L. **Um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundações**. 2000. 234p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

REIS, P. A. **Identificação de áreas vulneráveis as enchentes e inundações em áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos**. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

REIS, P. A.; SCHMIDT, M. A. R. Avaliação dos Modelos HEC-RAS e GRASS na Identificação de Áreas Vulneráveis a Inundações em Áreas Urbanas. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v. 40 – 1, p. 115-126, 2017.

REGO, L. F. S. M. **Aplicação de índices topográficos e de vegetação no mapeamento digital de solos**. 68 p. Monografia (Bacharel em Agronomia). Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**. p. 3469-3481. 2008.

RICHERSON, P.J.; LUM, K. Patterns of species diversity in California: relations to weather and topography. **Am. Nat.** v.116, p.504-536, 1980.

RIGHI, E.; ROBAINA, L. E. S. Enchentes do Rio Uruguai no Rio Grande do Sul entre 1980 e 2005: uma análise geográfica. **Sociedade & Natureza**, v.22, p. 35-54, 2010.

ROBAINA, L. E. de S.; TRENTIN, R. **Desastres naturais no Rio Grande do Sul**. Editora UFSM, Santa Maria, 2013. 496 p.

ROCHA, F. F. **Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil**. 200p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

ROCHA P.C.; COMUNELLO, E. Geomorfologia e áreas inundáveis na planície fluvial do alto rio Paraná. **Revista Geográfica Acadêmica**. v.5, p.98-117, 2011.

RODHE, A.; SEIBERT, J. Wetland occurrence in relation to topography: a test of topographic indices as moisture indicators. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98-99, p. 325-340, 1999.

ROMANESCU, G. et al. Flood vulnerability assessment in the mountain-plateau transition zone: a case study of Marginea village (Romania). **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. 502-513, 2016.

ROMÃO, P. A. **Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - Região de Goiânia, GO**. 192p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília 2006.

SÁ, E. A. A. **Estudo do modelo topmodel na bacia hidrográfica do Alto Canoas – SC. 2014**. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

SÁ, E. A. S. et al. **Efeitos da discretização e da suavização do mdt sobre características topográficas de bacias hidrográficas**. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2015.

SANTOS, A. R. **Enchentes e deslizamentos: causas e soluções**. São Paulo: Pini. 2012.

SANTOS, K. A. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: bacia do rio Mundaú**. 127 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SANTOS, K. A. **Utilização de modelo hidrodinâmico para mapeamento de áreas inundáveis**. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A.M; LOMBARDI NETO, F. **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo – Parte 1: Classificação**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.10, p. 05-18, 2005.

SARTORI, L. **Aplicação do índice topográfico na determinação de áreas suscetíveis a alagamentos e inundações**. 15p. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental). Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

SAVAGE, J.; et al. **The impact of Scale on Probabilistic Flood Inundation Maps Using a 2D Hydraulic Model with Uncertain Boundary Conditions**. In: Proceedings of the Second International Conference on Vulnerability, Uncertainty and Risk Analysis and Management (ICVRAM), July 13-16, 2014, Liverpool. Liverpool: American Society of Civil Engineers, p. 279-289.

SAVENIJE, H. H. G.: HESS Opinions “Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)”, Hydrol. **Earth Syst. Sci.**, v.14, p. 2681– 2692, 2010.

SCHEIBE, L.F. **Geologia e petrologia do Distrito Alcalino de Lages, SC**. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia). 1986. 224 p. Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 1986.

SCHIER, D. T. et al. Estudo sobre a influência de variáveis meteorológicas nos casos de acidentes por animais peçonhentos em Lages – SC. **Hygeia**. v.15, n.31, p.43-55.

SCHULER, A.E. et a. Análise da representatividade física dos parâmetros do TOPMODEL em uma bacia de meso escala localizada nas cabeceiras do Rio Corumbataí, São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre. v. 5, n. 2, p. 5-25, 2000.

SCHUMANN, G. et al. Progress in integration of remote sensing–derived flood extent and stage data and hydraulic models. **Reviews of Geophysics**, v. 47, n. 4, 2009.

SCS - Soil Conservation Service. Hydrology. In: National engineering handbook. Washington: USDA, 1972. p.101-1023.

SDS - Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado De Santa Catarina. Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: ENGEMAP, 2013. Documento Digital.

SEIFERT, C. A. C. **Delimitação de áreas hidrologicamente sensíveis por meio de modelagem de processos e da relação solo-vegetação em ambientes hidromórficos**. Dissertação (Mestrado em Geografia). 2012. 111 p. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SEIFERT, C. A. C.; SANTOS, I. Identificação de áreas hidrologicamente sensíveis por meio de modelagem hidrológica e da distribuição espacial de solos e vegetação em ambientes hidromórficos. **Soc. & Nat.**, v. 27, n. 1, p. 141–155, 2015.

SHANNON SIEFERT, M. P. S. Quickguide to generation of soil topographic index and monthllysaturation probability maps in arcgis 9.1. 2006. Cornell University.

SHARKEY, J. K. **Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages**. 117 p. Dissertação (Mestrado) - University of Tennessee - USA, 2014.

SHESHUKOV, A. Y.; SEKALUVU, L. HUTCHINSON, S. L. Accuracy of topographic index models at identifying ephemeral gully trajectories on agricultural fields. **Geomorphology**. v. 306, n. 1, p. 224-234, 2018.

SHIDAWARA. M. Flood hazard map distribution. **Urban Water**, v.1, p.125-129, 1999.

SILVA, A. C. **Simulação da descarga fluvial em resposta a mudanças de uso e cobertura da terra: bacia do rio Bonfim, Petrópolis (RJ)**. Dissertação (Mestrado em Geografia). 2013. 117 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, E. R. S. **Modelagem integrada para controle de cheias, previsão e alerta de inundações: estudo de caso da bacia do rio Una em Pernambuco**. 145p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA, J. A. A. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. Academia Brasileira de Ciências – SBPC. **O Código Florestal e a Ciência: Contribuições para o Diálogo / Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência**. 2. ed. rev. – São Paulo: SBPC, 2012. 294 p.

SILVA, M. M. **Dinâmica espaço-temporal das áreas variáveis de afluição da bacia do córrego do Cavalheiro**. 143p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2012.

SILVA, R.V.; KOBIYAMA, M. Topmodel: teoria integrada e revisão. **Revista RA'E GA**, Curitiba, n.14, p. 97–110, 2007.

SILVA, R.V.; VESTENA, L.R.; KOBIYAMA, M. **Avaliação do índice topográfico (ln(a/tanB)) para diferentes resoluções espaciais**. In: I Workshop Regional de Geografia e Mudanças Ambientais: Desafios da sociedade do presente e do futuro. Guarapuava, p.71–78, 2007.

SILVA, T. C. **Mapeamento das manchas de inundação para a cidade de Matias Barbosa – MG**. Monografia (Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. 2016.

SILVA, W.F.et al. **Análise do modelo HAND para a indicação de áreas suscetíveis a eventos críticos de cheias**. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. São José dos Campos: Inpe. p. 7001-7008, 2013.

SILVEIRA, A. L. P. Fator de Pico para Hidrogramas Unitários Sintéticos Triangulares. **RBRH** v. 21, n.1., p. 46-52, 2016.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Análise comparativa entre modelos digitais de elevação com distintas características de processamento e aquisição. **Bol. Geogr.** v. 33, número especial, p. 106-121, 2015.

SIMON, H. A. Prediction and prescription in systems modeling. **Operation Research.** p.7-14, 1990.

Sistema de Informações Geográficas Municipal - GEO Lages. (2014). Dados cedidos pela prefeitura municipal de Lages. Lages.

SOUZA, C. A. et al. Informações preliminares sobre transporte de sedimentos no rio Paraguai entre a cidade de Cáceres e a estação ecológica da ilha de Taiamã, Pantanal superior, Mato Grosso, Brasil. **Revista Recursos Hídricos.** v. 36, n.2, p.47-55, 2015.

SOUZA, L. F. N. M. **Metodologia para o mapeamento de cheias em zonas de risco: aplicação a um trecho de um rio do Norte de Portugal.** 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil — Especialização em hidráulica). Faculdade de Engenharia. Universidade de Porto. Porto, 2012.

SPECKHANN, G. A. Uma proposta de mapeamento de risco de inundação na bacia do Rio Itajaí-Açu utilizando descritores de terreno. 2018. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

STEPHENSON, D. B. Use of the “odds ratio” for diagnosing forecast skill. **Weather and Forecasting,** v.15, n.2, p.221-232, 2000.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambientes fluviais.** 2 ed. 183p., Editora da UFSC, Editora da Universidade Federal do Paraná, 1990.

TARBOTON, D. G. Simulation of Runoff Generation in Hydrologic Models. Copyright. Utah State University. v.1, 2003.

TENG, J. et al. Flood inundation modelling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software.** v. 90, p. 201 – 206, 2017.

TETZLAFF, D. et al. Conceptualization of runoff processes using a geographical information system and tracers in a nested mesoscale catchment, **Hydrol. Process.**, v.21, p.1289–1307, 2007.

THOMPSON, J. C.; MOORE, R. D. Relations between topography and water table depth in a shallow forest soil. **Hydrological Processes,** v.10, p.1513-1525, 1996.

TINGSANCHALI, T. Urban flood disaster management. In: *Procedia Engineering* 32, p. 25-37, 2012.

TOMINAGA, L.; SANTORO, J; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo: Instituto Geológico, 2009. – 196 p.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.; SILVEIRA, V. S. Zoneamento do risco de inundação do rio Vacacaí no município de São Gabriel, RS. **Geo UERJ**, v. 1, n. 24, p. 161–180, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, ABRH, 2009. 943 p.

TUCCI, C. E. M., **Inundações Urbanas**. 15p. 2014. (Disponível em: <
http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/importacao/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/outros_documentos_tecnicos/curso-gestao-do-terrimorio-e-manejo-integrado-das-aguas-urbanas/drenagem1.PDF>. Acesso em: 10 se. 2019.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas estudos avançados. **Estud. Av.** v.22, n.63, 2008.

TUCCI, C. E. M. et al. **Inundações urbanas na América do Sul**. Ed. dos Autores, 2003.

TUCCI, C.E.M. 2005. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades, Global Water Partnership - World Bank, Unesco, 269 p.

UHLENBROOK, S. et al. Hydrological process representation at the meso-scale: the potential of a distributed, conceptual catchment model, **J. Hydrol.**, v. 291, p.278–296, 2004.

UNDP – United Nations Development Program. (2004). Reducing disaster risk: a challenge for development. New York: UNDP, p.130

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System: User's Manual**, version 5.0. Davis: US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2016.

VALERIANO, M. M. Mapeamento da declividade em microbacias com Sistemas de de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.7, n.2, p.303-310, 2015.

VAN BUUREN, M; KERKSTRA, K. **Landscape Ecology of a Stressed Environment**. The framework concept and the hydrological landscape structure: a new perspective in the design of multifunctional landscapes. London: Chapman & Hall. p. 219-243, 1993.

VESTENA, L.R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem**. 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VESTENA, L. R. et al. Uso dos modelos hidrológicos TOPMODEL e Trex para simulação do processo chuva-vazão da bacia do rio Caeté, região serrana do estado de Santa Catarina, Brasil. **Mecânica Computacional**. v. 32, p. 2837-2854, 2013.

VIANA, V. J.; JOHNSON, R. M. F. Redução de riscos de desastres associados a inundações: nova abordagem nas políticas públicas brasileiras. **Revista Semioses**, v. 11, n. 03, 2017.

VIANINI NETO, L. **Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais.** 304 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

VIBRANS, A. C. et al. **Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina.** Blumenau: Edifurb, v.3, 2013, 440p.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: Mcgraw Hill, 1975. 250p.

WAGENER, T. et al. The future of hydrology: an evolving science for a changing world. **Water Resources Research**, v. 46, p. 1-10, 2010.

WARD, P. J. et al. Assessing flood risk at the global scale: model setup, results, and sensitivity. **Environmental Research Letters**, v.8, 2013.

WATT, W. E.; CHOW, K. C. A. A general expression for basin lag time. *Can. J. Civil Eng.* 12, 294-300.1985.

WERNER, M. G. F. et al. Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation. **Journal of Hydrology**, v. 314, n. 1, p. 139-157, 2005.

WESTERN, A. W. et al. "Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective." *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, v.30, n.1, p.149–180, 2002.

WILSON, J. P. Digital terrain modeling. **Geomorphology**, v. 137, p. 107-121, 2012.

WILSON, J.P. et al. EROS: A grid-based program for estimating spatially-distributed erosion indices. **Computers & Geosciences**, v.22, p.707-712, 1996.

WINTER, L. G. **Elaboração de manchas de inundação na área central de Pato Branco considerando aspectos urbanísticos.** 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

WINTER, T. C.: The Concept OF Hydrologic Landscapes, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 37, 335–349, 2001.

WOLOCK, D. M.; MCCABE, G.J. (2000) Differences in topographic characteristics computed from 100- and 1000-m resolution digital elevation model data. **Hidrological Processes**, v.14, p.987-1002.

WOLOCK, D. M.; PRICE, C. V. Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model. **Water resources research**. v.30, n. 11, p.3041-3052, 1994.

WOODHOUSE, I. H. (2006). **Introduction to microwave remote sensing**. Boca Raton: CRC Press.

WREGGE, M. S. et al. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 333 p.

XAVIER, D. R. et al. Organização, disponibilização e possibilidades de análise de dados sobre desastres de origem climática e seus impactos sobre a saúde no Brasil. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 19, n. 9, p. 3657–3668, 2014.

XU, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **Int. J. Remote Sens.** v.27, p. 3025–3033, 2006.

YU, D.; LANE, S. N. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: mesh resolution effects. **Hydrological Processes**, v.20, n.7, p.1541–1565, 2006.

ZACHARIAS, A. A. GUERRA, F. C. O mapeamento das áreas vulneráveis aos riscos ambientais e as políticas públicas municipais para a sustentabilidade do patrimônio ambiental urbano. **Revista Geografia e Pesquisa**, Ourinhos, v. 9, n. 1, p. 66-75, 2015.

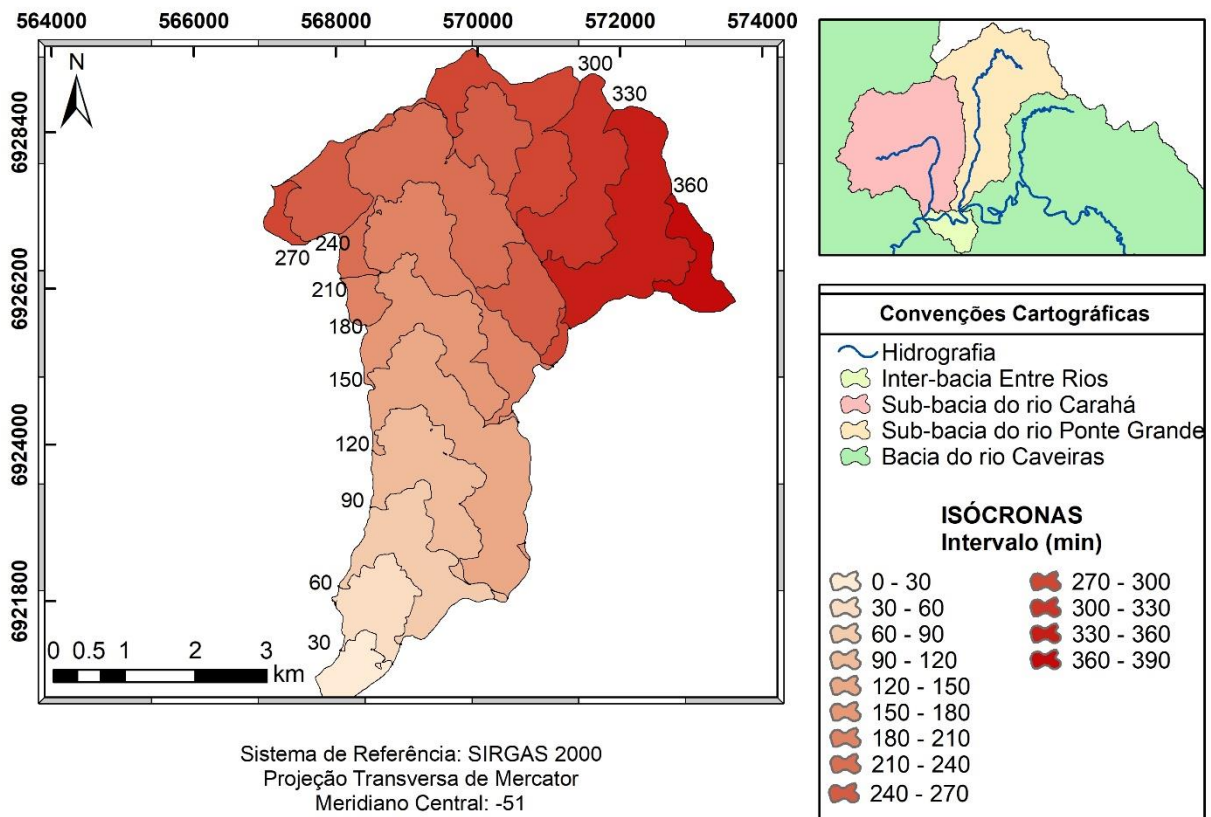
ZANATTA, L.C., COITINHO, J.B.L. “**Utilização de poços profundos no Aquífero Guaraní para abastecimento público em Santa Catarina.**” In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002.

ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resources Research**. 1994.

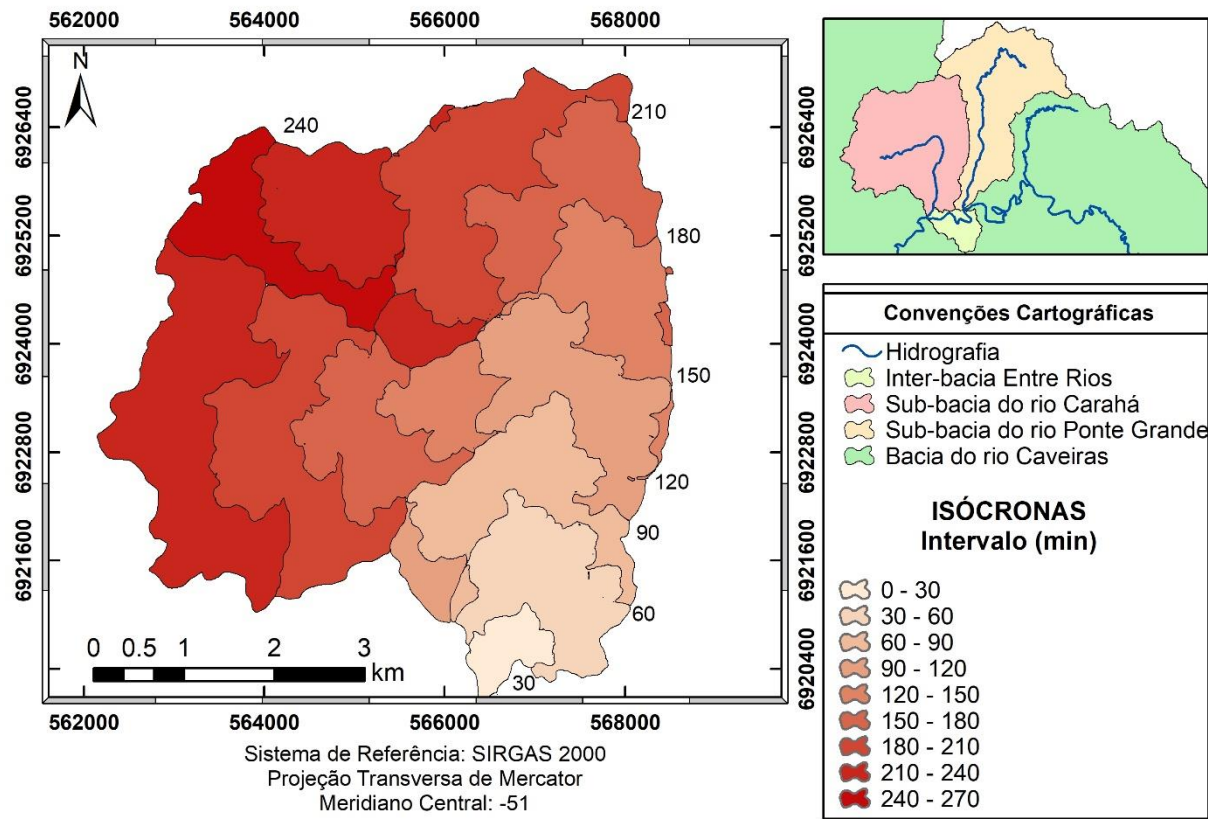
ZHENG, X. et al. River channel geometry and rating curve estimation using height above the nearest drainage. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, 2017. p. 34.

APÊNDICE A

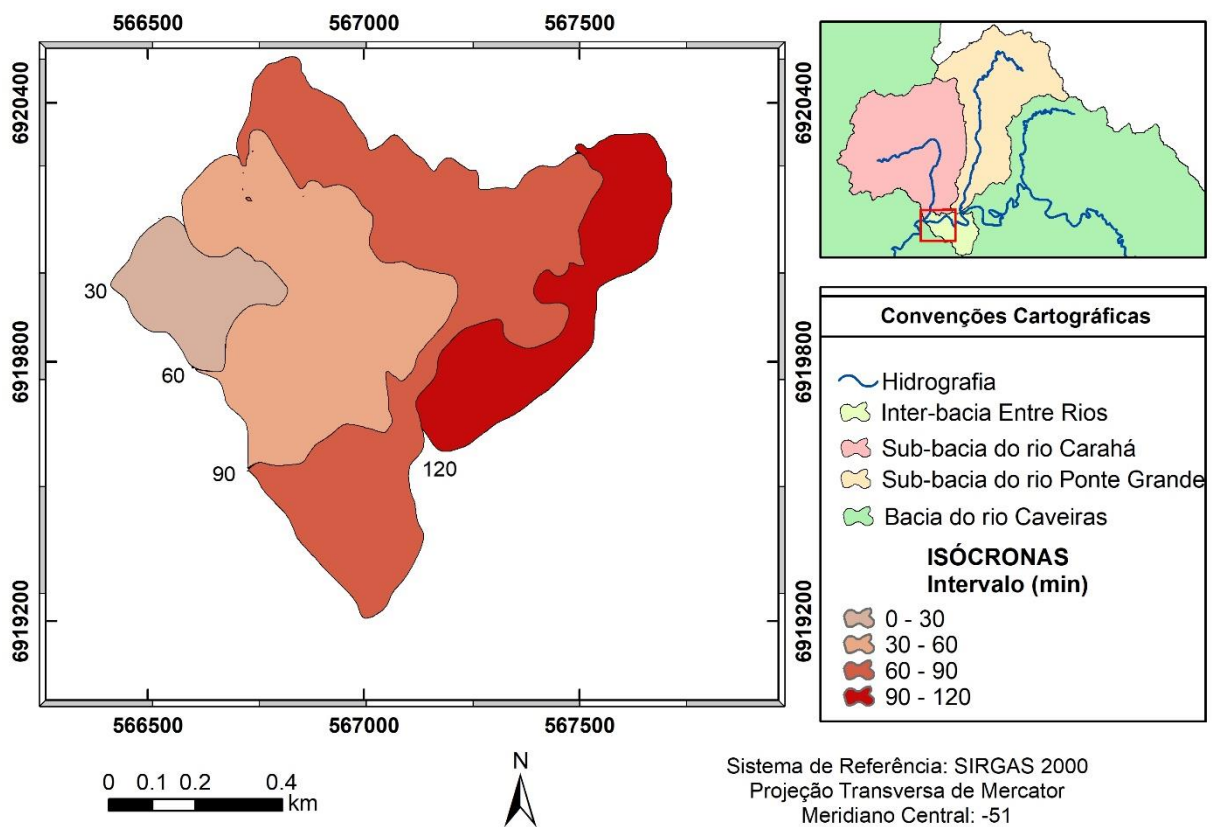
- Isócronas para a sub-bacia do rio Ponte Grande.



- Isócronas para a sub-bacia do rio Carahá.



- Isócronas para a inter-bacia Entre Rios.



APÊNDICE B

- Indicadores numéricos de desempenho binário para as resoluções de 1, 10 e 20 m nos espaços/problemas.

Espaço/ problema	Resolução	Viés	H	F	F<3>	F<4>
P1	1m	1,180	0,674	0,032	0,231	0,112
	10 m	0,599	0,599	0,038	0,122	-0,014
	20 m	0,630	0,630	0,044	0,135	-0,154
P2	1m	1,596	0,606	0,292	0,107	-0,193
	10 m	0,616	0,616	0,297	0,109	-0,240
	20 m	0,570	0,570	0,309	0,064	-0,278
P3	1m	2,425	0,788	0,041	0,218	-0,322
	10 m	0,695	0,695	0,038	0,181	-0,212
	20 m	0,600	0,600	0,048	0,063	-0,495
P4	1m	1,047	0,523	0,085	0,031	0,000
	10 m	0,524	0,525	0,074	0,035	0,105
	20 m	0,518	0,518	0,071	0,025	0,076
P5	1m	1,957	0,957	0,130	0,457	-0,022
	10 m	0,733	0,733	0,135	0,254	-0,019
	20 m	0,909	0,909	0,140	0,383	-0,106