

Uma proposta de mapeamento de risco de
inundação na bacia do Rio Itajaí utilizando
descritores de terreno

GUSTAVO ANDREI SPECKHANN

Gustavo Andrei Speckhann

**Uma proposta de mapeamento de risco de inundação na bacia do
Rio Itajaí-Açu utilizando descritores de terreno.**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de mestre em Engenharia
Ambiental
Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz
Borges Chaffe
Coorientador: Prof. Dr. Roberto Fabris
Goerl

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Speckhann, Gustavo Andrei

Uma proposta de mapeamento de risco de inundação na bacia do rio Itajaí-Açu utilizando descritores de terreno / Gustavo Andrei Speckhann ; orientador, Pedro Luiz Borges Chaffe, coorientador, Roberto Fabris Goerl, 2018.

90 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. I. Borges Chaffe, Pedro Luiz. II. Fabris Goerl, Roberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.



**“UMA PROPOSTA DE MAPEAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÃO NA BACIA
DO RIO ITAJAÍ-AÇU UTILIZANDO DESCRITORES DE TERRENO”**

GUSTAVO ANDREI SPECKHANN

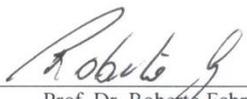
Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

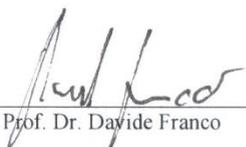
MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

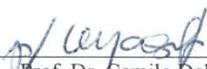
Aprovado por:

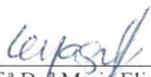

Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe
(Orientador)


Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl
(Coordenador)


Prof. Dr. Davide Franco


Prof. Dr. Leonardo Hoinaski


Prof. Dr. Camilo Daleles Rennó


Prof.ª Dr.ª Maria Eliza Nagel Hassemer
(Coordenadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte de todo sentido, significado e esperança em minha caminhada.

Agradeço a minha família, em especial a minha amada esposa Stephanie a qual me deu todo suporte e amparo durante o mestrado. Teu entusiasmo e alegria sempre me contagiaram a cada dia ir um passo além. Te amo!

Agradeço aos meus pais Eliane e Valdir e ao meu irmão Breno e minha cunhada Rafaela pelo incentivo e amor. Obrigado por sempre acreditarem em mim. Agradeço também aos meus sogros (Verena e Raulino) e meus cunhados (Dani, Rafa e Deas) que tanto me encorajaram e me animaram durante o mestrado. Quando vim de Joinville para Florianópolis não imaginava que ganharia uma família tão amada!

Agradeço ao Professor Pedro pelas orientações e pela parceria que já se estende desde os tempos de graduação. Concluo essa fase feliz por saber que ao final de todo esse tempo no LabHidro, além de ter tido um grande orientador, tive o privilégio de ganhar um amigo. Muito obrigado Pedro! Agradeço também ao Professor Roberto, por todos os ensinamentos, comentários, auxílio e pela amizade!

Agradeço aos Professores Camilo, Davide e Leonardo pelas valiosas contribuições na correção da dissertação. Os comentários de vocês foram muito importantes e me ajudaram muito. Muito obrigado!

Agradeço ao pessoal do LabHidro. A amizade e companheirismo de vocês sempre será uma lembrança agradável! Muito obrigado pelas risadas e pelas inúmeras ajudas e contribuições com o meu trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UFSC. Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro durante o mestrado.

Agradeço aos meus amigos que durante os 2 anos de mestrado alegraram os meus dias. Muito obrigado!

RESUMO

As inundações são o fenômeno que mais contribuiu para o aumento das perdas monetárias e perdas de vida relacionados a desastres naturais no mundo. Somente no ano de 2008, no estado de Santa Catarina os gastos referentes as inundações foram superiores a 5 bilhões de reais. A bacia do Rio Itajaí localizada em Santa Catarina tem 15000 km² e possui histórico de inundações severas. Mesmo com o aumento do nível de detalhamento de modelos hidráulicos e hidrodinâmicos, a demanda computacional pode limitar a aplicação do mapeamento de inundação em grandes áreas. A identificação de áreas propensas a inundação utilizando modelos digitais de terreno é uma alternativa, principalmente para escala regional e em bacias sem monitoramento. O objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia de mapeamento de risco de inundação para a bacia do Rio Itajaí-Açu. A metodologia combina informações censitárias, luzes noturnas e dados históricos de vazão. O estudo foi realizado na bacia do Rio Itajaí, onde três municípios (Blumenau, Brusque e Timbó) apresentam manchas de inundação para o evento extremo de setembro de 2011. As cheias de projeto de 5 e 25 anos foram obtidas com a análise de frequência das máximas anuais para as estações dos municípios. Na metodologia de risco as luzes noturnas, a distribuição populacional e as cheias de projeto foram classificadas em três categorias: alta, média e baixa. Dentre os descritores, o HAND foi a que apresentou melhor desempenho com acurácia de 91% para um evento de inundação no município de Blumenau. A declividade e a distância para a drenagem mais próxima também apresentaram resultados satisfatórios. Os resultados encontrados sugerem a existência de um valor ótimo para a geração da rede de drenagem, o qual foi de aproximadamente 4,5km². Os municípios de Brusque e Timbó apresentaram parcelas pequenas de áreas de risco alto e severo, respectivamente 6% e 3%. Esse resultado sinaliza que na metodologia elaborada existe uma tendência de que em cidades de menor porte os aspectos vulnerabilidade e exposição sejam menos expressivos, ainda que a componente perigo - associada ao tempo de retorno da cheia de projeto, seja elevado.

Palavras-chave: Inundação, mapeamento de risco, descritores de terreno, Estado de Santa Catarina

ABSTRACT

Life and monetary losses related to floods are a major concern worldwide and have grown considerably over the past few decades. In 2008, the state of Santa Catarina expenses related to floods were higher than 5 billion reais. The Itajaí River basin located in Santa Catarina is 15000 km² and has a history of severe flooding. Although the level of detail in flood modelling may have risen the computational costs and data requirements might deem the models unsuitable for larger areas. The identification of flood-prone areas using digital terrain models is an alternative mainly for regional scale and for ungauged basins. The objective of this work was to propose a flood risk mapping methodology for the Itajaí-Açu river basin. The methodology combines census information, nightlights and historical streamflow data. The study was carried out at the Itajaí River basin, where three municipalities (Blumenau, Brusque and Timbó) have flood extent maps for the extreme event of September 2011. The design floods of 5 and 25 years were obtained from flow frequency analysis of the annual maxima of the municipalities stations. Among the tested features, the HAND presented the best performance with a 91% accuracy for a flood event at the city of Blumenau. The slope and distance to the nearest drainage also presented satisfactory results. In the risk methodology the nightlights, population distribution and design floods were classified into three categories: high, medium and low. The results suggest that there is an optimum value for the generation of the drainage network, which was approximately 4,5 km². The municipalities of Brusque and Timbó presented small plots of high and severe risk areas, respectively 6% and 3%. This result indicates that at the proposed methodology there is a tendency that in smaller cities the vulnerability and exposure are less expressive even though the hazard component - associated to the return period of the design flood, may be high.

Keywords:

Inundation, risk map, morphological features, State of Santa Catarina.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama conceitual do risco de inundação apresentando as especificidades de cada componente do risco assim como as externalidades as quais cada componente pode vir a ser submetidas de modo primário ou secundário. Adaptado de ZHOU et al., (2017).	26
Figura 2– Interações entre perigo (probabilidade de excedência e intensidade) e vulnerabilidade (Exposição e susceptibilidade). Adaptado de MERZ et al., (2007).....	27
Figura 3- Funções de densidade de probabilidade comumente utilizadas no estudo de vazões máximas.	28
Figura 4- Avaliação de picos de cheia no tempo. a) Análise de tendência monotônica; (b) identificação de períodos de um aumento e de redução das inundações. Adaptado de HALL et al., (2013).	30
Figura 5– Representação esquemática do cálculo da linha de fluxo e posteriormente o cálculo do número de células acumuladas. a) Modelo digital de Terreno utilizado para o cálculo da área de contribuição; b) Cálculo da direção de fluxo por meio do algoritmo D8; c) definição do limiar de células para geração do escoamento; e d) número de células acumuladas.	32
Figura 6– Cálculo da distância Euclidiana. a) Modelo Digital de Terreno; b) Rede de drenagem delimitada em azul e terreno delimitado em cinza; c) distância euclidiana não considera a altura da rede de drenagem e do terreno, d) sendo representada pela equação.	34
Figura 7- Procedimento para o cálculo do HAND. O primeiro passo consiste na elaboração das direções de fluxo. Após a definição do limiar para o início de escoamento, o algoritmo calcula a diferença entre a altura da rede de drenagem (representado na cor cinza) e a altura de cada pixel ao redor da rede de drenagem.....	35
Figura 8- Exemplo de <i>Receiver Operating Characteristics</i> (ROC). Desempenho próximo a reta 1:1 (curva pontilhada - azul) os dados utilizados apresentam o mesmo desempenho caso os dados tenham sido escolhidos randomicamente. Quanto mais próximo a área abaixo da curva de 1, melhor o desempenho do modelo testado.....	37
Figura 9– Localização da bacia do Rio Itajaí e a representação da disponibilidade de dados fluviométricos na bacia. Os municípios sombreados (em cinza) foram os que apresentaram manchas de inundação utilizadas neste estudo. As estações fluviométricas utilizadas neste trabalho apresentam registros de dados superior a 40 anos e estão destacadas com a cor laranja.	39

Figura 10 – Manchas de inundação relacionadas aos eventos de 2011 nos municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.	42
Figura 11 - Comparação do tamanho do pixel entre diferentes resoluções de MDT, SRTM 90m, ASTER 30m, VERTEX 12,5 e SDS 1m.....	44
Figura 12 - Índices utilizados nesse trabalho. declividade, distância para a drenagem mais próxima, altura para a drenagem mais próxima (HAND), índice topográfico, área de contribuição e curvatura.	46
Figura 13 - Principais passos para a metodologia f2HAND: a) análise de frequência, b) cálculo do raster do HAND em um MDT hidrologicamente consistido; c) Mapa de susceptibilidade a inundação, com a probabilidade de um determinado pixel em um ser inundado em qualquer ano. Adaptado: Speckhann et al., (2017).	48
Figura 14 – Procedimento f2HAND: a), b) e c) demonstra o procedimento ilustrado por Rennó et al., 2008 e Nobre et al., (2011); d) um ponto hipotético de GPS coletado na régua de medição na cota 7 metros. O operador do HAND calculou que o pixel tinha valor de 9 metros. e) para normalizar o nível de água com o grid do HAND, o valor extraído da distribuição de extremo deve ser adicionado de 2 metros; f) Comparação entre a classificação do HAND aplicando diretamente o valor do pixel e ajustando o valor usando informações de campo. Adaptado de Speckhann et al., (2017).	48
Figura 15 - Combinação do <i>raster</i> da mancha e o <i>raster</i> descritor de terreno, podendo apresentar quatro possíveis resultados falso positivo, falso negativo, verdadeiro negativo e verdadeiro positivo.....	50
Figura 16 - Metodologia aplicada para identificação do risco de inundação. a) Perigo à inundação, b) distribuição populacional, c) intensidade luminosa de luzes noturnas, e d) risco à inundação com destaque para os municípios de Blumenau, Brusque, Rio do Sul e Timbó.	51
Figura 17 – Representação do perigo de inundação na Bacia do rio Itajaí, utilizando modelo digital de terreno ASTER (resolução de 30 metros) com foco para os municípios de Blumenau e Timbó.	52
Figura 18 - Luzes noturnas Bacia do Rio Itajaí. A intensidade luminosa demonstra maior ou menor presença na bacia.	53
Figura 19 - Distribuição populacional na Bacia do rio Itajaí.	54
Figura 20 - Classificação da suscetibilidade em categorias alta média e baixa. a) Matriz de classificação, b) <i>Scatterplot</i> entre intensidade luminosa e número de habitantes.	55
Figura 21 - Classificação de risco à inundação. A) Matriz de classificação entre Luzes Noturnas e Distribuição Populacional, B) Matriz de	

classificação entre Luzes Noturnas, Distribuição Populacional e f2HAND. C) Risco de Inundação.....	55
Figura 22 – Máximas anuais e quatro distribuições de extremo (GEV, Log-Normal, Log-Pearson 3 e Gumbel) para os municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.	57
Figura 23 - <i>Receiver operating characteristic</i> para diferentes limiares de geração de escoamento (0.05; 1; 2,5; 4; 10; 25; 50; 100; 200km ²) utilizando diferentes MDTs para os municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.	60
Figura 24 - <i>Receiver operating characteristic</i> para seis descritores de terreno utilizando diferentes MDTs em comparação com a mancha de inundação dos municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.	61
Figura 25 - Perigo de inundação para a bacia do Rio Itajaí com zoom para a região de Timbó. O perigo de inundação foi classificado utilizando os valores de tempo de retorno da distribuição de Gumbel para a estação de Timbó.	62
Figura 26 - Risco de inundação para o município de Blumenau, utilizando 4 resoluções de MDT. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.	63
Figura 27 - Risco de inundação para o município de Brusque, MDT utilizando 4 resoluções de MDT. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.	64
Figura 28 - Risco de inundação para o município de Timbó, utilizando 4 resoluções de MDT. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.	65
Figura 29 - Risco à inundação para a Bacia do Rio Itajaí. Destaques para os municípios de Blumenau, Brusque Timbó e Rio do Sul.....	66
Figura 30 - Risco de inundação para o município de Blumenau, utilizando MDT SDS. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.	67
Figura 31 - Risco de inundação para o município de Timbó, utilizando MDT SDS. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos	

de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND. 68

Figura 32- Risco de inundação para o município de Brusque, utilizando MDT SDS. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND. 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos Digitais de Terreno utilizados para execução do trabalho.....	43
Tabela 2 – Limiars utilizados para a elaboração do risco de inundação.	51
Tabela 3 - Porcentagem de acerto dos descritores de terreno distância para a rede de drenagem (DRD), declividade e HAND na representação da inundação utilizando um limiar de 4,5 km ² para a bacia do Itajaí.	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO GERAL.....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 ENCHENTES E INUNDAÇÕES.....	23
2.2 MAPAS DE INUNDAÇÃO	24
2.3 RISCO À INUNDAÇÃO	25
2.4 ESTIMATIVA E PREVISÕES DE CHEIA.....	27
2.5 DESCRITORES DE TERRENO COMO INDICADORES DE ÁREAS PROPENSAS À INUNDAÇÃO	30
2.5.1 Área de Contribuição.....	31
2.5.2 Declividade.....	32
2.5.3 Curvatura.....	33
2.5.4 Distância para a rede de drenagem mais próxima	33
2.5.5 Height Above Nearest Drainage – HAND	34
2.5.6 Índice topográfico.....	36
2.6 CLASSIFICADORES BINÁRIOS E ANÁLISE DA CURVA ROC	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 ÁREA DE ESTUDO	39
3.1 DADOS FLUVIOMÉTRICOS.....	40
3.2 MANCHAS DE INUNDAÇÃO E REGISTROS HISTÓRICOS	40
3.3 MODELO DIGITAL DE TERRENO	42
3.4 CÁLCULO DAS CHEIAS DE PROJETO.....	44
3.5 DESCRITORES DE TERRENO APLICADOS NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS INUNDAÇÃO.....	46
3.6 COMBINAÇÃO DE ANÁLISE DE FREQUÊNCIA COM O MODELO HAND	46

3.7	ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS DESCRITORES DE TERRENO NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROPENSAS À INUNDAÇÃO.....	49
3.8	RISCO À INUNDAÇÃO.....	50
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	CHEIA DE PROJETO	57
4.2	ANÁLISE DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO DIFERENTES DESCRITORES DE TERRENO	58
4.3	MAPEAMENTO DE PERIGO DE INUNDAÇÃO.....	62
4.4	MAPA DE RISCO	62
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	71
	REFERÊNCIAS.....	73
	APÊNDICE A.....	85
	APÊNDICE B.....	87

1. INTRODUÇÃO

A inundação   o fen meno que mais contribuiu para o aumento das perdas monetárias e perdas de vida relacionados a desastres naturais (KUNDZEWICZ et al., 2012; ARRIGHI et al., 2013; BL SCHL et al., 2015; SAYAMA et al., 2015). O aumento dos danos de inunda o pode ser atribuído às mudanças climáticas (MILLY et al., 2002), a uma maior facilidade em reportar eventos extremos, ou simplesmente devido a ocupa o das planícies de inunda o (HALL et al., 2014; KUNDZEWICZ et al., 2014; MOEL et al., 2009).

Estima-se que desde o ano de 1995, 2,3 bilhões de pessoas tenham sido afetadas pelas inunda es (WWAP 2018). A ocupa o das planícies de inunda o contribui significativamente para os efeitos negativos das inunda es, uma vez que 1 bilhão de pessoas vivem em áreas de planície de inunda o (DI BALDASSARE et al., 2013). Os principais atrativos para a ocupa o das planícies são o favorecimento das oportunidades de comércio, produ o agrícola e desenvolvimento econ mico (DI BALDASSARE et al., 2013).

Os custos relacionados às inunda es podem ser classificados em várias categorias: custos diretos, custos de interrup o de negócios, custos indiretos, custos intangíveis e o custo do risco de mitiga o (MEYER et al., 2013), onde os valores envolvidos podem atingir bilhões de euros (MOEL et al., 2009; ARRIGHI et al., 2013). No continente Europeu em um período de 20 anos, as inunda es somaram um prejuízo de 100 bilhões de euros.

No estado de Santa Catarina, somente no ano de 2008, mais de 5 bilhões de reais foram contabilizados como perdas relacionadas as inunda es (HERRMANN et al., 2015). Estima-se que as inunda es bruscas em conjunto com escorregamentos, durante o período de 2000-2010, resultaram em um total de 154 mortes e 58.323 pessoas desabrigadas em Santa Catarina.

O risco   inunda o pode ser definido como a combina o de perigo, exposi o e vulnerabilidade (IPCC 2012). O perigo de inunda o está diretamente associado   probabilidade de ocorrência do evento de inunda o. A exposi o está ligada ao valor econ mico intrínseco da localidade, e a vulnerabilidade está relacionada com a capacidade da sociedade em lidar com os eventos de inunda o (IPCC 2012).

O mapeamento de risco de inunda o   uma das principais ferramentas para auxiliar as comunidades a evitar e mitigar as perdas ocasionadas pelas inunda es (SAVAGE et al., 2014; ARRIGHI et al.,

2013). O Parlamento Europeu instituiu que mapas de risco a inundação sejam feitos em um nível de bacia, de modo a propiciar uma “ferramenta efetiva de informação” concentrando-se na prevenção, proteção e capacidade de se antecipar aos eventos de inundação (EU 2007).

Devido à dificuldade dos modelos em representar a dinâmica dos aspectos físicos (e.g. regime do rio, hidráulica de canais) e as características sociais, as atuais previsões de risco que não incorporam os conceitos de Socio-hidrologia (SIVAPALAN et al., 2012) nos eventos de inundação podem ser irrealistas (DI BALDASSARRE et al., 2015).

Havendo disponibilidade de dados hidrológicos, a modelagem tradicional (a combinação de modelos hidrológicos e hidráulicos) é a mais recomendada. A realidade brasileira, principalmente para bacias menores e longe de grandes centros urbanos, é de ausência de dados com resolução temporal desejada para aplicação dos modelos hidrodinâmicos tradicionais. Dessa forma, a identificação de áreas suscetíveis a inundação utilizando técnicas baseadas no uso de MDTs surgem como alternativa viável.

Modelos hidrodinâmicos como HEC-RAS (USACE-HEC, 2000), MIKE FLOOD (DHI, 2007) e LISFLOOD-FP (BATES e DE ROO, 2000; BATES et al., 2010; NEAL et al., 2012) têm sido amplamente utilizados na elaboração de mapas de perigo a inundação, sendo comum a aplicação na previsão de inundações (SAVAGE et al., 2014).

A combinação de modelos chuva-vazão-inundação é uma outra possibilidade para o mapeamento de inundação (SAYAMA et al., 2012; USHIYAMA et al., 2014; SAYAMA et al., 2015). Alguns desses modelos incorporaram também os danos econômicos em sua estrutura (KOBAYASHI e TAKARA, 2013; KOBAYASHI et al., 2014).

Mesmo com o aumento do nível de detalhamento na modelagem de inundação (NEAL et al., 2012; LEE et al., 2015), a demanda computacional e o aumento do grau de complexidade dos dados podem ser fatores adversos para a aplicação do mapeamento de inundação em grandes áreas. Além disso, a incerteza do mapeamento de risco a inundação não deve ser negligenciada (PAPPENBERGER e BEVEN, 2006; BEVEN et al., 2014; SAVAGE et al. 2016).

O mapeamento do perigo a inundação utilizando métodos baseados em modelos digitais de terreno são uma alternativa na falta de dados hidrológicos (DEGIORGIS et al., 2012; JALAYER et al., 2014; POURALI et al., 2014). Dentre os métodos aplicados, destaca-se o f2HAND (SPECKHANN et al., 2017) e o LISFLOOD (BATES e ROO, 2002).

A bacia hidrográfica do rio Itajaí pode ser considerada a área mais afetada pelas inundações em Santa Catarina, onde cidades como Blumenau, Gaspar e Ilhota têm sofrido as consequências das inundações desde a época dos primeiros assentamentos em 1852 (FRANK e PINHEIRO, 2003). O Complexo do Baú está localizado dentro dos domínios de Ilhota e experimentou grandes calamidades durante o evento extremo de 2008. O mapeamento de perigo de inundação da área foi realizado pela combinação de precipitação de projeto com modelos HEC-HMS e FLO-2D (MONTEIRO e KOBİYAMA 2013; MONTEIRO e KOBİYAMA 2014).

A curva de nível HAND como preditor da extensão de inundação foi aplicado para os municípios de Blumenau e Brusque com precisões de 86-98% quando comparados aos mapas da mancha de inundação passadas (NOBRE et al., 2015, MOMO et al., 2016). No entanto, nenhum desses estudos incorporaram qualquer informação sobre o comportamento da vazão em relação à probabilidade de ocorrência.

Neste trabalho, diversos descritores de terreno (e.g. declividade e curvaturas) foram aplicados sendo apresentada uma metodologia de mapeamento de inundação na escala de município, combinando análise de frequência de vazão históricas com o modelo HAND – denominado f2HAND. Desta forma, o presente trabalho apresenta uma proposta simplificada de risco de inundação.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia de mapeamento de risco de inundação para a bacia do Rio Itajaí-Açu.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

1. Avaliar a performance dos descritores de terreno na identificação de áreas propensas à inundação.
2. Identificar os descritores de terreno mais eficientes na identificação de áreas suscetíveis a inundação.
3. Elaborar mapas de risco de inundação para os municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.

4. Avaliar os principais aspectos da exposição e da vulnerabilidade na bacia do Rio Itajaí.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram descritos informações sobre os fenômenos de inundação e seus mecanismos. O capítulo apresenta a conceitualização de temas relacionados às inundações (e.g. risco, exposição, vulnerabilidade) assim também como a apresentação dos métodos de estimativa de vazões e os descritores de terreno aplicados na identificação de áreas propensas à inundação.

2.1 ENCHENTES E INUNDAÇÕES

As inundações são definidas como a cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta (EU 2007), sendo ocasionado por um fluxo de água superior a capacidade de escoamento do canal, pelo rompimento de barragem ou devido à ocorrência de maré alta. (VIGLIONE et al., 2015 e ROGGER et al., 2012a).

Um número significativo de grandes inundações foi registrado ao redor do mundo nos últimos anos (HALL et al., 2014). O quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) apontou que devido a mudanças climáticas, a frequência e a intensidade dos eventos de enchentes extremas podem aumentar em todo o mundo (IPCC, 2012). Bilhões de dólares são gastos anualmente em função dos danos causados pelas inundações (MUNICH, 2013), estima-se que a perda monetária global anual média relacionada às inundações seja de 104 bilhões de dólares (UNISDR 2015). As tendências do risco de inundação demonstraram que, até 2050, as perdas por inundações sob futuras mudanças climáticas e o desenvolvimento socioeconômico poderão dobrar (JONGMANN et al., 2014).

Na Europa, mudanças no clima têm promovido um deslocamento nas magnitudes e na ocorrência das inundações, sendo o clima uma forçante de impacto significativo (BLÖSCHL et al., 2017). Além das mudanças naturais, intervenções humanas têm afetado a disponibilidade hídrica em diversas regiões (VELDKAMP et al., 2017), onde não somente o excesso de água (inundações) passa a ser um problema, mas a escassez (seca) também altera/impacta a vida das comunidades.

Inundações ocasionadas pelo extravasamento de rios, têm como principal contribuição um aumento na precipitação. Em lugares frios o derretimento da neve também pode ser um fator significativo. As inundações costeiras apresentam como gatilho os deslocamentos

tectônicos (tsunamis) ou uma combinação de ventos fortes e maré alta (BLÖSCHL et al., 2015).

Eventos hidrológicos extremos têm crescido (HALL, et al., 2014) nos últimos anos, no entanto, os registros ao redor do planeta apontam para a presença de uma heterogeneidade (BLÖSCHL et al., 2015), com aumento dos índices fluviométricos e pluviométricos em algumas localidades e diminuição dos índices em outras regiões. Devido às observações realizadas, é possível afirmar que os processos das inundações ocasionadas por eventos extremos não estão completamente compreendidos (ROGGER et al., 2012b), e há uma busca por uma compreensão melhor sobre os picos de vazão (*flood reasoning* – MERZ e BLÖSCHL 2008ab) e a incorporação das dinâmicas entre a sociedade e os processos hidrológicos (SIVAPALAN et al., 2012, DI BALDASSARRE et al., 2013, VIGLIONE et al., 2016 e VOGEL et al., 2015).

A compreensão das questões envolvendo o risco de inundação tem sido ampliada e aprofundada, no entanto, ainda existem lacunas no conhecimento relacionado ao risco de inundações as quais podem acarretar em consequências devastadoras. Esse espectro envolvendo a indeterminação e a incerteza foi denominado por MERZ et al., 2015 como surpresa.

Os autores sugerem que a surpresa apresenta papel importante na avaliação de risco de inundação, sendo muitas vezes negligenciada. MERZ et al. (2015) propõem que as fontes de surpresa podem ser atribuídas a duas vertentes: 1) a complexidade dos sistemas de risco de inundação, e 2) a tendência da percepção humana e do pensamento. Para reduzir o aspecto surpresa é necessário aumentar a previsibilidade dos modelos – e.g. evitando que modelos sejam uma caixa preta, e buscar um entendimento mais profundo dos processos envolvidos.

Nesse contexto, os mapas de risco à inundação são ferramentas que auxiliam na antecipação e na prevenção para eventos de inundação. Mapas de inundação utilizam uma combinação de informações topográficas e informações hidrológicas de modo a prever quais as regiões e localidades que são mais passíveis de serem atingidas pela elevação do nível das águas.

2.2 MAPAS DE INUNDAÇÃO

Manchas de inundação retratando eventos passados são comumente empregadas para testar a performance dos modelos hidráulicos e hidrológicos (BATES et al., 2010, NEAL et al., 2012,

NOBRE et al., 2011 MANFREDA et al., 2015, KWAK et al., 2010, 2012) sendo fundamentais para uma melhor compreensão dos fenômenos de inundação e para a calibração e validação dos modelos.

A disponibilização de dados históricos de inundação e a emissão de alertas quanto a possíveis eventos extremos têm sido praticada em diversos países através das Agências de meio ambiente (FEMA – EUA, Environment Agency Reino Unido, HORA – Áustria, CEMADEN–Brasil).

Na bacia do Rio Itajaí, o município de Blumenau foi um dos pioneiros na elaboração de mapas de inundação que retratam o alcance dos eventos de inundação (REFOSCO et al., 2013). A disponibilidade de registros de inundação tem ajudado na verificação da performance de estudos de inundação na bacia do Rio Itajaí (NOBRE et al., 2015, SPECKHANN et al., 2017).

Na bacia do Rio Itajaí, os municípios de Blumenau, Brusque, Rio do Sul e Timbó têm buscado parcerias para a realização do levantamento de manchas de inundação. No entanto, o quadro reduzido de profissionais técnicos aptos a realizar as demarcações, aliada as atribuições e demandas locais depositada nos órgãos responsáveis, acarretam em um baixo número de cidades com levantamento de inundação disponível.

2.3 RISCO À INUNDAÇÃO

Os riscos à inundação são o resultado de eventos hidrológicos extremos em combinação com atividades humanas (GAIN e HOQUE, 2013), sendo importante considerar de modo conjunto o perigo, a exposição e a vulnerabilidade. Espera-se que uma parte significativa da crescente tendência das perdas por inundações esteja relacionada a fatores socioeconômicos, como acumulação de ativos e aumento da vulnerabilidade em áreas propensas a inundações (DIBALDASSARRE et al., 2013).

O risco é o resultado da interação entre perigo, exposição e vulnerabilidade (Figura 1). O perigo está associado a uma probabilidade e a intensidade do evento de inundação (Figura 2). Velocidade, concentração de poluentes, tamanho do sedimento arrastado e altura da lâmina d'água são critérios usualmente adotados para a classificação da intensidade da inundação. A altura da lâmina d'água, por se tratar de um indicador representativo, comumente é transformado em cenários de inundação (Figura 2) (MERZ et al., 2015).

O conceito de vulnerabilidade não é unânime. Uma das definições é o de que a vulnerabilidade de uma determinada região está

diretamente associada a dois aspectos principais: a exposição e a susceptibilidade (Figura 2) (MERZ e THIECKEN 2007). Alguns indicadores de vulnerabilidade podem ser: a ausência de estruturas de proteção a enchentes, garantia econômica de bens e vidas suscetíveis a inundação (ELSHORBAGY et al., 2017).

A exposição representa os elementos que estão em risco durante os eventos de inundação, i.e. as pessoas e os bens envolvidos em uma determinada localidade (Figura 1). Na análise da exposição almeja-se responder “quem” ou “o quê” será afetado pelas inundações. Já o conceito de susceptibilidade visa compreender como os elementos afetados serão danificados, indicando assim quais/quantos destes elementos serão atingidos pelas inundações e qual será o impacto causado pelo dano (MERZ et al., 2015). Neste contexto, a exposição está intimamente conectada com a capacidade de determinada área em lidar/responder/antecipar e mitigar.

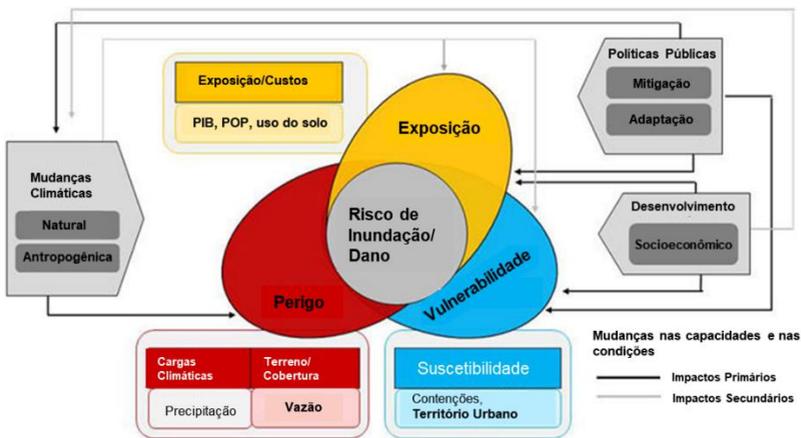


Figura 1- Diagrama conceitual do risco de inundação apresentando as especificidades de cada componente do risco assim como as externalidades as quais cada componente pode vir a ser submetidas de modo primário ou secundário. Adaptado de ZHOU et al., (2017).

Existem também outros fatores que desempenham papel relevante no risco de inundação. Por exemplo, a variabilidade climática natural, mudanças climáticas induzidas pelo homem e mudança de uso do solo (Figura 1).

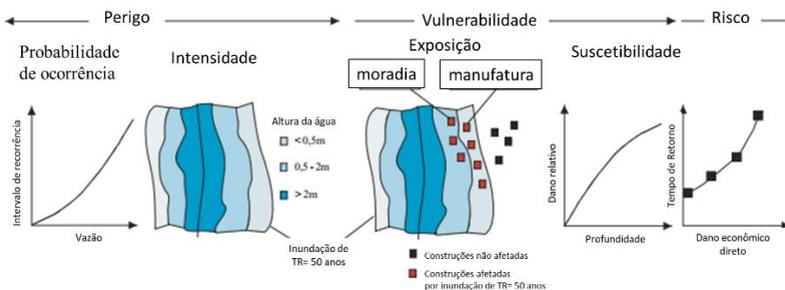


Figura 2– Interações entre perigo (probabilidade de excedência e intensidade) e vulnerabilidade (Exposição e susceptibilidade). Adaptado de MERZ et al., (2007).

Na concepção dos sistemas de risco de inundação é importante que se consiga responder as surpresas (e.g. incerteza, *known unknowns* MERZ et al., 2015). Nesse contexto, a adaptabilidade e a robustez exercem papel central. A robustez está atrelada a capacidade de se tornar imune as surpresas, já a adaptabilidade está relacionada com a habilidade de se ajustar em meio a mudanças não previstas (MERZ et al., 2015).

2.4 ESTIMATIVA E PREVISÕES DE CHEIA

A estimativa de cheias de projeto desempenha papel central nas medidas de proteção contra as inundações e possui papel fundamental na redução dos riscos (ROGGER et al., 2012a RENARD et al., 2013). No âmbito da hidrologia, principalmente no que tange os problemas de engenharia, a premissa de estacionariedade tem sido amplamente utilizada (EHRET et al., 2014). Discussões sobre as premissas de estacionariedade e não estacionariedade em hidrologia tem emergido (MILLY et al., 2008, MONTANARY e KOUTSOYANNIS 2014, e KOUTSOYIANNIS e MONTANARY 2015), trazendo questionamentos sobre como a quantidade de risco pode variar significativamente se a análise for desenvolvida utilizando métodos da estatística tradicional, ou se os dados forem classificados como não estacionários (READ e VOGEL 2015).

Métodos convencionais de estimativa de vazões apresentam limitações na previsão do comportamento das inundações sob eventos extremos (ROGGER et al., 2012a), especialmente para aplicações em diferentes escalas de tempo e espaço. Portanto, é fundamental que os processos de regionalização sejam empregados com de modo criterioso para evitar equívocos.

A análises de frequência de vazão e a estimativa de vazões de projeto são áreas de interesse desde as primeiras pesquisas envolvendo princípios de probabilidade aplicados à problemática das inundações (MERZ e BLÖSCHL 2008ab; ROGGER et al., 2012b).

Para oferecer um guia, manuais foram elaborados por diversos países visando fornecer um subsídio nos estudos de frequência empregando dados hidrológicos (RENARD et al., 2013). O mais recente guia elaborado nos Estados Unidos, o Bulletin 17C, recebeu críticas (READ e VOGEL 2015) por não levar em consideração a possibilidade de não estacionariedade das máximas anuais.

O ajuste de dados observados a uma distribuição de extremo é um desafio na análise estatística de vazões (STEDINGER, VOGEL e FOUFOULA-GEORGIU, 1992). O Serviço Geológico Americano (USGS 2012) avalia que ao estimar um determinado tempo retorno, o valor extrapolado não deve exceder duas vezes o tamanho da série de dados (USGS 2012).

As distribuições Log-Normal, Gumbel, Weibull, Log Pearson tipo 3 e GEV estão entre as mais empregadas em vazões de projeto (STEDINGER, VOGEL e FOUFOULA-GEORGIU, 1992). A Figura 3 apresenta uma comparação entre diferentes distribuições de extremo comumente aplicadas no estudo de vazões máximas.

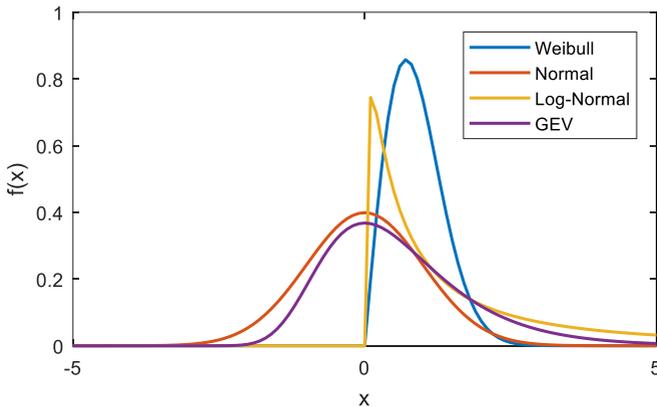


Figura 3- Funções de densidade de probabilidade comumente utilizadas no estudo de vazões máximas.

A distribuição Normal representa fenômenos que possuem comportamento definido – onde a variável flutua de forma simétrica ao

redor de um valor central (NAGHETTINI e PINTO, 2007) e possui média (μ) e desvio padrão (σ) como parâmetros.

De um modo geral, os processos hidrológicos não são normalmente distribuídos, e para variáveis com valores não negativos, o log dos seus valores pode resultar distribuição normal.

A distribuição de Gumbel é uma das mais comumente empregadas, sendo a utilização justificada pela simplicidade na aplicação e por apresentar resultados satisfatórios de aderência aos dados de vazões máximas (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Gumbel possui como parâmetros a média e desvio padrão (assim como a distribuição normal) e o coeficiente de assimetria fixado em 1,1396.

O *United States Geological Survey* (USGS), recomenda a aplicação da distribuição Log Pearson Tipo 3 (LP3) para o estudo de vazões extremas (NAGHETTINI e PINTO, 2007). A distribuição é utilizada em diversos estudos, apresentando ajuste satisfatórios aos dados medidos (McCUNEN, 1941).

Um dos perigos na aplicação de distribuições de extremo para o cálculo de vazões máximas reside na premissa de que os dados coletados consigam representar fidedignamente o comportamento do rio. Caso os períodos de dados de vazão disponíveis não apresentem uma representatividade das inundações futuras, as conclusões podem gerar consequências catastróficas.

A Figura 4a apresenta um exemplo de como a utilização apenas de uma parte dos registros históricos podem acarretar na identificação equivocada de tendência, quando na verdade o que se observa é a existência de períodos com maior e menor concentração de cheias (HALL et al., 2013) ocorrendo de modo cíclico. É por este motivo que no estudo de vazões máximas, uma baixa disponibilidade dos dados restringe a confiabilidade das extrapolações, principalmente em bacias de menor porte.

Por este motivo, a inclusão de outras fontes de informação relacionadas a inundações apresenta um papel fundamental para uma melhor compressão dos fenômenos e dos processos físicos envolvidos (BLÖSCHL E MERZ 2007ab). Os autores afirmam que na resolução de problemas de engenharia (e.g. estimativa de vazões e previsão de vazões em bacias sem dados) tem-se buscado um grau maior de refinamento matemático, que ainda assim é frágil visto a quantidade de premissas que são aceitas.

Outro aspecto observado é que os eventos extremos tendem a ocorrer em formato de cluster (Figura 4b), sendo classificados como períodos de um aumento ou redução das inundações e que, dependendo

da magnitude dos eventos de inundação, é possível que as forçantes com maior pressão sob o sistema sejam diferentes. Dessa forma, é vital que informações sejam agregadas para aumentar a compreensão dos processos e consequentemente das extrapolações (BLÖSCHL e MERZ 2007ab), evitando assim que estruturas sejam dimensionada de maneira inapropriada (superestimação ou subestimação) e que vidas sejam prejudicadas.

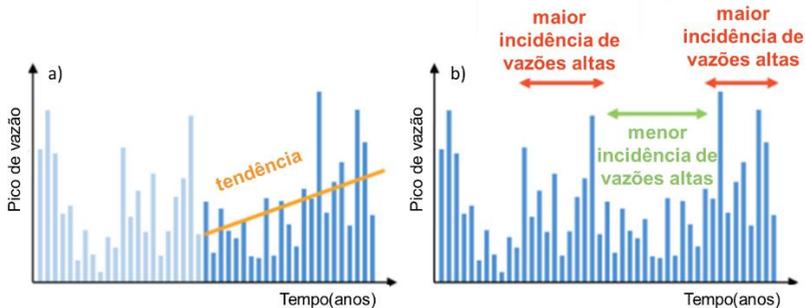


Figura 4- Avaliação de picos de cheia no tempo. a) Análise de tendência monotônica; b) identificação de períodos de um aumento e de redução das inundações. Adaptado de HALL et al., (2013).

2.5 DESCRITORES DE TERRENO COMO INDICADORES DE ÁREAS PROPENSAS À INUNDAÇÃO

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 (MANFREDA et al., 2014).

A delimitação de áreas propensas a inundações pode ser realizada com a aplicação de métodos simples que dependem de características morfológicas da bacia e.g., NARDI et al., (2006); MANFREDA et al., (2011, 2014); DEGIORGIS et al., (2012); JALAYER et al., (2014).

No início dos anos 2000, os avanços no campo da topografia em conjunto com as ferramentas de georeferenciamento propiciaram a utilização de descritores de terreno na delimitação de áreas suscetíveis a inundação (NARDI et al., 2006).

Pouco tempo depois, MANFREDA et al., (2011) propuseram a utilização do índice topográfico modificado como uma ferramenta para a detecção de áreas propensas à inundação. DEGIORGIS et al., (2012) sugerem que manchas de inundação fossem transformadas em raster, e

que classificadores binários fossem empregados para caracterizar o desempenho de descritores de terreno na representação de eventos de inundação passados.

Ainda que os modelos hidrodinâmicos bidimensionais tenham ganhado força em razão do aumento da capacidade de processamento dos computadores, o emprego de modelos hidrodinâmicos na escala de município pode ter um alcance limitado em função da exigência e da quantidade de informações necessárias para o seu funcionamento (e.g. seção transversal, uso e ocupação do solo, hidrogramas de entrada).

Modelos Digitais de Terreno (MDT) são a base topográfica empregada na modelagem de processos hidrológicos quando se deseja representar as características da paisagem. A utilização de MDT como o dado de entrada tem se revelado importante informação para um maior controle e precisão em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos (BATES e ROO 2000, BATES et al., 2010).

A identificação de áreas suscetíveis a inundação utilizando descritores de terreno 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 et al., 2017). Esse aumento pode estar associado a necessidade de proteger as populações e as cidades, mas também para garantir que a expansão dos limites urbanos aconteça na direção de localidades com um reduzido potencial de risco ambiental.

Para quantificar a capacidade de descritores de terreno DEGIORGIS et al., (2012) propuseram a utilização de diversos índices morfológicos (distância para a drenagem mais próxima, curvatura, área de contribuição, declividade) e o emprego de classificadores binários para comparar os resultados encontrados na identificação de áreas suscetíveis a inundação no noroeste da Itália. Ainda na Itália, NARDI et al., (2013) utilizaram MDT SRTM com resolução de 3 arcsec agregando informações a respeito da rugosidade (número de Manning) visando delimitar o alcance das inundações.

2.5.1 Área de Contribuição

O cálculo da área de contribuição é totalmente dependente do MDT (Figura 5a). A identificação adequada das linhas de fluxo é um fator fundamental, onde algoritmos são aplicados para determinação do fluxo levando em consideração as possíveis direções e.g., D8 (Figura 5b). Técnicas de remoção de inconsistências no MDT (e.g. MARK e O'CALLAGHAN, 1984) proporcionam a criação de um modelo digital

de terreno hidrologicamente consistido e por consequência na geração de linhas de fluxo adequadas.

As linhas de fluxo indicam qual será a direção que o fluxo irá seguir ao percorrer a célula (Figura 5c). Um dos algoritmos mais utilizados para calcular a direção do fluxo, o D8 (MARK e O'CALLAGHAN, 1984), apresenta 8 direções possíveis de fluxo (Norte, Sul, Leste Oeste, Sudoeste, Noroeste, Sudeste e Nordeste) (Figura 5b). No algoritmo D8, calcula-se qual o caminho será percorrido pela água levando em consideração a altura e a distância da célula para as células vizinhas com oito possíveis direções (Figura 5b).

Após a identificação das linhas de fluxo (Figura 5c), a área de contribuição indica a quantidade de células que estão acumulando até o pixel em questão (Figura 5d).

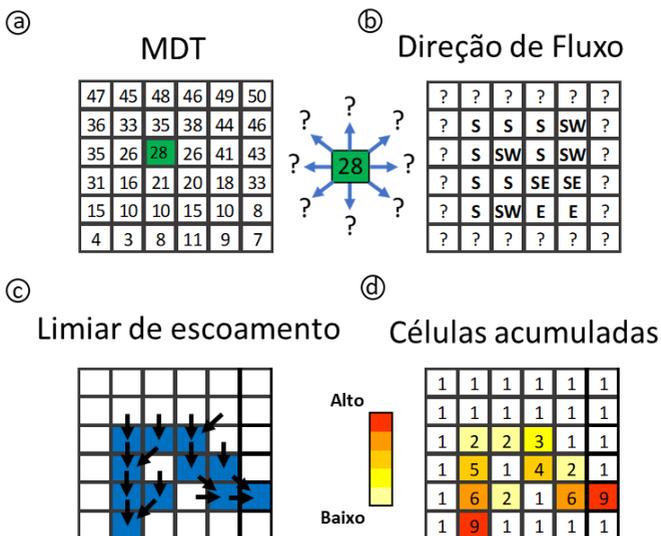


Figura 5– Representação esquemática do cálculo da linha de fluxo e posteriormente o cálculo do número de células acumuladas. a) Modelo digital de Terreno utilizado para o cálculo da área de contribuição; b) Cálculo da direção de fluxo por meio do algoritmo D8; c) definição do limiar de escoamento; e d) número de células acumuladas.

2.5.2 Declividade

A declividade é a variação em horizontal (dz/dx) e a variação na vertical (dz/dy), onde o valor em radianos pode ser obtido através da equação 1.

O algoritmo da declividade calcula a máxima variação da taxa para cada uma das células vizinhas. Dessa forma, quanto maior a elevação dividida pela altura, maior será a taxa.

$$Declividade = \left(\sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \right) \quad (1)$$

A declividade é um indicador importante nas áreas de inundação, sendo aplicado de modo isolado ou como parte do cálculo de outro índice (e.g. índice topográfico). Destaca-se que a declividade apresenta papel central também em aspectos relacionados a deslizamentos, sendo a inclinação da encosta um dos principais elementos para o cálculo do ângulo limite.

2.5.3 Curvatura

A superfície de um modelo digital de terreno pode ser expressa através de um polinômio de terceira ordem incompleta (Eq. **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A primeira derivada da equação indica a taxa com que o ângulo se modifica em comparação com cada uma das células (declividade). A segunda derivada representa a curvatura e está relacionada com o formato e a identificação de áreas côncavas, podendo ser um indicativo da presença de vales, e conseqüentemente localidades mais propensas as inundações (DEGIORGIS et al., 2012; MANFREDA et al., 2014). A equação da curvatura (SHARY et al., 2001), também denominada como curvatura vertical (C_v), é representada pela Equação (2),

$$C_v = (p^2 \cdot r + 2 \cdot p \cdot q \cdot s + q^2) / [(p^2 + q^2)(1 + p^2 + q^2)^{3/2}] \quad (2)$$

onde $p = \left(\frac{dz}{dx}\right)$, $q = \left(\frac{dz}{dy}\right)$, $r = \left(\frac{d^2z}{dx^2}\right)$, $s = \left(\frac{d^2z}{dx dy}\right)$ e $t = \left(\frac{d^2z}{dy^2}\right)$.

2.5.4 Distância para a rede de drenagem mais próxima

A distância para a rede de drenagem mais próxima (DRD) é a medida do centro da célula para o objeto de referência (Figura 6). Para realização do cálculo da distância euclidiana, calcula-se a menor distância que um determinado pixel se encontra do aspecto ao qual se está comparando. Neste trabalho foi calculado a distância que cada pixel do

MDT estava da rede de drenagem com um raio de até 5 quilômetros. Na Figura 6 foi calculada a distância a partir de um limiar de geração de escoamento.

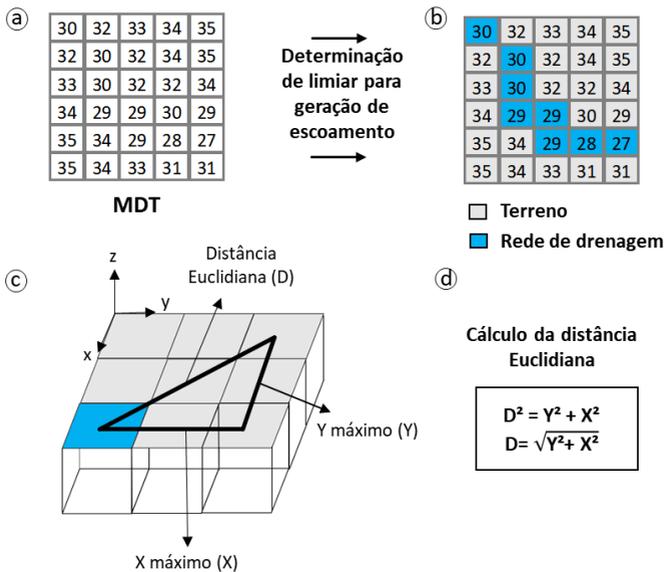


Figura 6– Cálculo da distância Euclidiana. a) Modelo Digital de Terreno; b) Rede de drenagem delimitada em azul e terreno delimitado em cinza; c) distância euclidiana não considera a altura da rede de drenagem e do terreno, d) sendo representada pela equação.

2.5.5 Height Above Nearest Drainage – HAND

O *Height Above Nearest Drainage* – HAND (RENNÓ et al, 2008; NOBRE et al, 2011) é um modelo que converte o modelo digital de terreno (MDT), levando em consideração a diferença de altitude do terreno e a altitude da rede de drenagem mais próxima de cada pixel (Figura 7).

O modelo HAND tem se mostrado como um dos descritores de terreno que melhor se sobressaem na identificação de áreas de inundação. Estudos realizados no Sul do Brasil apontam para uma eficiência superior a 90% na correspondência com eventos passados (NOBRE et al., 2015; SPECKHANN et al., 2017). Em bacias localizadas na Itália, identificou-se que a altura para a drenagem mais próxima é o descritor de terreno que

melhor representa as áreas de inundação (MANFREDA et al., 2011 e 2014 e DEGIORGIS et al., 2012).

Recentemente, Liu et al., (2017) aplicaram o modelo HAND para todo território dos Estados Unidos utilizando modelo digital de terreno com resolução de 10 metros. A diversidade de aplicações do modelo HAND cresceu rapidamente. Empregos do algoritmo HAND têm sido observados em diversas áreas: ecologia, modelagem hidrológica, mapeamento de superfície de água, susceptibilidade a deslizamentos entre outras (RAHMATI et al., 2018).

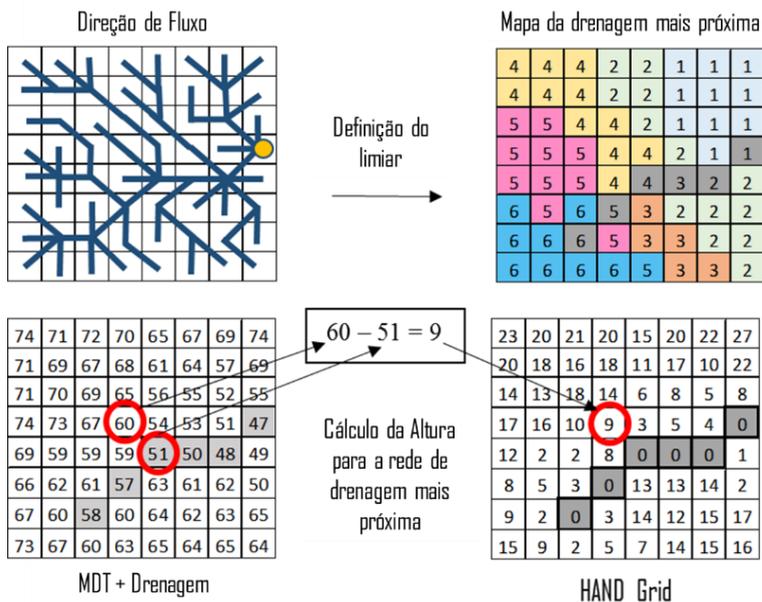


Figura 7- Procedimento para o cálculo do HAND. O primeiro passo consiste na elaboração das direções de fluxo. Após a definição do limiar para o início de escoamento, o algoritmo calcula a diferença entre a altura da rede de drenagem (representado na cor cinza) e a altura de cada pixel ao redor da rede de drenagem.

O TerraHidro¹ é uma aplicação desenvolvida pelo INPE, a qual hospeda o modelo HAND dentro de seus domínios. Dentro do software é possível realizar todas as etapas de preenchimento de falhas e remoção de inconsistências pré-requisitos para a utilização adequada do modelo HAND. Recentemente, RAHMATI et al., 2018 desenvolveram uma

¹ <http://www.dpi.inpe.br/terrahidro/doku.php>

extensão do modelo HAND (HANDtool) em Python, a qual potencializa a utilização do modelo dentro do software ArcGIS e reduz algumas limitações referente ao tamanho do MDT. Dessa forma, a integração do modelo HAND com o ArcGIS propicia que algumas das barreiras de processamento sejam superadas.

2.5.6 Índice topográfico

Área de contribuição e declividade são os principais componentes do índice topográfico proposto por Beven e Kyrkby (1979). O índice topográfico (*Topographic Wetness Index*) desenvolvido como uma parte do TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY 1979), quantifica o efeito da topografia no processo de geração de escoamento. Dada a simplicidade de cálculo, o índice topográfico é usado para descrever processos hidrológicos, padrões de crescimento de vegetação em florestas e até processos biológicos (POURALI et al., 2014).

A equação 3 define o índice topográfico:

$$TI = \ln\left(\frac{a}{\tan\beta}\right) \quad (3)$$

onde a é a área de contribuição e $\tan\beta$ é definido como a declividade.

Adaptações ao índice topográfico possibilitaram que áreas propensas à inundação fossem identificadas (MANFREDA et al., 2015). Nos estudos relacionados a aplicação do índice no mapeamento de inundação, algumas melhorias foram propostas, e.g. a inclusão da transmissividade (POURALI et al., 2014) e expoentes (MANFREDA et al., 2014).

2.6 CLASSIFICADORES BINÁRIOS E ANÁLISE DA CURVA ROC

Ao comparar a mancha elaborada pelo modelo com mapas de inundação tem-se um *raster* cujos pixels podem assumir somente dois valores possíveis: zero – indicando que a localidade não é afetada pela inundação, ou 1 – área atingida pela inundação. A partir desse momento, inicia-se a aplicação da curva *Receiver Operating Characteristics* (ROC) na análise de desempenho de descritores de terreno em estudos de inundação.

As ROCs são elaboradas através de um gráfico da taxa de falsos positivos (eixo x) e taxa de verdadeiro positivos (eixo Y). Quanto mais

próximo de 1 for a área inferior a curva, melhor o desempenho (Figura 8). Caso a curva se aproxime da reta 1:1, utilizar os resultados dos descritores de terreno ou dados gerados aleatoriamente produziria o mesmo desempenho do modelo (MANFREDA et al., 2015). A Figura 8 apresenta um resumo da interpretação de curvas ROC.

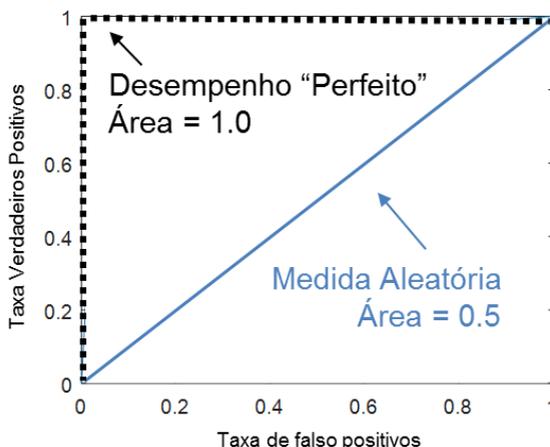


Figura 8- Exemplo de *Receiver Operating Characteristics* (ROC). Desempenho próximo a reta 1:1 (curva pontilhada - azul) os dados utilizados apresentam o mesmo desempenho caso os dados tenham sido escolhidos aleatoriamente. Quanto mais próximo a área abaixo da curva de 1, melhor o desempenho do modelo testado.

Com a utilização de curvas ROC é possível quantificar o desempenho de feições do terreno em relação a mapas de inundações passadas, podendo assim comparar não somente o quanto o modelo foi capaz de acertar, mas também identificar os falsos positivos e falsos negativos. O emprego de curvas ROC ganhou notoriedade e diversos estudos passaram a adotar as curvas como método de verificação de desempenho do modelo de inundação (NARDI et al., 2013, MANFREDA et al., 2014, 2015, POURALI et al., 2014, SPECKHANN et al., 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Rio Itajaí tem 15.000 km² e está localizada no Estado de Santa Catarina, no Sul do Brasil (Figura 9). A precipitação média anual na bacia é de 1610 mm e o clima é classificado como Köppen Cfa (KOTTEK et al., 2006). O número de moradores da bacia do Itajaí-Açu é de quase 1,5 milhão. Blumenau, a maior cidade, tem uma população acima de 338 mil habitantes (IBGE 2010).

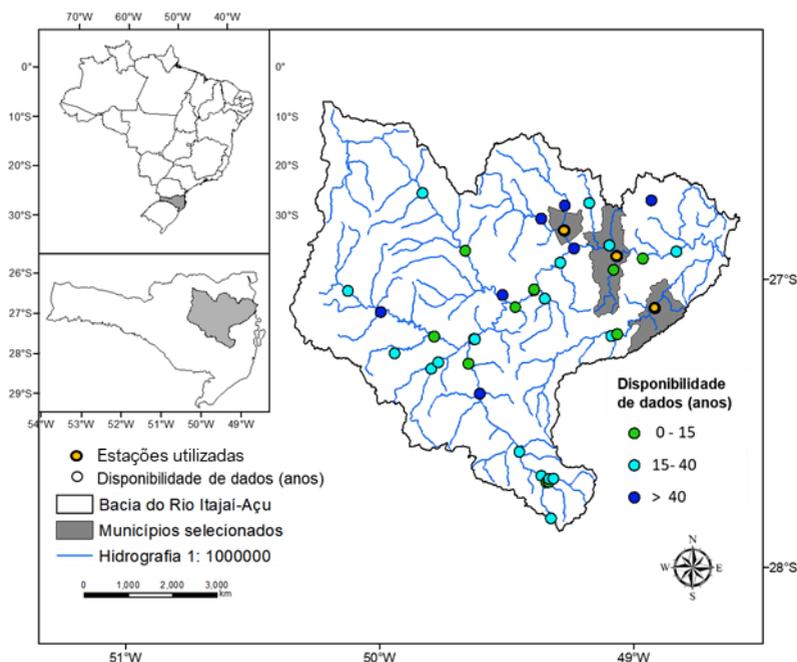


Figura 9– Localização da bacia do Rio Itajaí e a representação da disponibilidade de dados fluviométricos na bacia. Os municípios sombreados (em cinza) foram os que apresentaram manchas de inundação utilizadas neste estudo. As estações fluviométricas utilizadas neste trabalho apresentam registros de dados superior a 40 anos e estão destacadas com a cor laranja.

Agência de Cooperação Internacional do Japão - A JICA realizou um estudo na bacia de Itajaí para fornecer soluções para aos problemas de inundação. O estudo recomendou a construção de sete pequenas barragens, o aumento de dois metros da barragem de Oeste e várias

modificações de canais para reduzir o impacto da onda de inundação (JICA, 2011).

A bacia possui 43 estações com registros históricos de vazão. Neste trabalho foram utilizadas as estações fluviométricas dos municípios de Blumenau, Brusque e Timbó, destacados na Figura 9 (cor cinza).

3.1 DADOS FLUVIOMÉTRICOS

Os dados fluviométricos foram obtidos da Agência Nacional de Águas - ANA (www.hidroweb.ana.gov.br). A bacia do rio Itajaí-Açu conta com estações medidoras de precipitação e de vazão, as quais possuem registro de dados superior a 50 anos. Blumenau, Brusque e Timbó possuem informações de cota desde a década de 30, sendo que Blumenau apresenta o maior registro de dados, com mais de 70 anos de dados coletados.

Para o cálculo das máximas anuais de vazão foram selecionadas as estações fluviométricas dos municípios Blumenau, Brusque e Timbó. Os dados foram analisados e consistidos, de modo a remover valores inconsistentes e/ou equivocados para posterior obtenção dos valores das vazões de projeto (5 e 25 anos).

3.2 MANCHAS DE INUNDAÇÃO E REGISTROS HISTÓRICOS

De acordo com a Diretiva Europeia, os mapas de inundação podem ser categorizados em dois: mapas de perigo e mapa risco de inundação (EU 2007). Os mapas de perigo de inundação devem apresentar quais as localidades que serão afetadas com a ocorrência de uma determinada magnitude do evento de inundação, podendo ser indicados por manchas de inundações de eventos passados. Os mapas de risco de inundação devem fornecer quais as possíveis consequências adversas para determinadas magnitudes de eventos de inundação.

Neste trabalho, os mapas de perigo de inundação foram comparados com a extensão das cheias de diferentes eventos para diferentes períodos de retorno. As áreas de inundação usualmente são elaboradas de acordo com a cota da régua de monitoramento utilizadas pela Defesa Civil no município.

Os municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota são três dos mais atingidos pelas inundações (SPECKHANN et al., 2017). No entanto, os municípios de Timbó, Rio do Sul e Brusque também apresentam grande histórico de problemas ocasionados pelas inundações.

No município de Blumenau, a área inundada foi levantada por REFOSCO et al. (2013), o qual mapearam a área de extensão da inundação de setembro de 2011 ocorrida em Blumenau com um GPS Geodésico e reuniu mais de 330 pontos em todo o município. Um procedimento similar foi realizado também para os municípios de Brusque e Timbó, onde os responsáveis da Defesa Civil dos municípios entraram em contato com o CEOPS (Centro de Operação do Sistema de Alerta) para a realização da mancha de inundação em consultas junto a população local.

Ao todo, na bacia do Rio Itajaí, três municípios apresentam mapas de inundação elaborados em parceria com a Defesa Civil (

Figura 10). A extensão das manchas foi elaborada baseada nos eventos de setembro de 2011. Os dados foram cedidos pelos responsáveis da Defesa Civil dos municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.

Blumenau tem um registro de 77 eventos maiores do que o nível de inundação de 8 metros desde 1852. O nível de 8 metros corresponde ao período de retorno de menos de 2 anos. Neste nível, pelo menos 180 edifícios foram afetados pela inundação na cidade de Blumenau (REFOSCO et al., 2013). Durante o mês de setembro, a precipitação acumulada foi de 248,7mm, sendo responsável pela cota de 13 metros e diversos pontos de deslizamentos.

O município de Brusque também foi afetado durante as chuvas de 2011, sendo que todos os foram atingidos. Após o evento, foram coletados 1952 pontos de GPS. A estação pluviométrica do município registrou durante o mês de setembro 240,5 mm.

Para o mesmo período em Timbó foi registrado 156,2 mm. O alto índice pluviométrico para a região, desencadeou a queda de diversas barreiras no município. Com a elevação do nível do rio, estima-se que 5.000 residências foram atingidas sendo que aproximadamente 1.000 famílias tiveram que sair de casa (Prefeitura Municipal de Timbó). O número impressiona principalmente devido ao total de residências no município, que contabiliza 12.000 moradias (IBGE 2010).

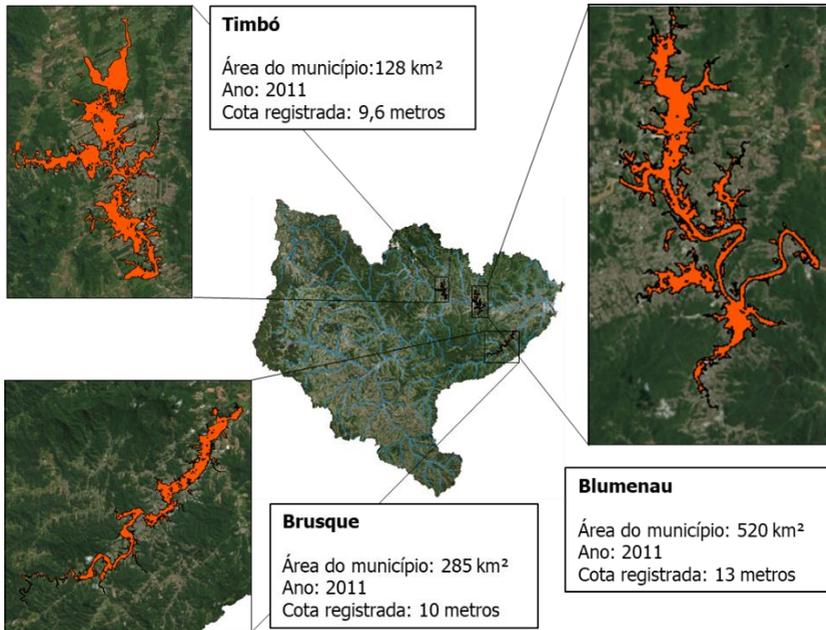


Figura 10– Manchas de inundação relacionadas aos eventos de 2011 nos municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.

3.3 MODELO DIGITAL DE TERRENO

Após o grave desastre hidrológico ocorrido em 2008, o Estado de Santa Catarina, por meio da Secretaria de Desenvolvimento Sustentável (SDS), elaborou um Modelo Digital de Terreno (SDS-DEM) de alta resolução com precisão vertical compatível com escala 1:10.000. Este é um conjunto de dados ímpar, pois até 2014 os únicos dados disponíveis para todo o território eram o MDT SRTM 3 Arc-Segundos com uma resolução de 90 metros.

No Brasil, os MDTs 1 Arc-Second *void filled* SRTM 30m têm uma precisão compatível com escala de 1: 100.000 (SOUZA E LOCH, 2008; MICELI et al, 2011), sendo que as principais inconsistências nos dados de elevação foram removidas e ajustadas usando outras fontes de elevação ou algoritmos de interpolação (USGS, 2016).

A plataforma VERTEX, é o portal do *Alaska Satellite Facility* para o download de imagens de sensoriamento remoto. A resolução de 12,5 metros é obtida pela reinterpolação de imagens ALOS PALSAR, sendo a missão responsável pela *Japan Aerospace Exploration Agency*

(JAXA). O MDT ASTER é um produto conjunto do Ministério de Economia, Comércio e Indústria Japonesa (METI) e a NASA com pixel de 30m disponível para download dentro da plataforma do serviço geológico americano (USGS).

Os Modelos Digitais de Terreno utilizados neste trabalho estão disponibilizados gratuitamente. A Tabela 1 apresenta as resoluções dos modelos utilizados assim como o endereço para o download dos dados. Vale ressaltar que para todos os modelos, as zonas costeiras apresentam algumas falhas.

A performance satisfatória de mapeamentos de áreas susceptíveis utilizando MDT's de baixa resolução tem sido um estímulo para o desenvolvimento de técnicas que se baseiam em informações de terreno para identificar áreas propensas à inundação. Neste trabalho foram testados raster com tamanhos que variaram de 1 metro (onde o estudo realizado foi executado somente em nível de município) até 90 metros. A Figura XX ilustra a comparação dos diferentes tamanhos de raster empregados neste trabalho.

Tabela 1– Modelos Digitais de Terreno utilizados para execução do trabalho.

Imagem utilizada	Satélite	Resolução	Download
SRTM	Shuttle Radar	90m e 30m	https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/
ASTER	ASTER GDEM	30m	https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/
VERTEX	ERS-1 e ERS-2	12,5m	https://vertex.daac.asf.alaska.edu/
SDS	Aerofototelevantamento	1m	http://sigsc.sds.sc.gov.br/

Apesar da resolução grosseira do DEM SRTM de 3 Arc-Seconds, bons resultados foram obtidos no mapeamento de inundação utilizando métodos baseados no MDT (MANFREDA et al., 2011; NOBRE et al., 2015).

Com o aumento da disponibilidade dos Modelos Digitais de Terreno, a utilização de classificadores binários no mapeamento de áreas susceptíveis a inundação tem crescido (NARDI et al., 2006, MANFREDA et al., 2011, 2014, 2015 SAMELA et al., 2016, SPECKHANN et al., 2017).

Para superar as irregularidades dos MDTs, todos foram pré-processados no software TerraHidro e SAGA, onde foram submetidos ao cálculo da direção do fluxo, métodos de preenchimento de falhas e remoção de inconsistências.

Foram testadas seis diferentes feições morfológicas: a) altura para a rede de Drenagem mais próxima, b) distância para a rede de drenagem mais próxima, c) declividade, d) índice topográfico, e) área de contribuição e f) curvatura.

Recentemente, comparando diferentes MDTs, Speckhann et al., (2017) demonstraram que a sensibilidade em classificadores binários no mapeamento de inundação é maior com a fonte (origem) do MDT do que necessariamente com o tamanho do pixel (Figura 11). Neste trabalho foram utilizados quatro resoluções diferentes (1m, 12,5m, 30m e 90m).

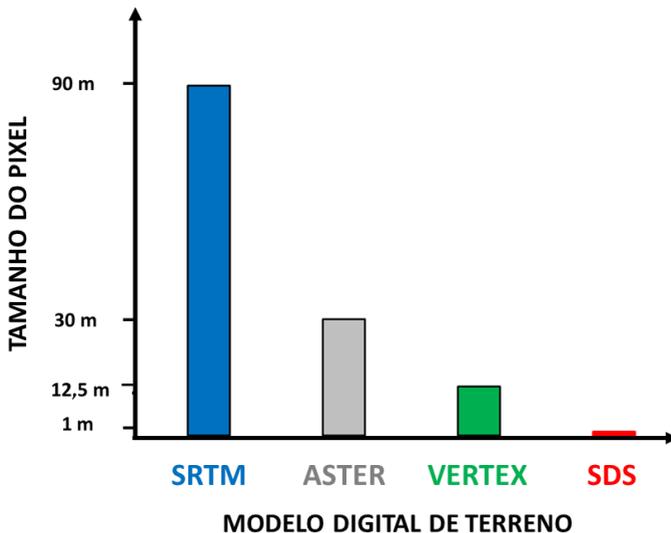


Figura 11- Comparação do tamanho do pixel entre diferentes resoluções de MDT, SRTM 90m, ASTER 30m, VERTEX 12,5 e SDS 1m.

3.4 CÁLCULO DAS CHEIAS DE PROJETO

As análises estatísticas foram realizadas utilizando os dados de máximas anuais (x) das estações disponíveis na bacia do Rio Itajaí. As distribuições que foram utilizadas são: *Generalized Extreme Value* (GEV), Log-Normal, Gumbel e Log-Pearson 3.

A função densidade de probabilidade GEV é definida por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - k \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{k-1}} \exp \left\{ - \left[1 - k \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{k}} \right\} \quad (4)$$

onde k é o parâmetro de forma, β posição e α parâmetro de escala, y é o valor da amostra.

A função densidade de probabilidade Log-Normal é expressa por:

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \text{ para } x > 0 \quad (5)$$

onde $\ln(x)$ é normalmente distribuída com a média μ e desvio padrão (σ).

A distribuição de Gumbel é representada por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x - \beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x - \beta}{\alpha}\right)^2\right] \quad (6)$$

O valor esperado, a variância e o coeficiente de assimetria de Y são:

$$E[X] = \beta + 0,5772\alpha \quad (7)$$

$$Var[X] = \sigma^2_Y = \frac{\pi\alpha^2}{6} \quad (8)$$

$$\gamma = 1,1396 \quad (9)$$

Com parâmetros média e desvio padrão, e com parâmetros α e β .

A função densidade de probabilidade de Log Pearson tipo 3 (LP3) é expressa por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha x \Gamma(\beta)} \left[\frac{\ln(x) - \gamma}{\alpha}\right]^{\beta-1} \exp\left[-\frac{\ln(x) - \gamma}{\alpha}\right] \quad (10)$$

onde α é o parâmetro de forma, β parâmetro de escala, γ parâmetro de posição e $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma, e o valor esperado é dado por:

$$E[X] = \frac{e^\gamma}{(1 - \alpha)^\beta} \quad (11)$$

3.5 DESCRITORES DE TERRENO APLICADOS NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS INUNDAÇÃO

Os de descritores de terreno área de contribuição, declividade, curvatura longitudinal, distância para a drenagem mais próxima, altura para a drenagem mais próxima (HAND) e índice topográfico foram empregadas (Figura 12).

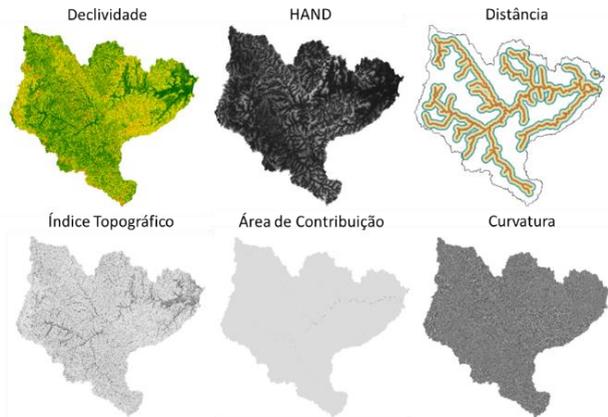


Figura 12- Índices utilizados nesse trabalho. declividade, distância para a drenagem mais próxima, altura para a drenagem mais próxima (HAND), índice topográfico, área de contribuição e curvatura.

Todos os descritores foram comparados com as manchas de inundação dos municípios de Blumenau, Brusque e Timbó, sendo testadas com MDTs de diferentes resoluções. Para os modelos ASTER, SRTM e VERTEX os descritores de terreno foram testadas para toda a bacia.

3.6 COMBINAÇÃO DE ANÁLISE DE FREQUÊNCIA COM O MODELO HAND

O uso de descritores de terreno na identificação de áreas propensas a inundação tem aumentado em especial para localidades com baixa disponibilidade de dados. No entanto, poucos são os estudos combinaram a probabilidade de ocorrência das vazões o emprego de descritores de terreno.

O perigo de inundação foi considerado utilizando a metodologia proposta por Speckhann et al., (2017a) – f2HAND (*flow frequency* –

Height Above Nearest Drainage). O objetivo da metodologia é combinar a análise de frequência de dados históricos de vazão com o modelo HAND.

No modelo f2HAND (SPECKHANN et al., 2017) as séries históricas e o modelo HAND (NOBRE et al., 2013 e RENNÓ et al., 2008) são combinados para criar um mapa de risco de inundação (Figura 13). O modelo proposto - f2HAND, consiste de quatro etapas.

1° - Análise de Frequência de dados históricos: coleta de dados, seleção dos máximos anuais e aplicação de distribuição de extremo.

2° - Execução do modelo HAND: após a remoção das possíveis inconsistências presentes no MDT, calcula-se a altura para a drenagem mais próxima.

3° - Relacionar a altura da régua de medição com o modelo HAND: estabelecer a equivalência entre o modelo HAND e o nível de água medido. A Figura 14 mostra o procedimento para conectar a altura da régua de medição com a altura normalizada calculada pelo modelo HAND.

4° - Escolher os valores de tempo de retorno e a distribuição de extremo para efetuar o corte da superfície calculada pelo HAND e gerar o mapa de perigo de inundação. O período de retorno de um mapa de inundação está associado com a leitura da régua (Figura 14). A classificação de áreas afetadas por baixos períodos de retorno pode ser uma maneira eficaz de identificar áreas potencialmente propensas a inundações.

A correspondência do modelo HAND e do nível de água é a chave do modelo f2HAND. O levantamento de um ponto GPS no campo a uma altura específica da régua utilizada na leitura diária do nível do rio é um procedimento importante para estabelecer a equivalência do *raster* gerado pelo HAND (Figura 14a, b, c) e o nível de água da régua (Figura 14d).

A diferença entre o valor do HAND e a altura da régua (por exemplo, 7 metros de nível de água) deve ser adicionada ao valor da distribuição de extremo (Figura 14e), de modo que a altura calculada na análise de frequência e a altura calculada pelo modelo HAND possam ser compatíveis (Figura 14f).

Desconsiderar o passo anterior pode acarretar na superestimação ou subestimação da mancha de inundação. Os quadrados amarelos na Figura 14f representam a extensão da inundação por um período de retorno de 10 anos hipotético, sem coincidir com a altura. Os pixels de contorno vermelho representam a extensão da inundação de um período de tempo de retorno de 10 anos quando altura calculada pelo HAND e o valor da distribuição coincidem.

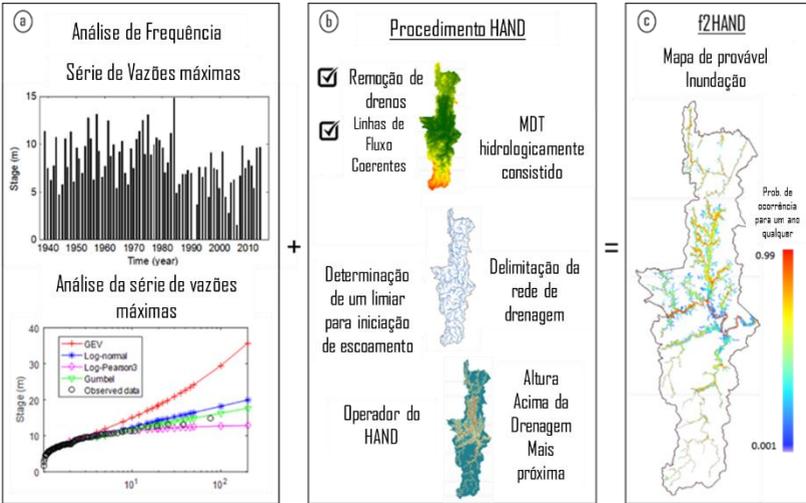


Figura 13- Principais passos para a metodologia f2HAND: a) análise de frequência, b) cálculo do raster do HAND em um MDT hidrológicamente consistido; c) Mapa de susceptibilidade a inundação, com a probabilidade de um determinado pixel em um ser inundado em qualquer ano. Adaptado: Speckhann et al., (2017).

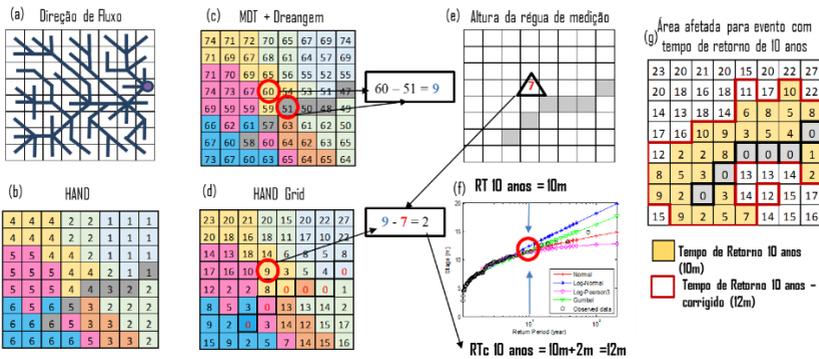


Figura 14- Procedimento f2HAND: a), b) e c) demonstra o procedimento ilustrado por Rennó et al., 2008 e Nobre et al., (2011); d) um ponto hipotético de GPS coletado na régua de medição na cota 7 metros. O operador do HAND calculou que o pixel tinha valor de 9 metros. e) para normalizar o nível de água com o grid do HAND, o valor extraído da distribuição de extremo deve ser adicionado de 2 metros; f) Comparação entre a classificação do HAND aplicando diretamente o valor do pixel e ajustando o valor usando informações de campo. Adaptado de Speckhann et al., (2017).

3.7 ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS DESCRITORES DE TERRENO NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROPENSAS À INUNDAÇÃO.

As curvas de características de operação de receptor (ROC) foram utilizadas para quantificar o desempenho dos descritores de terreno. Para os descritores HAND, DRD e área de contribuição foi variado o limiar para valores de iniciação de canal de 0,05 km² a 250 km². O procedimento adotado é muito semelhante ao aplicado por MANFREDA et al., (2015). Para a declividade, curvatura e índice topográfico cada descritor foi variado de acordo com a sua amplitude, realizando assim um fatiamento.

As ROC foram calculadas pelo gráfico da taxa Verdadeiros-Positivos r_p e da taxa dos Falso-Positivo r_n , foram plotados nos eixos y e x respectivamente.

$$r_p \approx \frac{\textit{Positivos corretamente classificados}}{\textit{Total de positivos}} \quad (12)$$

$$r_n \approx \frac{\textit{Negativos incorretamente classificados}}{\textit{Total de negativos}} \quad (13)$$

Os resultados dos descritores de terreno foram submetidos a uma avaliação condicional onde cada célula do *raster* foi atribuída o valor 1 (um) caso o pixel seja correspondente a área de inundação da mancha, e zero (0) se a área não for inundada (Figura 15).

Em uma operação de soma de *raster* foi combinada a mancha de inundação dos municípios (e.g. inundação de 2011, 13m) com o descritor de terreno associado a um limiar estabelecido - e.g. densidade da rede de drenagem (Figura 15). O procedimento retorna quatro resultados possíveis:

Verdadeiro positivo: Pixel corretamente designado como área não inundável tanto pela mancha de inundação quanto pelo resultado do modelo utilizando o classificador morfológico.

Falso Negativo: Descritor de terreno classifica o pixel como não inundável, resultado não compatível com o registrado na mancha de inundação.

Verdadeiro Negativo: Tanto o modelo quanto a mancha de inundação classificam o pixel como área não é inundada.

Falso Positivo: Mancha de inundação assinala como área não inundável, mas o modelo morfológico classifica como área inundável.

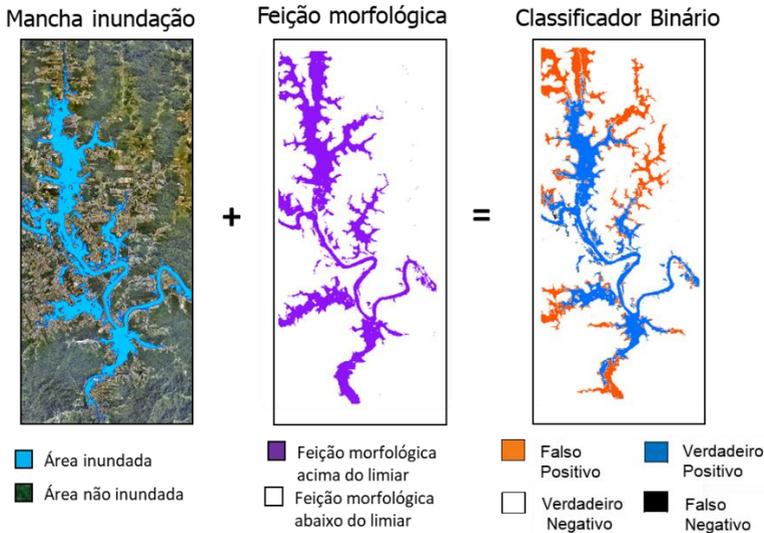


Figura 15- Combinação do *raster* da mancha e o *raster* descritor de terreno, podendo apresentar quatro possíveis resultados falso positivo, falso negativo, verdadeiro negativo e verdadeiro positivo.

3.8 RISCO À INUNDAÇÃO

O risco à inundação é a junção de três fatores: perigo, exposição e vulnerabilidade (IPCC 2012, ELSHORBAGY et al., 2017). No presente trabalho, o risco de inundação foi considerado uma junção entre o f2HAND (perigo) as luzes noturnas (exposição) e a distribuição populacional (vulnerabilidade) (Figura 16).

O primeiro passo para a elaboração do mapa de perigo de inundação é o cálculo da altura para a rede de drenagem mais próxima, a qual foi calculada com o modelo HAND (RENNÓ et al., 2008, NOBRE et al., 2011) utilizando diferentes modelos digitais de terreno (Figura 17), sendo posteriormente, combinada com dados históricos de cota para a elaboração do mapa de perigo de inundação.

O segundo elemento importante no mapa de perigo de inundação é a escolha distribuição de extremo que será utilizada para encontrar as cheias de projeto. Neste trabalho foi utilizado a distribuição de extremo

Gumbel a qual foi combinada com pontos medidos em campo para aplicação da metodologia f2HAND (SPECKHANN et al., 2017).

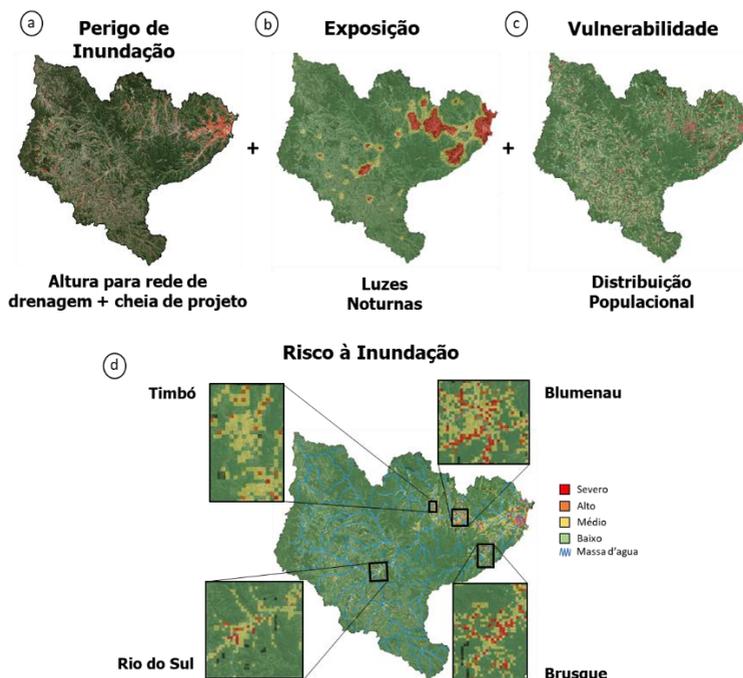


Figura 16- Metodologia aplicada para identificação do risco de inundação. a) Perigo à inundação, b) distribuição populacional, c) intensidade luminosa de luzes noturnas, e d) risco à inundação com destaque para os municípios de Blumenau, Brusque, Rio do Sul e Timbó.

Para elaboração do risco de inundação, as áreas estudadas foram classificadas como alto perigo de inundação quando apresentavam valores de cota com tempo de retorno de até 5 anos. O perigo médio foi atribuído a localidades com cota entre 5 a 25 anos de tempo de retorno, e valores acima de 25 anos o perigo foi considerado baixo (Tabela 2).

Tabela 2– Limiares utilizados para a elaboração do risco de inundação.

Tempo de Retorno (TR)	Número de Indivíduos (hab)	Luzes Noturnas	Classe	Categoria
TR > 25	Hab < 20	ND < 10	1	Baixo
5 < TR < 25	20 < hab < 60	10 > ND > 30	2	Médio
TR < 5	Hab > 60	ND > 30	3	Alto

Para o cálculo dos tempos de retorno foi utilizado os dados de máximas anuais das estações localizadas nos municípios de Blumenau (83800002), Brusque (83900000) e Timbó (83677000), utilizando os valores de distribuição de Gumbel para a vazão de projeto de 5 e 25 anos.

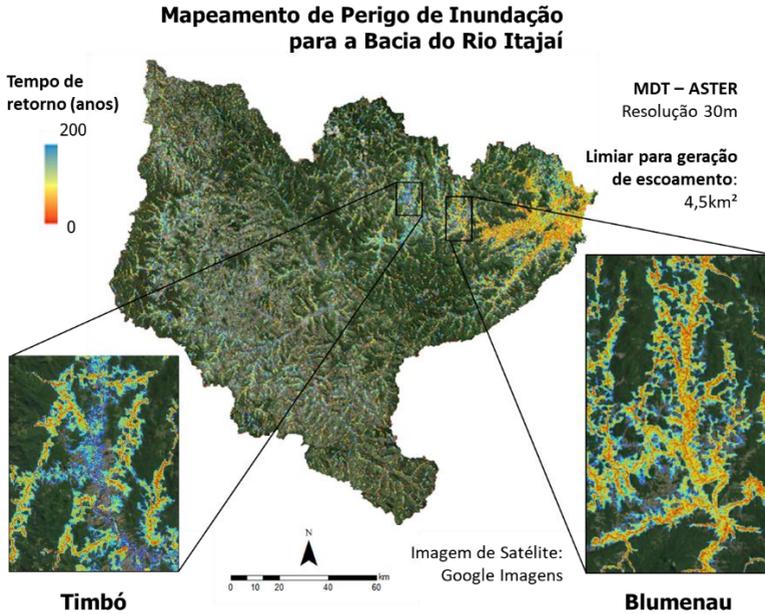


Figura 17– Representação do perigo de inundação na Bacia do rio Itajaí, utilizando modelo digital de terreno ASTER (resolução de 30 metros) com foco para os municípios de Blumenau e Timbó.

A exposição de uma determinada localidade está intrinsicamente relacionada com os valores econômicos passíveis de dano – e.g. número de habitantes e valores das moradias (IPCC 2012). As luzes noturnas, elaboradas pela NASA desde 1992, tem surgido como uma alternativa para a quantificação da exposição (ELSHORBAGY et al., 2017, CEOLA et al., 2016). A intensidade da luz noturna apresenta relação direta com a média temporal dos danos econômicos referentes as inundações por unidade de área (USD/km²). Este valor é um indicativo dos bens presentes em determinada localidade e conseqüentemente dos possíveis prejuízos. Áreas costeiras ou próximas a rio podem apresentar valores superestimados em virtude do reflexo da água.

A intensidade luminosa das luzes noturnas pode variar de 0 a 63, e a luminosidade pode ser considerada um proxy para atividades

socioeconômicas (ELSHORBAGY et al., 2017, CEOLA et al., 2015). Neste trabalho, as luzes noturnas foram utilizadas para a determinação da exposição onde foram classificadas como alto, médio e baixo de acordo com os valores da Tabela 2 (Figura 18).

A distribuição populacional na bacia do rio Itajaí foi adotada como critério para a vulnerabilidade. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em estudo em 2010, realizou o levantamento de informações populacionais em todo o território brasileiro (IBGE 2010). Diferentemente dos estudos anteriores, os dados coletados de 2010 apresentam não somente números absolutos de pessoas, mas também a distribuição espacial da população nos municípios, os quais podem ser acesso na plataforma mapasinterativos.ibge.gov.br.

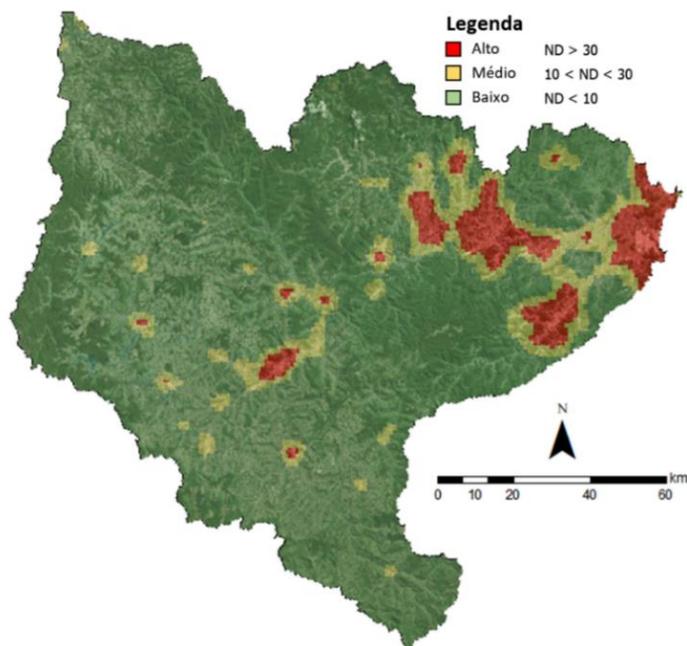


Figura 18- Luzes noturnas Bacia do Rio Itajaí. A intensidade luminosa demonstra maior ou menor presença na bacia.

Os dados populacionais foram categorizados de acordo com o zoneamento municipal. Áreas urbanas apresentam pixel de tamanho 200 metros, já as localidades consideradas rurais possuem pixel de 1 quilômetro. Para este trabalho foi considerado que localidades com número inferior a 20 habitantes por pixel (variando de acordo com zonal

rural ou urbana) foram classificadas como baixa presença de indivíduos. As localidades com valores entre 20 e 60 pessoas, foram classificadas como média ocupação, e os espaços com presença superior a 60 pessoas foram categorizados como alta presença populacional (Figura 19 e Tabela 2).

Em estudo recente, ELSHORBAGY et al., (2017) recomendaram que a utilização de informações de distribuição populacional seria um elemento muito importante para a quantificação do risco de inundação.

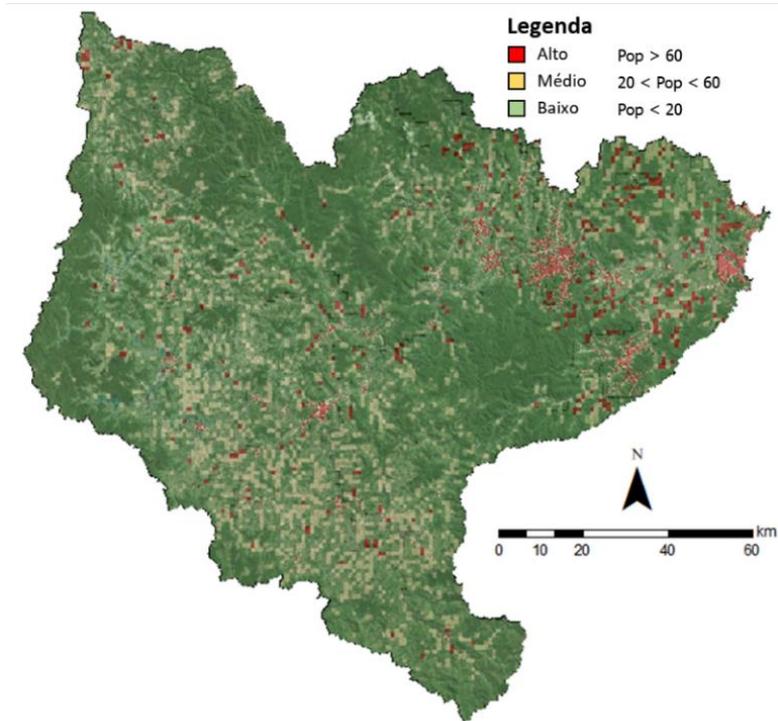


Figura 19- Distribuição populacional na Bacia do rio Itajaí.

Para o município de Blumenau pode-se observar a comparação entre a presença populacional no município e a intensidade luminosa (Figura 20) utilizando os valores da Tabela 2. A Figura 20b indica que a maior parte dos conglomerados populacionais estão inseridos dentro das zonas de maior reflectância das luzes noturnas.

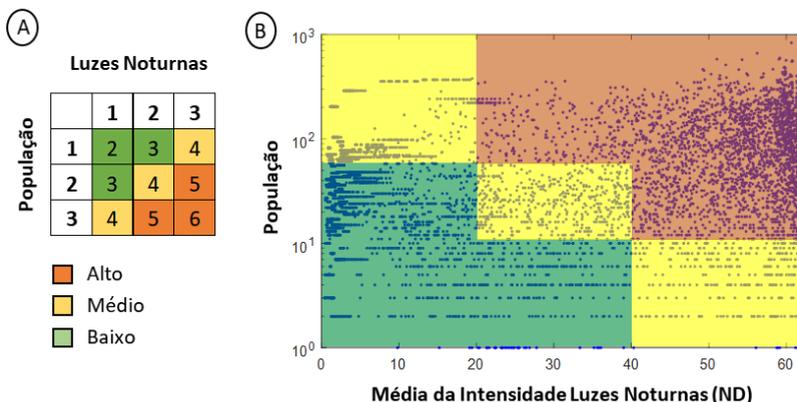


Figura 20- Classificação da suscetibilidade em categorias alta média e baixa. a) Matriz de classificação, b) *Scatterplot* entre intensidade luminosa e número de habitantes.

A classificação de risco à inundação foi elaborada atribuindo diferentes pesos – severo, alto, médio e baixo (Figura 21ab) utilizando a classificação apresentada na Tabela 2. A ideia central da metodologia de risco (Figura 21) está em combinar a altura da rede de drenagem, a identificação das áreas com maior concentração de bens, a distribuição populacional ao longo da bacia e somar o comportamento da vazão de projeto para a indicação do risco de inundação na bacia do rio Itajaí (Figura 21).

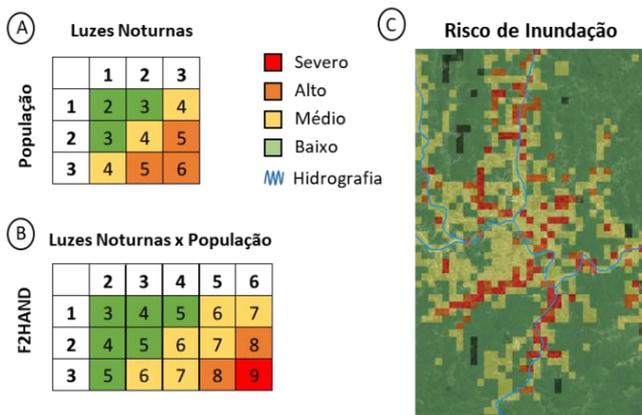


Figura 21- Classificação de risco à inundação. A) Matriz de classificação entre Luzes Noturnas e Distribuição Populacional, B) Matriz de classificação entre Luzes Noturnas, Distribuição Populacional e f2HAND. C) Risco de Inundação

Neste trabalho, a combinação do risco de inundação levando em consideração a distribuição populacional no território, a intensidade luminosa das luzes noturnas e o f2HAND foi aplicado para elaboração de um mapa de risco de inundação para a Bacia do Rio Itajaí Açu.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A utilização dos descritores de terreno na identificação de áreas suscetíveis a inundação foi testada em três municípios da Bacia do Rio Itajaí: Blumenau, Brusque e Timbó.

A altura para a rede de drenagem mais próxima (HAND) foi combinada com a distribuições de extremo da série de vazões máximas anuais dos municípios juntamente com informações de distribuição populacional e de luzes noturnas. O objetivo foi propor uma opção de baixo custo para análise de risco de inundação na bacia do Rio Itajaí.

4.1 CHEIA DE PROJETO

Blumenau Brusque e Timbó possuem valores de cota elevados durante os mesmos anos, sendo as inundações de 1983, 2008 e 2011 os eventos de maior destruição (Figura 22).

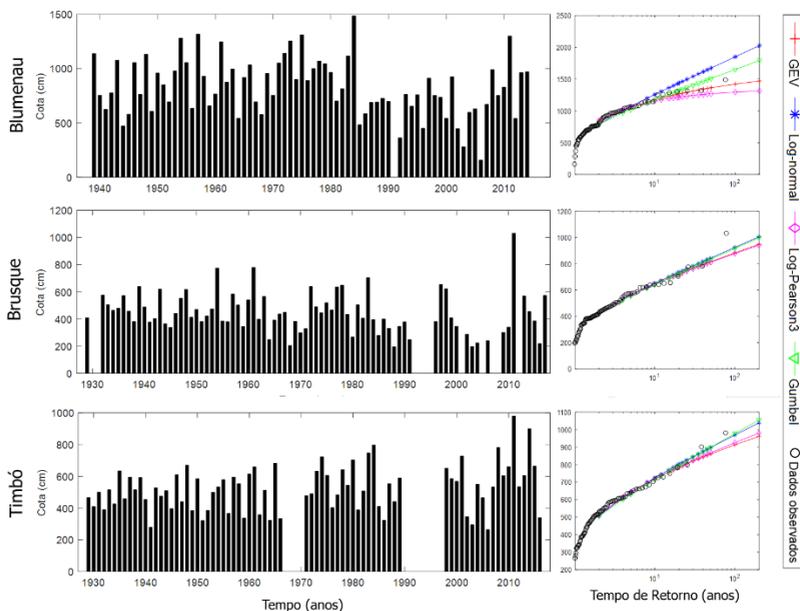


Figura 22– Máximas anuais e quatro distribuições de extremo (GEV, Log-Normal, Log-Pearson 3 e Gumbel) para os municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.

As séries de dados de Brusque e Timbó apresentam alguns períodos de falhas. Ao comparar com a estação de Blumenau, os registros de máximas anuais de Timbó e Brusque são mais antigos - com início em 1929, mas a estação de Blumenau é que possui no total o maior número de dados contínuos, apresentando falha somente durante ano 1992.

As ausências de dados durante o começo da década de noventa ocorreram em praticamente todas as estações da bacia. Em geral, os períodos de falhas estão relacionados com a construção das barragens de contenção de cheias na bacia do rio Itajaí, sendo o ano de 1992 o ano de conclusão das barragens Oeste e Norte.

As distribuições de extremos Log-Normal, GEV, Gumbel Log-Pearson tipo 3 foram calculadas utilizando os valores de máximas anuais dos municípios (Figura 22).

Assim como os dados fluviométricos, os valores das distribuições de extremos também foram submetidos a testes de consistência. O comportamento das quatro distribuições de extremos em geral foi muito semelhante para os dados de Blumenau Brusque e Timbó (Figura 22).

Nos municípios de Blumenau, e Timbó, as cotas para tempos de retorno acima de 10 anos, utilizando a distribuição GEV foram muito superiores às demais distribuições (Gumbel, Log-Normal e Log-Pearson tipo 3).

A avaliação do desempenho das distribuições foi feita utilizando *Jackknife*, onde todas as distribuições apresentaram valores de correlação superiores a 0,9. A distribuição de Gumbel foi a distribuição escolhida para as vazões de projeto de 5 e 25 anos de tempo de retorno para a elaboração do mapa de perigo de inundação. Para a escolha foi considerado a grande aplicabilidade no estudo de vazões máximas.

4.2 ANÁLISE DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO DIFERENTES DESCRITORES DE TERRENO

Os municípios avaliados foram Blumenau, Brusque e Timbó. A comparação foi feita utilizando manchas de inundação de eventos passados ocorridos em setembro de 2011.

Devido à capacidade de processamento, somente os MDTs SRTM 1arcsec, SRTM 3arcsec, VERTEX e ASTER foram calculados para a área total da bacia. Os MDT de alta resolução disponibilizado pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina (SDS-SC) foram empregados somente em nível de município, sendo aplicado técnica de reinterpolação, utilizando o algoritmo bilinear da função *resample* no ArcGIS para 5m, 10m, 20m e 30m.

A distância para a rede de drenagem mais próxima foi um dos descritores de terreno com melhor desempenho dentre as testadas (Tabela 3). Ao variar o limiar de geração de escoamento notou-se que para todos os municípios e MDTs testados, ocorreu a tendência de um valor ótimo.

De modo geral, os limiares de geração de escoamento ficaram próximos a 4,5km². A indicação da existência de um valor ótimo na densidade da rede de drenagem também ocorreu no uso do classificador morfológico HAND.

Outro ponto observado foi a presença de uma mudança no padrão quando utilizado um limiar de geração de escoamento elevado (superior a 100 km²). Na Figura 23 é possível observar que em Blumenau, mesmo utilizando o MDT SRTM 1-arcsec ou ASTER para a rede de drenagem com densidade superior a 100km² ocorre um degrau na performance da curva ROC. Um dos possíveis motivos é a incapacidade de uma rede de drenagem de baixa densidade alcançar a parte da mancha de inundação localizadas em locais mais à montante dos municípios. Destaca-se que a distância para a rede de drenagem não apresentou diferença ao utilizar diferentes fontes de MDT (Tabela 3).

Tabela 3- Porcentagem de acerto dos descritores de terreno distância para a rede de drenagem (DRD), declividade e HAND na representação da inundação utilizando um limiar de 4,5 km² para a bacia do Itajaí.

Município	Descritor de terreno	Porcentagem de acerto da mancha (%)			
		VERTEX	ASTER	SRTM-1	SRTM-3
Blumenau	DRD	87	87	87	87
	Declividade	77	66	85	70
	HAND	87	89	75	85
Brusque	DRD	90	90	90	90
	Declividade	86	87	88	87
	HAND	91	91	91	90
Timbó	DRD	83	83	83	83
	Declividade	63	53	61	70
	HAND	80	80	83	77

Assim como a distância para a rede drenagem, o modelo HAND também apresentou desempenho muito satisfatório na representação das manchas de inundação de eventos passados (Tabela 3). Tanto para os

municípios de Blumenau quanto para Brusque e Timbó o HAND, na comparação com os demais descritores de terreno, foi a que apresentou a maior capacidade de representar os eventos de inundação passados.

Mesmo o HAND sendo o descritor de terreno de maior destaque dentre as testadas, a utilização de diferentes MDTs apresentou a mesma característica observada por Speckhann et al., (2017), onde o fator decisivo para o desempenho na representação da mancha de inundação não estava correlacionado ao tamanho do pixel do MDT, mas sim em relação a procedência do MDT.

Por exemplo, no MDT fornecido pela SDS, a interferência do tamanho do pixel foi pequena. Os resultados encontrados para MDTs com tamanho de pixel de 5m e 20m foram muito semelhantes.

A declividade compõe juntamente com a distância para a rede de drenagem (DRD) e a altura para a rede de drenagem (HAND) os classificadores binários com melhor desempenho na descrição de eventos de inundação passados. Em todos os tipos de MDT e para todos os municípios analisados a declividade, o HAND e DRD estiveram no conjunto de descritores capazes de representar a mancha de inundação.

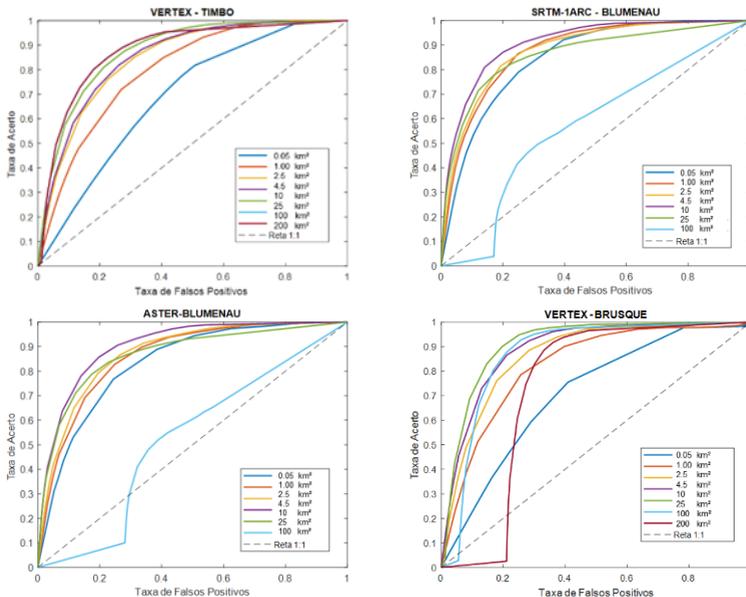


Figura 23- Receiver operating characteristic para diferentes limiares de geração de escoamento (0.05; 1; 2,5; 4; 10; 25; 50; 100; 200km²) utilizando diferentes MDTs para os municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.

Os índices curvatura, área de contribuição e índice topográfico foram os que apresentaram maior dificuldade de descrever as manchas de inundação para os municípios testados (Figura 24). Em nenhum dos casos testados os resultados apresentados foram satisfatórios. A performance dos índices está de acordo com os estudos encontrados em outras regiões (MANFREDA et al., 2015, SAMELA et al., 2016).

Chamou a atenção a performance do índice topográfico, principalmente pelo formato das curvas ROC – abaixo da reta 1:1 e próximo do limite inferior e direito (Figura 24). O resultado aponta que uma modificação no descritor de terreno pode ser capaz de uma melhor representação das áreas de inundação (MANFREDA et al., 2015).

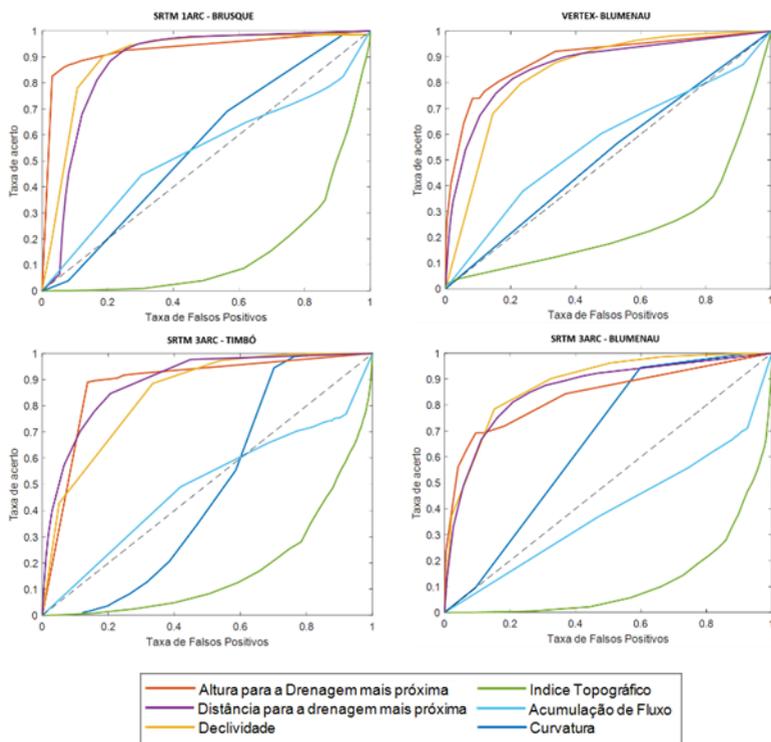


Figura 24- Receiver operating characteristic para seis descritores de terreno utilizando diferentes MDTs em comparação com a mancha de inundação dos municípios de Blumenau, Brusque e Timbó.

4.3 MAPEAMENTO DE PERIGO DE INUNDAÇÃO

O perigo de inundação, foi aplicado utilizando a metodologia f2HAND (SPECKHANN et al., 2017), onde a altura para a rede de drenagem mais próxima foi combinada com informações de tempo de retorno das vazões das estações fluviométricas. A Figura 25 apresenta um a classificação da bacia do rio Itajaí utilizando o MDT ASTER classificado como alto, médio e baixo utilizando os tempos de retorno da distribuição Gumbel para a estação de fluviométrica do município de Timbó.

Em 2011, um evento extremo na bacia do Rio Itajaí atingiu a cota 13m da régua do município de Blumenau – podendo ser considerado um evento de período de retorno de 20 anos. Blumenau possui uma área urbana (206,8 km²), correspondente a 38% da área total do município.

Para períodos de retorno baixo (inferior a 5 anos), a percentagem de áreas afetadas é de aproximadamente 18%. O desempenho do modelo f2HAND, em comparação com a mancha de inundação foi 92% de precisão usando um MDT de resolução de 5m.

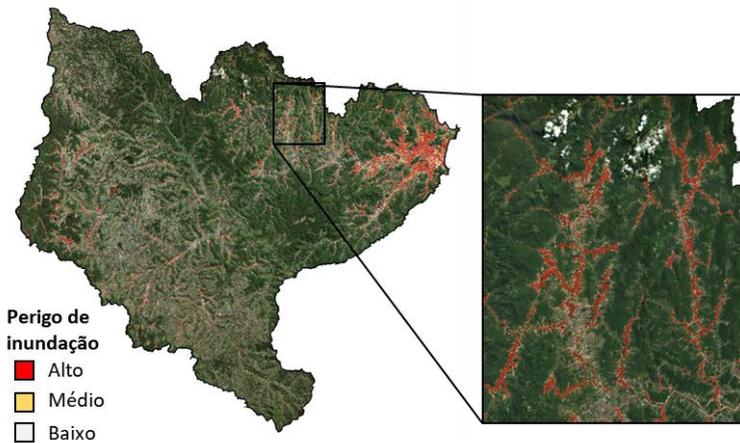


Figura 25- Perigo de inundação para a bacia do Rio Itajaí com zoom para a região de Timbó. O perigo de inundação foi classificado utilizando os valores de tempo de retorno da distribuição de Gumbel para a estação de Timbó.

4.4 MAPA DE RISCO

Este é o primeiro mapeamento de risco de inundação realizado em nível de bacia para o Estado de Santa Catarina. O mapeamento de

risco foi elaborado em nível de bacia – utilizando os 4 MDTs disponíveis, e comparado com os três principais municípios estudados (Blumenau, Brusque e Timbó). O modelo digital de terreno elaborado pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina, foi realizado somente para os municípios de Blumenau, Brusque e Timbó devido a elevada resolução.

Para o emprego do f2HAND, foi necessário alinhar os valores de cota com os valores obtidos com o algoritmo do HAND. Devido a utilização de diferentes MDTs era esperado que os valores do HAND apresentassem diferenças na realização do procedimento de compatibilização da cota com o resultado do modelo. Os maiores valores foram encontrados para o MDT SRTM 1-arcsec. Para o tempo de retorno de 5 e 25 anos, foi encontrado valores 25,8m e 29,2m respectivamente (Figura 26).

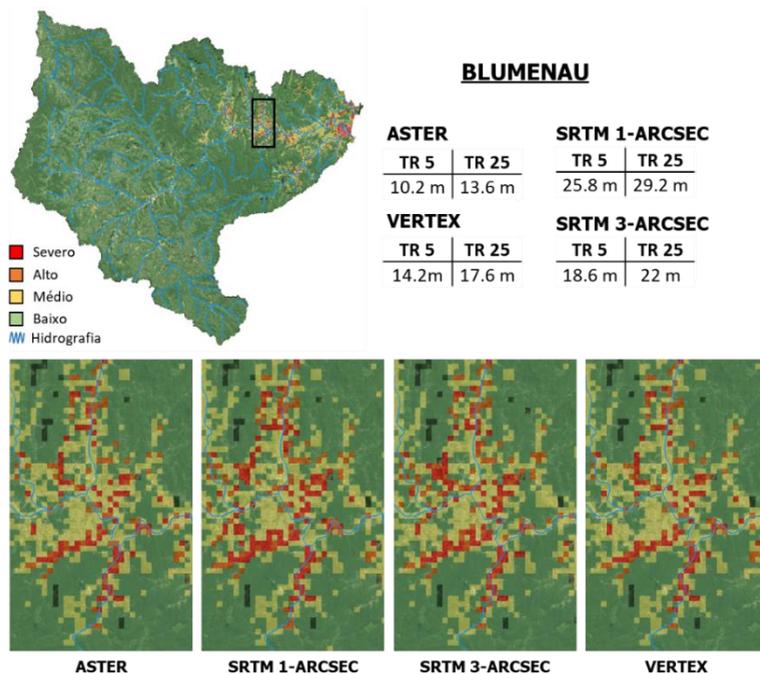


Figura 26- Risco de inundação para o município de Blumenau, utilizando 4 resoluções de MDT. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.

Devido ao extenso histórico de dificuldades com as inundações, principalmente no centro do município, era esperado que o setor central apresentasse diversos pontos de risco alto (cor laranja) e severo (cor vermelha).

Os MDTs SRTM 1arcsec e 3 arcsec foram os que apresentaram a maior quantidade de zonas classificadas como alta e severo. Esse fato ocorre majoritariamente em virtude dos MDTs pertencerem à mesma fonte.

O município de Brusque possui uma área de contribuição superior à dos municípios de Blumenau e Timbó. Diferentemente das outras localidades, Brusque apresentou praticamente os mesmos valores de cota para os tempos de retorno de 5 e 25 anos (Figura 27).

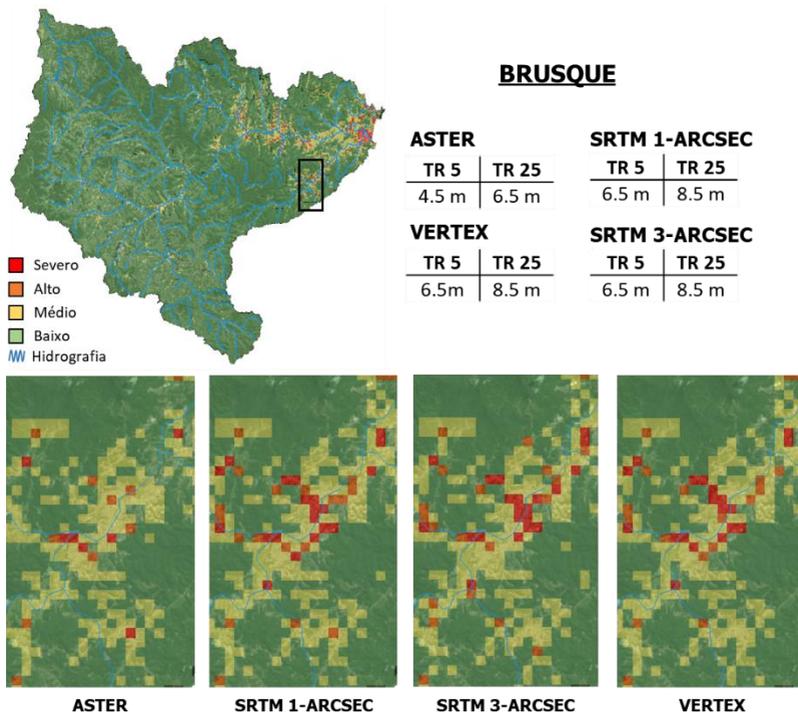


Figura 27- Risco de inundação para o município de Brusque, MDT utilizando 4 resoluções de MDT. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.

O único valor diferente foi observado para o MDT ASTER. O ajuste dos valores de cota com o resultado do HAND não apresentou uma variação tão elevada quanto para o município de Blumenau.

No município de Brusque, as áreas de risco alto e severo foram menores, comparativamente, do que as de Blumenau. Somente uma pequena parcela da parte central do município foi considerada como risco severo ou alto. No entanto, os valores de risco médio dominam praticamente toda a extensão do rio Itajaí-Mirim.

O município de Timbó é o que possui menor área total (128km²), mas apresenta, proporcionalmente, a maior área urbana. A cidade possui um registro de 12 mil moradias. A Figura 28 apresenta os resultados do risco à inundação para o município de Timbó.

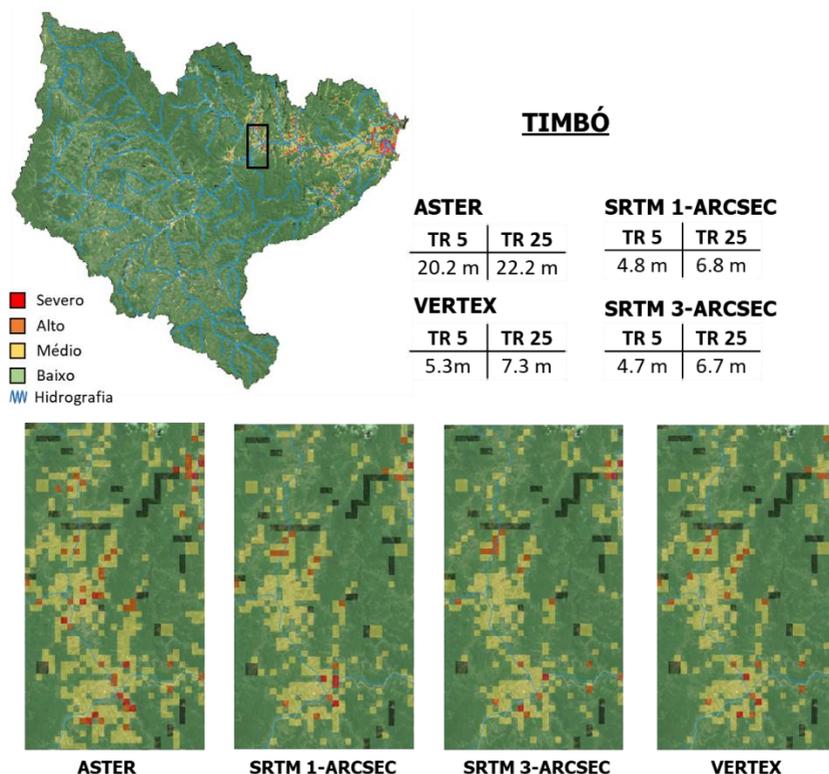


Figura 28- Risco de inundação para o município de Timbó, utilizando 4 resoluções de MDT. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.

É possível verificar que a concentração de áreas de risco severo e alto são reduzidas. Em virtude da grande quantidade de moradores rurais no município, o recorte feito (Figura 28) apresenta algumas “falhas” (pixel verde escuro), as quais ocorrem devido a transição entre pixels de 200m (área urbana) e pixel de 1 km (áreas rurais). A ocorrência desse fenômeno deve se intensificar principalmente em localidades majoritariamente rurais e com baixo adensamento populacional.

Assim como nos municípios de Blumenau e Brusque, O município de Timbó também apresentou resultado diferente na utilização do MDT ASTER. O que se pode perceber é que a procedência do MDT é o quesito de maior relevância. O fato corrobora com os resultados encontrados por SPECKHANN et al., (2017).

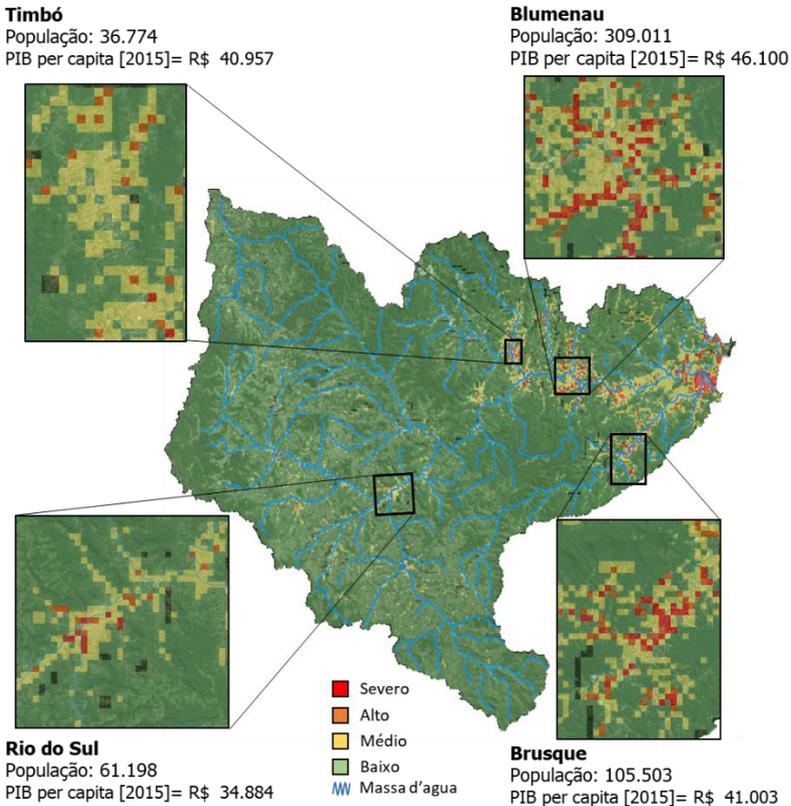


Figura 29- Risco à inundação para a Bacia do Rio Itajaí. Destaques para os municípios de Blumenau, Brusque Timbó e Rio do Sul.

A Figura 29 apresenta o risco de inundação utilizando o modelo digital de terreno ASTER como base e os valores de tempo de retorno de 5 e 25 anos utilizando a distribuição de Gumbel.

Os resultados da Figura 29 apontam que os lugares com maior Produto Interno Bruto (PIB) e maior população na bacia do rio Itajaí são os locais com maior porcentagem de localidades classificadas como risco alto e severo. Nota-se, que os locais de maior concentração de luzes noturnas, conseqüentemente os ambientes com maior concentração de bens, concentram-se principalmente nos maiores conglomerados populacionais da Bacia do Rio Itajaí. Esse tipo de cenário é condizente com os estudos realizados no Canadá e no Egito (ELSHORBAGY et al., 2017 e CEOLA et al., 2015).

O risco à inundação utilizando a base de dados da SDS foi elaborada para os municípios de Blumenau, Brusque e Timbó. Assim como observado para os outros MDTs, a região central de Blumenau foi a que apresentou maior concentração de áreas altas e severas (Figura 30).

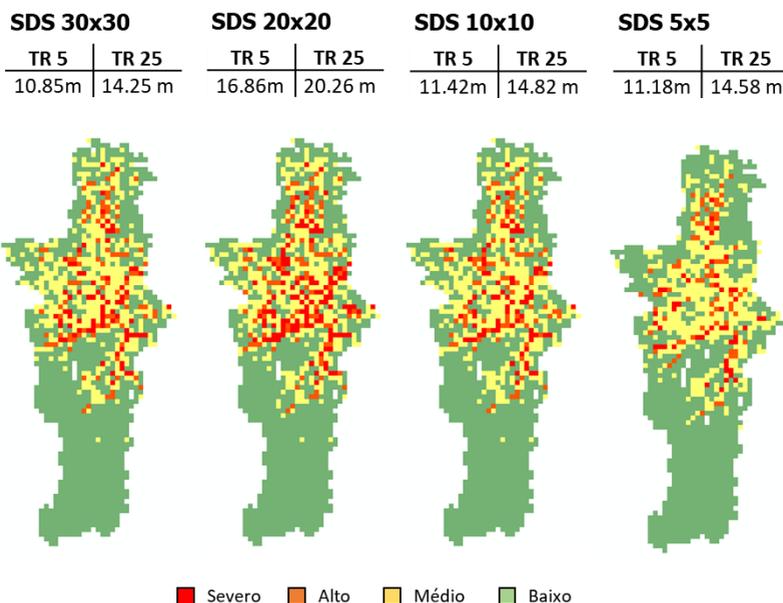


Figura 30- Risco de inundação para o município de Blumenau, utilizando MDT SDS. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.

Destaca-se ainda que a compatibilização da cota, paço fundamental na elaboração do perigo de inundação, e consequentemente ao risco, apresentou valores muito similares. A diferença maior pode ser observada no MDT reinterpolado de 20x20 o qual para o município de Blumenau foi o que apresentou a maior porcentagem de áreas classificadas como risco alto e severo (14%). Já as demais resoluções apresentaram valores de próximos de 10%.

O risco à inundação utilizando o MDT SDS para Timbó (Figura 31) apresentou áreas em sua maioria áreas de risco baixo (aproximadamente 80%). As áreas de risco alto e severo foram inferiores a 2% para todas as resoluções testadas.

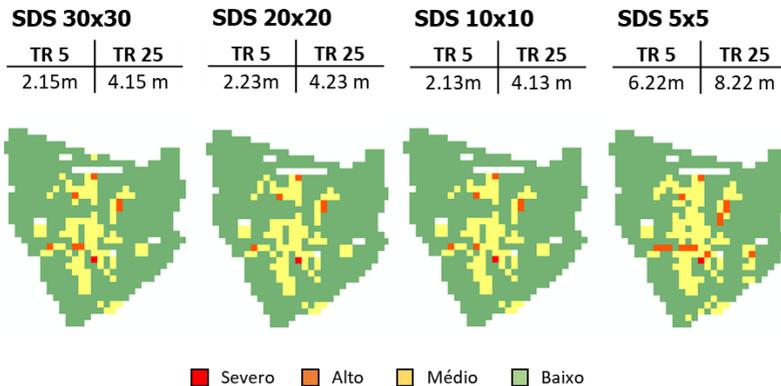


Figura 31- Risco de inundação para o município de Timbó, utilizando MDT SDS. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.

As áreas de risco à inundação no município de Brusque (Figura 32) assim como em Timbó foram predominantemente baixas, com mais de 75% de localidades classificadas como baixas, aproximadamente 19% média e 6% como risco alto e severo.

Assim como em Blumenau, a resolução de 20x20 também apresentou valor distinto de compatibilização de cota em comparação aos valores das outras resoluções. Nota-se também a presença de pixel na cor branca. É possível que a ocorrência de pixel branco esteja condicionada a alguma dificuldade na união dos diferentes rasters, principalmente do raster de população em função da diferenciação que ocorre entre áreas urbanas (pixel de 200x200m) e rurais (pixel de 1x1quilômetro).

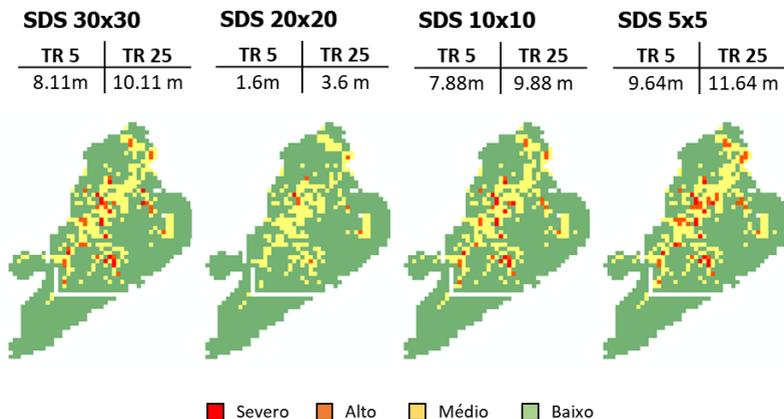


Figura 32- Risco de inundação para o município de Brusque, utilizando MDT SDS. O resultado foi classificado em 4 categorias diferentes: severo, alto, médio e baixo risco. Os valores apresentados para 5 e 25 anos de tempo de retorno são referentes a compatibilização da cota com o resultado o modelo HAND.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Observou-se que os descritores de terreno mais eficientes na identificação de áreas suscetíveis a inundação foram: o HAND, a distância para a rede de drenagem mais próxima e a declividade. Em alguns casos, o HAND foi capaz de representar a mancha de inundação com 91% de acerto. A distância para a rede de drenagem, assim como o HAND apresentaram indicativo da existência de um valor ótimo de densidade de drenagem, o qual pode estar envolvido no controle do processo de inundação. Os valores ótimos de densidade de drenagem encontrados ficaram próximos a 4,5km². Os descritores de terreno curvatura, área de contribuição e índice topográfico não apresentaram resultados satisfatórios na representação das manchas de inundação.

Neste trabalho, propôs-se uma metodologia para avaliar o risco à inundação combinando descritores de terreno, dados históricos de vazão, distribuição populacional e luzes noturnas. Essa metodologia foi aplicada para toda a bacia do Rio Itajaí (15.000 km²) onde foi comparada com as manchas de inundação dos municípios de Blumenau, Brusque e Timbó ocorridas em setembro de 2011. Essa metodologia é uma alternativa relativamente simples e de baixo custo para a identificação de áreas de risco em escala regional e municipal, podendo auxiliar na mitigação dos efeitos das inundações e no ordenamento do crescimento municipal.

Ao utilizar diferentes Modelos Digitais de Terreno (e.g. ASTER, SRTM, SDS e VERTEX), os descritores de terreno apresentaram resultados distintos na identificação de áreas de inundação. O HAND continuou dominante, sendo o descritor de melhor capacidade de representação das inundações, seguido da distância para a drenagem mais próxima e a declividade.

Em todos os municípios, foi possível observar que um maior refinamento do *grid* do MDT não implicaria necessariamente em maior acurácia na representação da inundação. Modelos com tamanho de pixel de 12,5 metros e 30 metros não obtiveram diferenças significativas. Observou-se que a origem do MDT (e.g. SDS, SRTM, ASTER, VERTEX) apresentou maior influência na capacidade de representar eventos de inundação do que o tamanho do pixel.

A metodologia de risco de inundação foi aplicada para vazões de projeto de 5 e 25 anos de tempo de retorno. Destaca-se a diferença na percentual de áreas classificadas como risco alto e severo para os municípios de Brusque (6%) e Timbó (3%). Por se tratarem de regiões com menor quantidade de conglomerados populacionais, tanto os valores de distribuição populacional quanto os valores de luzes noturnas

acabaram sendo inferiores aos encontrados em centros urbanos maiores. A ocorrência desse resultado, sinaliza que na metodologia elaborada existe uma tendência de que em cidades de menor porte os aspectos vulnerabilidade e exposição sejam menos expressivos, ainda que o perigo (associado ao comportamento da vazão do rio) possa ser elevado. Para o município de Blumenau as áreas de risco severo e alto chegaram a 14%.

Os limiares adotados para classificar em alto, médio e baixo (e.g. tempo de retorno de 5 e 25 anos, número de habitantes, e a intensidade luminosa) podem sofrer influência tanto de medidas naturais quanto antropogênicas. Tais alterações podem modificar de modo substancial a classificação das áreas de risco. A elaboração de cenários de risco levando em consideração possíveis projeções de crescimento podem ser executadas com facilidade.

A metodologia de risco de inundação proposta destaca-se também pela gratuidade dos dados utilizados e pela facilidade operacional do modelo – uma vez que a operação é composta basicamente por uma soma de *raster*, fato que reduz tanto o grau de demanda computacional, quanto o de exigência técnica necessária para a aplicabilidade do modelo.

A simplicidade da metodologia de risco adotada permite que outras informações possam ser agregadas (e.g. declividade, geologia do terreno). A metodologia proposta poderia ser testada para levantamento de risco de inundações em diversos municípios do estado de Santa Catarina.

Recomenda-se combinar o descritor de terreno HAND com os modelos hidráulicos e hidrodinâmicos para migrar de um enfoque estático, i.e., nível de água associado a um determinado tempo de retorno, para um entendimento maior do comportamento das vazões durante os eventos de inundação. Com esse acréscimo busca-se compreender melhor a dinâmica dos processos de inundações e aumentar a quantidade de informações (e.g. velocidade de escoamento) especialmente nos quesitos relacionados a custos e danos estruturais.

REFERÊNCIAS

- ARRIGHI, C., BRUGIONI, M., CASTELLI, F., FRANCESCHINI, S., MAZZANTI, B., 2013. Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modelling and census data. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. 13, p.1375-1391. DOI: 10.5194/nhess-13-1375-2013
- BATES, P. D., HORRIT, M.S., FEWTRELL, T.J. 2010 A simple inertial formulation of shallow water equations for efficient two dimensional flood inundation modelling. **Journal of Hydrology**, 387, p.33-45.
- BATES, P.D., e DE ROO A.P.J., 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. **Journal of Hydrology**, 236, 54-77.
- BEVEN, K., LAMB, R., LEEDAL, D. AND HUNTER, N. (2014) Communicating uncertainty in flood inundation mapping: a case study. **Int. J. River Basin Manag.** (October 2013), p. 1–11. doi:10.1080/15715124.2014.917318
- BEVEN e KIRKBY 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, 24, p. 43–69.
- BLÖSCHL, G., GAÁL, L., HALL, J., KISS, A., KOMMA, J., NESTER, T., PARAJKA, J., PERDIGÃO, R. A. P., PLAVCOVÁ, L., ROGGER, M., SALINAS, J. L., e VIGLIONE, A., 2015. Increasing river floods: fiction or reality? **WIREs Water**, 2, p.329-344.
- BLÖSCHL, G., HALL, J PARAJKA,J., PERDIGÃO, R. A. P., MERZ, B., ARHEIMER, B., ARONICA,G.T., BILIBASHI, A., BONACCI,O., BORGA, M., CANJEVAC, I., CASTELLARIN, A., CHIRICO, G.B., CLAPS,P., FIALA, K., FROLOVA,N., GORBACHOVA, L., GÜL, A., HANNAFORD,J., HARRIGAN, S., KIREEVA, M., KISS, A., KJELDSSEN,T.R., KOHNOVÁ, S., KOSKELA,J.J., LEDVINKA, O., MACDONALD, N., MAVROVA-GUIRGUINOVA, M, MEDIERO, L., MERZ, R., MOLNAR, P., MONTANARI, A., MURPHY,C., OSUCH, M., OVCHARUK, V., RADEVSKI, I., ROGGER,M., SALINAS, J.L., SAUQUET,E., SRAJ,M., SZOLGAY, J., VIGLIONE,A., VOLPI, E.,

WILSON, D., ZAIMI, K. E ZIVKOVIC N.. 2017. Changing climate shifts timing of European floods. **Science** 357, (6351), p.588-590

CEOLA, S., LAIO, F., e MONTANARI, A. 2014: Satellite nighttime lights revealing increased human exposure to floods worldwide, **Geophys. Res. Lett.**, 41, p. 7184–7190.

CUARTAS L.A.; TOMASELLA J.; NOBRE A. D.; NOBRE C. A.; HODNETT M. G.; WATERLOO M. J.; OLIVEIRA, S. M.; von RANDOW R. C.; TRANCOSO R.; FERREIRA M.; 2012. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. **Journal of Hydrology** 462-463. p 15-27.

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI). 2007. MIKE FLOOD 1D-2D Modelling, User manual, Hørsholm, Denmark.

DEGIORGIS, M., GNECCO, G., GORNI, S., ROTH, G., SANGUINETI, M. e TARAMASSO, A.C., 2012. Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data. **Journal of Hydrology**, 470-471. p. 302-315.

DI BALDASSARRE, G., SCHUMANN, G., BATES, P.B., FREER, J.E., e BEVEN, K. J., 2010. Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches, **Hydrological Sciences Journal**, 55 3, p.364-376. DOI: 10.1080/02626661003683389

DI BALDASSARRE, G., VIGLIONE, A., CARR, G., KUIL, L., SALINAS, J.L., BLÖSCHL, G. 2013. Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions. **Hydrology and Earth System Sciences**, 17, p.3295-3303. doi:10.5194/hess-17-3295-2013

ELSHORBAGY, A., BHARATH, R., LAKHANPAL, A., CEOLA, S., MONTANARI, A., LINDENSCHMIDT, K. 2017. Topography- and nightlight-based national flood risk assessment in Canada. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 21, p. 2219–2232.

EU (European Union), 2007. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and

management of flood risk. Official Journal of the European Union, L288, p.27–34.

FRANK, B; PINHEIRO, A. 2003. Enchentes na Bacia do Rio Itajaí: 20 anos de experiências. Blumenau: Edifurb.

GAIN, A.K., HOQUE, M., 2013. Flood risk assessment and its application in the eastern part of Dhaka City, Bangladesh. **JFRM**, 6, p.219-228.

HALL, J. ARHEIMER, B., BORGA, M., BRÁZDIL, R., CLAPS, P., KISS, A., KJELDEN, T.R., KRIAUCIUNIENÉ, J., KUNDZEWIC, Z.W., LANG, P., LLASAT, M.C., MACDONALD, N., MCINTYRE, N., MADIEIRO, L., MERZ, B., MERZ, R., MOLNAR, P., MONTANARI, A., NEUHOLD, C., PARAJKA, J., PERDIGÃO, R.A.P., PLAVCOVÁ, L., ROGGER, M., SALINAS, J.L., SAUQUET, E., SCHÄR, C., SZOLGAY, J., VIGLIONE, A., AND BLÖSCHL, G. 2014. Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. **Hydrological Earth System Science**. 18. p. 2735-2772.

HALL, J.H., BERKOUT, F., e DOUGLAS, R. 2015. Comentary: Responding to adaptation emergencies. **Nature Climate Change**. 5, p.6-7.

HERRMANN, MARIA L. DE P. Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina: Período de 1980-2010. 2.ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2014. 214 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Censo IBGE Cidades – Blumenau. Brasília.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In: C.B. Field, et al. eds. Special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA). 2011. Estudo preparatório para o projeto de prevenção e mitigação de desastres na bacia do rio Itajaí. Relatório Final.

JALAYER, F., RISI, R., PAOLA, F., GIUGNI, M., MANFREDI, G., GASPARINI, P., TOPA, M.E., YONAS, N., YESHITELA, K., NEBEBE, A., CAVAN, G., LINDLEY, S., PRINTZ, A., e RENNER, F. 2014. Probabilistic GIS-based method for delineation of urban flooding risk hotspots. **Natural Hazards**, 73 (2), p.975-1001.

JONGMAN, B.; HOCHRAINER-STIGLER, S.; FEYEN, L.; AERTS, J. C. J. H.; MECHLER, R.; BOTZEN, W. W. J.; BOUWER, L. M.; PFLUG, G.; ROJAS, R. e WARD, P. J. 2014. Letters Increasing stress on disaster-risk finance due to large floods. **Nature Climate Change**. 4, p.264-268

KOBIYAMA M., MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO E. V.; GONÇALVES, E.F. BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. In: *Prevenção de Desastres Naturais. Desastres Naturais e medidas preventivas – Curitiba, 2006. p. 45- 88.*

KOBIYAMA, M., GOERL, R. F., CORREA, G. P., e MICHEL, G. P. 2010. Debris flow occurrence in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorologic e geomorphic aspects In: *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows III*. Southampton. WitPress, p.77-88.

KOBAYASHI, K., TAKARA, K., SANO, H., TSUMORI, H. e SEKII, K. 2014. A high-resolution large scale flood hazard and economic risk model for the property loss insurance in Japan. **Journal of flood Risk Management**. p.1- 18.

KOBAYASHI, K. e TAKARA, K. 2013. Development of a distributed rainfall-run-off/flood-inundation simulation and economic risk assessment model. **Journal of flood Risk Management**. 6, 85-98.

KOTTEK, M., J. GRIESER, C. BECK, B. RUDOLF, AND F. RUBEL, 2006. 2006: World Map of KöppenGeiger Climate Classification updated. **Meteorol. Z.**, 15, p.259-263.

KOUTSOYIANNIS, D. 2006. Nonstationarity versus scaling in hydrology. **Journal of Hydrology**. 324, p. 239-254.

KUNDZEWICZ, Z.W. 2012. Changes in flood risk– Introduction. In: Z.W. Kundzewicz, ed. Changes in flood risk in Europe. Wallingford: IAHS Press, p.1-5.

KUNDZEWICZ, Z.W., KANAE, S., SENEVIRATNE, S.I., HANDMER, J., NICHOLLS N., PEDUZZI, P., MECHLER, R., BOUWER, L.M., ARNELL, N., MACH, K., MUIR-WOOD, R., BRAKENRIDGE, G.R., KRON, W., BENITO, G., HONDA, Y., TAKAHASHI, K., SHRESTYUKOV, B., 2014. Flood risk and climate change: global and regional perspective. **Hydrological Science Journal**, 59, (1), p.1-28

KWAK, Y., e KONDOH, A., 2010. A Study on the Assessment of Multi-Factors Affecting Urban Floods Using Satellite Image: A Case Study in Nakdong Basin, S. Korea. *Advances in Geosciences*. ed. World Scientific Publishing, 265–278. ISBN: 978-981-283-811-7.

KWAK, Y., TAKEUCHI, K., T., FUKAMI, K. MAGOME, J. 2012. A new approach to flood risk assessment in Asia Pacific Region based on MRI-AGCM outputs. **Hydrological Research Letters**, 6, p.70-75.

LEE, S., NAKAGAWA, H., KAWAIKE, K., ZHANG, H., 2015. Urban inundation simulation considering road network and building configurations. **Journal of Flood Risk Management**. p.1-10.

LIU, Y. Y., D. R. MAIDMENT, D. G. TARBOTON, X. ZHENG, AHMET YILDIRIM, N. S. SAZIB S., WANG, 2016. A CyberGIS Approach to Generating High-resolution Height Above Nearest Drainage (HAND) Raster for National Flood Mapping, In: CyberGIS 16, The Third International Conference on CyberGIS and Geospatial Data Science, 24-26 July 2016 Urbana, Illinois. 1-6.

MARK, D.M.; O'CALLAGHAN , J. F.; 1984. The extraction of Drainage networks from digital elevation data. **Computer vision, Graphics and Image Processing** 28, p. 323-344..

MANFREDA, S., LEO, M. D., SOLE, A. 2011. Detection of Flood Prone Areas using Digital Elevation Models, **Journal of Hydrologic**

Engineering, 16 10, p.781-790 doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000367

MANFREDA, S., NARDI, F., SAMELA, C., GRIMALDI, S., TARAMASSO, A. C., ROTH, G., SOLE, A. 2014. Investigation on the Use of Geomorphic Approaches for the Delineation of Flood Prone Areas, **Journal of Hydrology**, 517, p. 863-876 doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.009

MANFREDA, S., SAMELA, C., GIOIA, A., CONSOLI, G., IACOBELLIS, V., GIUZIO, L., CANTISANI, A., SOLE, A., 2015. Flood-Prone Areas Assessment Using Linear Binary Classifiers based on flood maps obtained from 1D and 2D hydraulic models, **Natural Hazards**, 79 (2), p. 735-754.

MCCUEN. R. H., 1941. Modeling hydrologic change: statistical methods. Boca Raton, CRC Press

MERZ B., THIEKEN A., GOCHT M. 2007 Flood Risk Mapping At The Local Scale: Concepts and Challenges. In: Begum S., Stive M.J.F., Hall J.W. (eds) Flood Risk Management in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol 25. Springer, Dordrech.

MERZ, R., BLÖSCHL, G. 2008a Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and casual expansion of information. **Water Resour. Res.** 44, p.1-17

MERZ, R., BLÖSCHL, G. 2008b, Flood Frequency Hydrology: 2. Combining Data Evidence, **Water Resour. Res.**, 44, W08433, DOI:10.1029/2007WR006745.

MERZ, B., VOROGUSHYN, S., LALL, U., VIGLIONE, A., BLÖSCHL, G. 2015. Charting unknown waters—On the role of surprise in flood risk assessment and management, **Water Resour. Res.**, 51, doi:10.1002/2015WR017464.

MEYER, V., BECKER, N., MARKANTONIS, V., SCHWARZE, R., VAN DEN BERGH, J. C. J. M., BOUWER, L. M., BUBECK, P.,

ClAVOLA, P., GENOVESE, E., GREEN, C., HALLEGATTE, S., KREIBICH, H., LEQUEUX, Q., LOGAR, I., POPYRAKIS, E., PFURTSCHELLER, C., POUSSIN, J., PRZYLUKI, V., THIEKEN, A. H., VIAVATTENE, C.: 2013. Review article: Assessing the costs of natural hazards – state of the art and knowledge gaps, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 13, 1351-1373, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1351-2013>.

MICELI, B. S., DIAS, F. M., SEABRA, F. M., SANTOS, P. R. A. FERNANDES, M. C., 2011. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, 63 1, p.191-201.

MILLY., P.C.D., WETHERALD, R.T., DUNNE, K.A., DELWORTH, T.L. 2002. Increasing risk of great floods in a changing climate. **Nature**. 415. (1) p.514-517.

MOEL, H., VAN ALPHEN, J., AERTS, J.C.H., 2009. Flood maps in Europe – methods, availability and use. **Natural Hazards Earth System Sciences**. 9, p.289-301.

MOMO, M.R., PINHEIRO, A., SEVERO, D.L., CUARTAS, L.A., NOBRE, A.D. 2016. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 21, (1) p.200-208.

MONTANARI, A., KOUTSOYANNIS D., 2014. Modelling and mitigating natural hazards: Stationarity is immortal!. **Water Resour. Res.** 50, 9748-9756. doi:10.1002/2014WR016092.

MONTEIRO, L.R., KOBAYAMA, M. 2013. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **REGA**. 10, (2) , p.13-25.

MONTEIRO, L.R., KOBAYAMA, M. 2014. Influências da distribuição temporal de precipitação no mapeamento de inundação. **REGA**. Vol. 11, (2), p.25-35.

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

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A.. **Hidrologia** In: Serviço Geológico do Brasil. Variáveis aleatórias contínuas: Distribuições e aplicações: Distribuição Normal. Belo Horizonte: CPRM, 2007. Cap. 5, p. 127.

NARDI, F., BISCARINI, C., DI FRANCESCO, S., MANCIOLA, P., e UBERTINI, L., 2013. Comparing alarge-scale DEM-based floodplain delineation algorithm with standard flood maps: the Tiber river basin case study. **Irrig. Drain.** , 62 (2), 11-19. <http://dx.doi.org/10.1002/ird.1818>.

NARDI, F., VIVONI, E. R., AND GRIMALDI, S., 2006. Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. **Water Resources Research.**, 42 W09409, p. 1-15. doi:10.1029/2005WR004155

NEAL, J. VILLANUEVA, I., WRIGHT, N., WILLIS, T., FEWTRELL, T., e BATES, P. 2012. How much physical complexity is needed to model flood inundation? **Hydrological Processes.** 26, p. 2264-2282.

NOBRE, A.D., CUARTAS, L.A., HODNETT, M., RENNÓ, C.D., RODRIGUES, G., SILVEIRA, A., e WATERLOO, M. 2011. Height above the nearest drainage—a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology.** 404, p. 13-29.

NOBRE, A.D., CUARTAS, L.A., MOMO, M.R., SEVERO, D.L., PINHEIRO, A., e NOBRE, C.A. 2015. HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Process** 30, p. 320-333.

O'CALLAGHAN, J. F., MARK, D. M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, 28, (3), p. 323-344.

PAPPENBERGER, F. BEVEN, K. J., 2006. Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. **Water Resour. Res.** 42 (5), p.1–8. doi:10.1029/2005WR004820

POURALI, S.H., ARROWSMITH, C., CHRISMAN, N., MATKAN, A.A., MITCHELL, D. 2014. Topography wetness index application in flood-risk-based land use planning. **Applied Spatial Analysis and Policy**. p. 1-16.

RAHMATI, O., KORNEJADY, A., SAMADI, M., NOBRE, A.D. MELESSE, A.M. 2018. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. **Environ. Modelling and Software**. p. 1-12.

READ, L.K. e VOGEL, R. M. 2015. Reliability, return periods, and risk under nonstationarity. **Water Resour.Res.**, 51, 6381–6398, doi:10.1002/2015WR017089.

REFOSCO, J.C., SILVA, G.S., ESKELSEN, C.R., NICOLETTI, A.L., CORDERO, A., SALVADOR, D.F. 2013. Mapas de inundação a partir de geoprocessamento e georreferenciamento – O caso de Blumenau (SC). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu 13-18 abril 2013. Foz do Iguaçu: INPE, p. 4594–4600.

RENARD, B.; KOCHANNEK, K.; LANG, M.; GARAVAGLIA, F.; PAQUET, E.; NEPPEL, L.; NAJIB, K.; CARREAU, J.; AUBERT, Y.; BORCHI, F.; SOUBEYROUX, J.M.; JOURDAIN, S.; VEYSSEIRE, J.-M.; SAUQUET, S.; CIPRIANI, T.; AUFRAY, A.; , 2013. Data-based comparison of frequency analysis methods: A general framework. **Water Resources Research**, Vol. 49, p. 1-19.

RENNÓ, C. D.; NOBRE A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J.; 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**. p. 3469-3481.

ROGGER, M.; PIRKL, H.; VIGLIONE, A. KOMMA, J. ; KOHL, B.; KIRNBAUER, R.; MERZ, R.; BLÖSCHL, G. 2012a, Step changes in the flood frequency curve: Process controls, **Water Resour. Res.**, 48, W05544, doi:10.1029/2011WR011187

ROGGER, M.; KOHL, B.; PIRKL, H.; KOMMA, J.; KIRNBAUER, R.; MERZ, R.; BLÖSCHL, G.; 2012b. Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria – Do they tell a consistent story? **Journal of Hydrology**, p. 456-457.

SAMELA, C., MANFREDA, S., DE PAOLA, F. GIUGNI, M., SOLE, A., FIORENTINO, M., 2016. DEM-based approaches for the delineation of flood prone areas in an ungauged basin in Africa, **J. of Hydrol. Eng.**, 21 (2), p. 1-10. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001272

SAVAGE, J., BATES, P., FREER, J., NEAL, J., ARONICA, G., 2014. 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.

SAVAGE, J. T. S., PIANOSI, F., BATES, P., FREER, J. WAGENER, T. 2016. Quantifying the importance of spatial resolution and other factors through global sensitivity analysis of a flood inundation model, **Water Resour.Res.**, 52, p. 9146–9163, doi:10.1002/2015WR018198.

SAYAMA, T., OZAWA, G., KAWAKAMI, NABESAKA, S.; FUKAMI, K. 2012. Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. **Hydrological Science Journal**, 57 (2), p.298-312.

SAYAMA, T., TATEBE, Y., IWAMI, Y., TANAKA, S. 2015. Hydrologic sensitivity of flood runoff and inundation: 2011 Thailand floods in the Chao Phraya River basin. **Natural Hazards and Earth System Sciences**.15, p. 1617-1630.

SDS – Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável. 2013. Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: ENGEMAP, 202, Digital Document.

SHARY, P., SHARAYA, L. MITUSOV, A.V. 2001. Fundamental quantitative methods of land surface. **Geodema**. 107, p.1-32.

SILVA, A.T.; PORTELA, M.M.; NAGHETTINI, M. 2014. Nonstationarity of floods in the Itajaí-Açu River, in Brazil. In: **6th International Conference on Flood Management** , 16-18 September 2014 São Paulo. Porto Alegre: ABRH, p.1-11.

SIVAPALAN, M.; SAVENIJE, H.H.G.; BLÖSCHL, G. 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water. **Hydrological Processes**. 26, p. 1270-1276.

SPECKHANN, G.A.; CHAFFE, P.L.B.; GOERL, R.F.; ABREU, J.J. FLORES, J.A.A., 2017. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and HAND Model. **Hydrological Science Journal**, Vol. 63. (1). p.1-14. DOI: 10.1080/02626667.2017.1409896

STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA G., E.; Hidrologic Analysis and Interpretation. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**. Frequency analysis of extreme events. 20. ed. United States Of America: R. R. Donnelley & Sons Company, 1992. Cap. 18. p. 181-182.

SOUZA, J.M., LOCH, R.E.N., 2008. Análise e melhoria da qualidade altimétrica dos dados da Shuttle Radar Topography Mission, SRTM-3. **Revista Brasileira de Cartografia**, 60, 02, p.155-166.

USACE US ARMY CORPS OF ENGINEERS 2010. HEC-RAS. Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System. User's Manual. Davis-CA, US.

USGS UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2016 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Acesso em 12/12/2016.

USHIYAMA, T., SAYAMA, T., TATEVE, YUYA., FUJIOKA, S., FUKAMI. K. 2014. Numerical Simulation of 2010 Pakistan Flood in Kabul River Basin by Using Lagged Ensemble Rainfall Forecasting. **American Meteorological Society**. 15, (2), p. 193- 211.

VIGLIONE A, ROGGER M. 2015. Flood processes and hazards. In: Paron P, Di Baldassarre G, Shroder JF Jr, eds. **Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters**. Amsterdam: Elsevier.

VIGLIONE, A.; MERZ, B.; VIET DUNG, N.; PARAJKA, J. ; NESTER, T. BLÖSCHL, G. 2016. Attribution of regional flood changes based on scaling fingerprints, *Water Resour. Res.*, 52, p. 5322–5340, doi:10.1002/2016WR019036.

VELDKAMP, T.I.E., WADA, Y., AERTS, J.C.J.H., DÖLL, P., GOSLING, S.N., LIU, J., MASAKI, Y., OKI, T., OSTBERG, S., POKHREL, Y., SATOH, Y., KIM, H., WARD, P.J.. 2017. Water scarcity hotspots travel downstream due to human interventions in the 20th and 21st century. **Nature Communications**. p1-12. DOI: 10.1038/ncomms15697

VOGEL, R.M., YAINDL, C., WALTER, M. 2011. Nonstationarity: Flood magnification and recurrence reduction factors in the United States. *Journal of the American Water Resources Association.*, 47 3. p. 464-474.

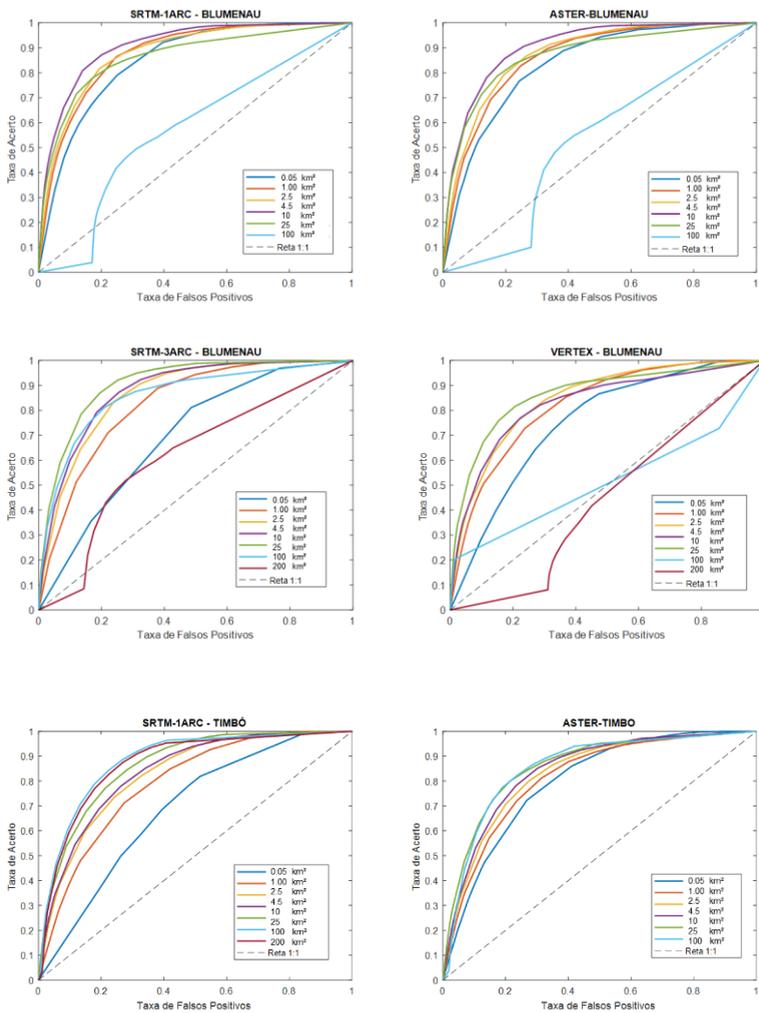
WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2018. The United Nations World Water Development Report 2018: **Nature-based Solutions**. Paris, UNESCO."

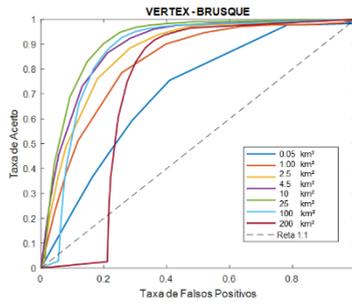
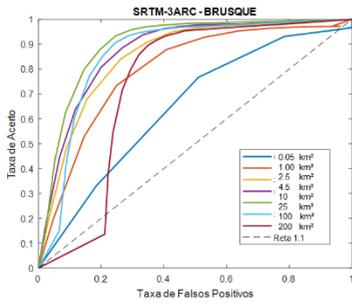
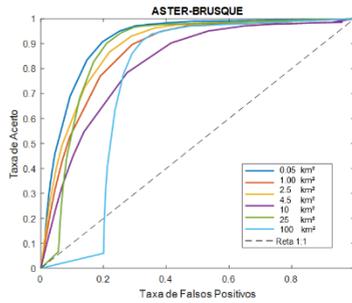
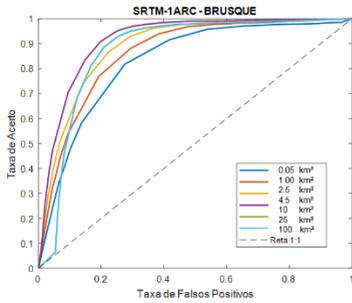
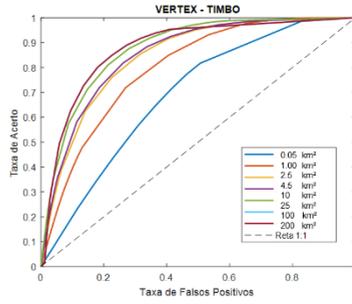
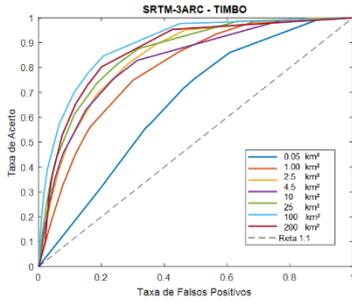
ZHENG, X., TARBOTON, D.G., MAIDMENT, D.R., LIU, Y.Y., PASSALACQUA, P. 2017. River Channel Geometry and Rating curve estimation using Hight Above the Nearest Drainage. **JAWRA**. p. 1-34.

ZHOU, Q.; LENG, G., FENG, L., 2017. Predictability of state-level flood damage in the counterminous United States: the role of hazard, exposure and vulnerability. **Scientific Reports**, 7, 5354, p.1-11. DOI:10.1038/s41598-017-05773-4

APÊNDICE A

Receiver Operating Characteristics variando a densidade da rede de drenagem utilizando diferentes MDTs.





APÊNDICE B

Receiver Operating Characteristics para as seis descritores de terreno utilizando diferentes MDTs.

