ANÁLISE DA EVOLUÇÃO POPULACIONAL EM ÁREAS PROPENSAS A INUNDAÇÃO: ESTUDO DE CASO DE SANTA CATARINA

Roberto Fabris Goerl[1]; Fabiane Andressa Tasca [2]; Gustavo Andrei Speckhann [3]; Pedro Luiz Borges Chaffe [4]

ABSTRACT – Terrain descriptor and Digital Elevation Models can be an important tool for mapping flood hazard in large areas with limited available data. Detailed census data in local and regional scales are another important aspect to be combined with flood hazard in order to understand the drivers of flood risk. Santa Catarina State-SC in Brazil has been affected by many large flood-related disasters. This work mapped the population distribution in flood prone areas in Santa Catarina State. We combined the Height Above the Nearest Drainage – HAND with mapped historic inundation points provided by the Integration Ministry of Brazil to classify the terrain in three flood hazard categories. SEDAC and UN WPP-Adjusted Population Density were used to estimate the population exposed to flood hazard for the years of 2000 to 2020. About 15% of SC area was classified as medium to high flood hazard. We estimated that 45% of SC population will inhabit flood prone areas by 2020.

Palavras-Chave – MDE, HAND, População.

1 - INTRODUÇÃO

As inundações estão entre os desastres naturais que mais afetam pessoas no mundo (EM-DAT, 2018). Entre as medidas preventivas e mitigadoras estão as estruturais e não-estruturais, como as obras de engenharia e técnicas de mapeamento, respectivamente. Existem diversos métodos que podem ser empregados para a elaboração de mapas de locais propensos à inundar, como levantamento de registros históricos, uso de imagens de satélites e modelos hidrológicos e hidrodinâmicos.

Com a maior disponibilidade de dados topográficos surgiram métodos de mapeamento de inundação utilizando apenas o Modelo Digital de Elevação (MDE) e atributos hidrogeomorfológicos extraídos diretamente dos mesmos (Manfreda *et al.*, 2011; Samela *et al.*, 2015). Um destes atributos - ou descritores de terreno - que tem sido utilizado para mapeamento

1) Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Geociências, Campus Universitário Trindade - Florianópolis - SC - Brasil. CEP: 88040-900, roberto.f.goerl@ufsc.br
2) Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Campus Universitário Trindade - Florianópolis - SC - Brasil. Caixa Postal: 476 CEP: 88040-970. fabitasca@gmail.com
3) Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Campus Universitário Trindade - Florianópolis - SC - Brasil. Caixa Postal: 476 CEP: 88040-970. gustavospeck@gmail.com
4) Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Eng. Sanitária e Ambiental, Campus Universitário Trindade - Florianópolis - SC - Brasil. Caixa Postal: 476 CEP: 88040-970. pedro.chaffe@ufsc.br

é o *Height Above the Nearest Drainage* - HAND (Nobre *et al.*, 2016; Goerl *et al.*, 2017, Speckhann *et al.*, 2018).

Para um mapeamento de inundação ter um caráter efetivo de prevenção, características populacionais e socioeconômicas também devem ser levadas em consideração (Kron, 2005). No Brasil, os dados populacionais de todos os municípios são coletados decenalmente pelo IBGE durante o censo. Já em escala global, o quantitativo populacional está disponível em resoluções temporais melhores (Sorichetta *et al.*, 2015, Lloyd *et al.*, 2017). Tanto os dados populacionais globais como os MDEs são em formato raster, o que facilita a sua análise e integração dentro de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os dados censitários do Brasil estão em formato vetorial, o que muitas vezes dificulta a integração em ambiente SIG com os mapas de inundação, que comumente são em formato raster.

Neste contexto, o presente trabalho analisou a evolução populacional em áreas suscetíveis à inundação em escala regional, Estado de Santa Catarina (SC), utilizando métodos e dados geográficos gratuitamente disponíveis. Além disso, foi analisada a possível evolução da tipologia de desastres esperados, comparando a evolução da urbanização em relação à declividade.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho contemplou todo o território do Estado de Santa Catarina (Figura 1) cujas inundações têm sido registradas há mais de 150 anos (Silveira *et al.*, 2009). Para mapear as áreas suscetíveis a inundações foi utilizando o HAND integrado ao TerraHidro (INPE, 2018). Como principal dado de entrada foi utilizado o MDE SRTM com resolução de 30m. Atualmente, em escala global, estão disponíveis três diferentes MDEs: o DEM Shuttle Radar Topography Mission (SRTM DEM), o ASTER Global Digital Elevation (ASTER GDEM) e ALOS Global Digital Surface Model (AW3D30), todos com resolução espacial de 30m. A acurácia vertical destes modelos já foi assunto de diferentes estudos (e.g. Hayakawa *et al.*, 2008, Hirt *et al.*, 2010,) bem como sua aplicabilidade no mapeamento de inundação (Suwandana *et al.*, 2012, Gichamo *et al.*, 2012).

Speckhann *et al.* (2018) compararam os resultados do HAND utilizando MDEs de diferentes resoluções e demonstraram que o MDE SRTM acertou 90% dos locais de inundação. Dessa maneira, o MDE SRTM também foi utilizado no presente trabalho. A descrição detalhada da obtenção e dos produtos da missão SRTM pode ser vista em Faar *et al.* (2007). A partir do MDE foi também gerado um raster de declividade que foi utilizado para analisar a expansão urbana em áreas planas ou declivosas.

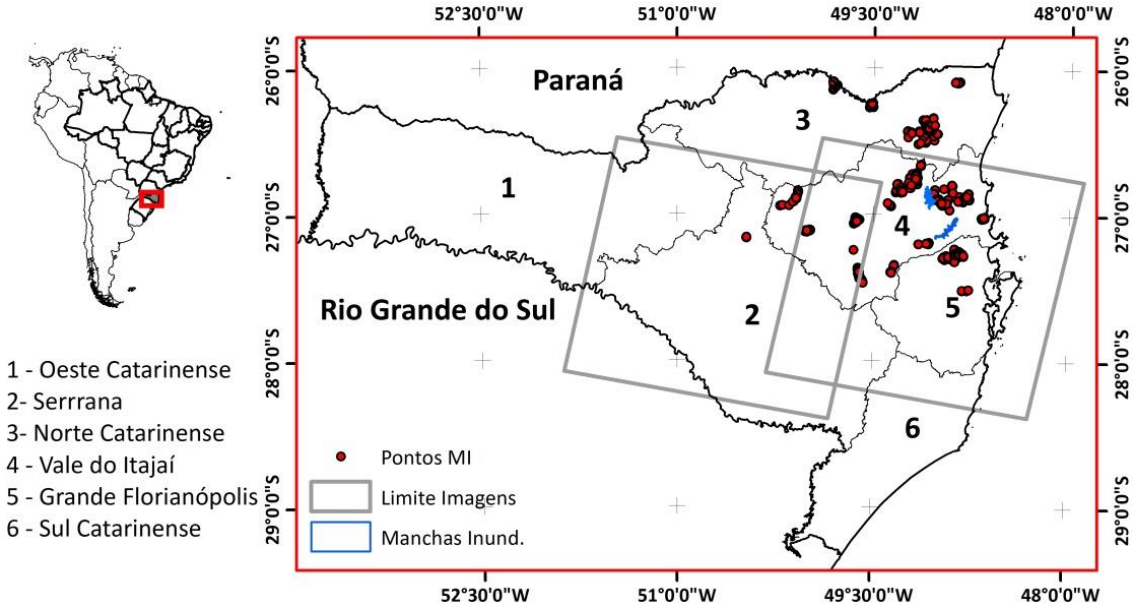


Figura 1 – Localização do Estado de Santa Catarina, apresentando as mesorregiões (1 a 6) e os dados utilizados para classificar o HAND. MI é Ministério da Integração.

Para determinar as classes do HAND e relacioná-las com as classes de inundação foram utilizados os pontos coletados pelo "Projeto Mapeamento: Dados e Análise da Vulnerabilidade a Desastres Naturais para Elaboração de Mapas de Risco e Apresentação de Proposta de Intervenções para Prevenção de Desastres", disponibilizados pelo Ministério da Integração. Foram também utilizadas imagens de satélites LANDSAT (5 e 7) referentes á inundação ocorrida em setembro de 2011 em diversos municípios catarinenses. As imagens do LANDSAT 7 foram obtidas em 11/09/2011 e as do LANDSAT 5 em 10/09/2011. Para a interpretação visual da imagem foi feita uma composição colorida RGB 753, para ambos sensores. Utilizaram-se também as manchas de inundação de três municípios: Blumenau, Brusque, e Presidente Getúlio. Ressalta-se que a maior parte destes dados se concentra na mesorregião do Vale do Itajaí, e, com menor quantidade, nas mesorregiões Norte e Grande Florianópolis.

Os dados de população mundial disponibilizados pelo *SocioEconomics Data and Aplications Center* (SEDAC) foram utilizados nos cálculos populacionais e, especificamente para os anos de 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020, utilizaram-se os dados referente à *UN WPP-Adjusted Population Density, v4.1*0 (CIESIN, 2018). Os rasters populacionais possuem a resolução original de 1 km e foram reamostrados para 30 m utilizando o algoritmo vizinho mais próximo. Utilizou-se um coeficiente de ajuste obtido pela razão entre a população total do raster reamostrado e o censo de SC dos anos de 2000 e 2010 para ajustar a população total do Estado nos diferentes anos.

As análises de variação do uso da terra foram feitas utilizando os dados do projeto MapBiomas - Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Este projeto disponibiliza o uso da terra para os biomas brasileiros entre 2000 e 2016, com resolução de 30m.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Projeto Mapeamento do Ministério da Integração (MI) coletou 14 mil pontos de residências afetadas por inundações. Para classificar o HAND e elaborar o mapa de inundação foi realizada uma análise de sensibilidade, determinando quantos pontos seriam coincidentes com determinado intervalo de fatiamento do HAND e qual o percentual da área de Santa Catarina seria considerada como propensa a inundar. Observa-se na Figura 2a que, com o aumento do valor do fatiamento para englobar mais pontos há um aumento das áreas consideradas de inundação. Adotando um valor de fatiamento do HAND que contemplasse 100% dos pontos do MI (HAND = 245 m), 84% de Santa Catarina seria considerado como suscetível à inundação. Analisando em conjunto os pontos do Projeto Mapeamento, as imagens de satélite do evento de 2011 e as manchas de inundação dos três municípios, o HAND foi fatiado em três classes: 0 a 12m, 12m a 20m e acima de 20m (Figura 3), determinando-se assim as classes de alta, média e baixa suscetibilidade. A classe alta engloba 90% dos pontos do MI enquanto que a classe média outros 7,55%. Assim, as áreas propensas a inundar contemplam 97,55% dos 14 mil pontos do MI.

Observa-se uma maior quantidade de áreas de inundação na faixa litorânea do Estado, principalmente nas mesorregiões Sul e Norte Catarinense, resultado da presença das planícies fluviais e marinhas nas principais bacias da vertente leste catarinense. Com base nos resultados do HAND, 10,5 % do território catarinense são áreas de alta suscetibilidade à inundação, enquanto que outros 5% são áreas de média suscetibilidade. Nota-se também na Figura 3 que os municípios com áreas urbanas mais populosas também se encontram no litoral.

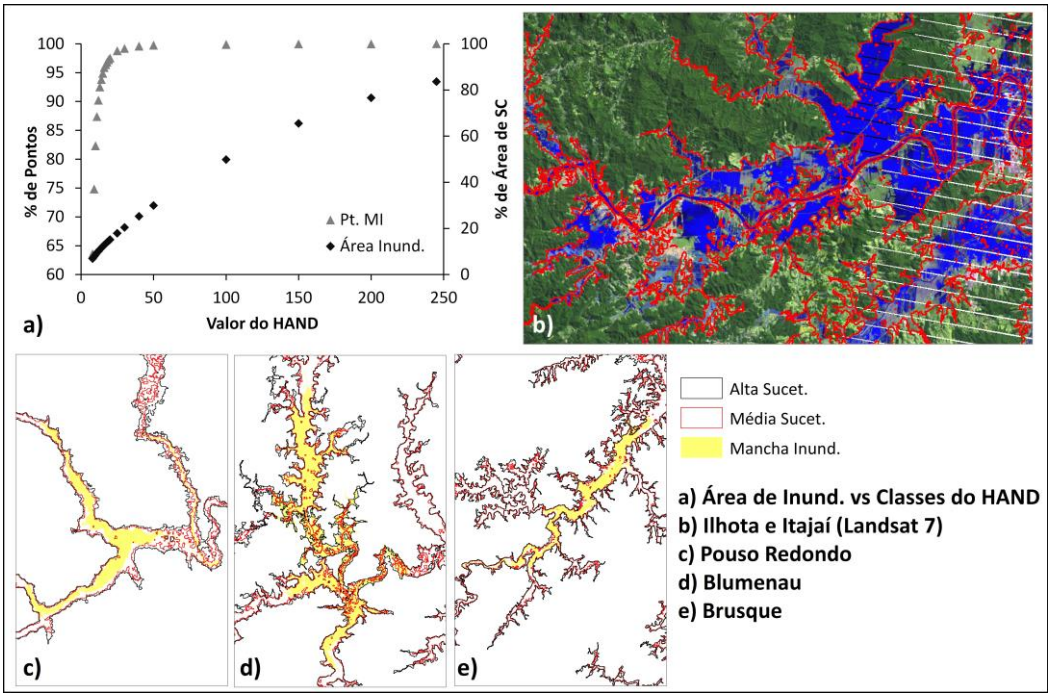
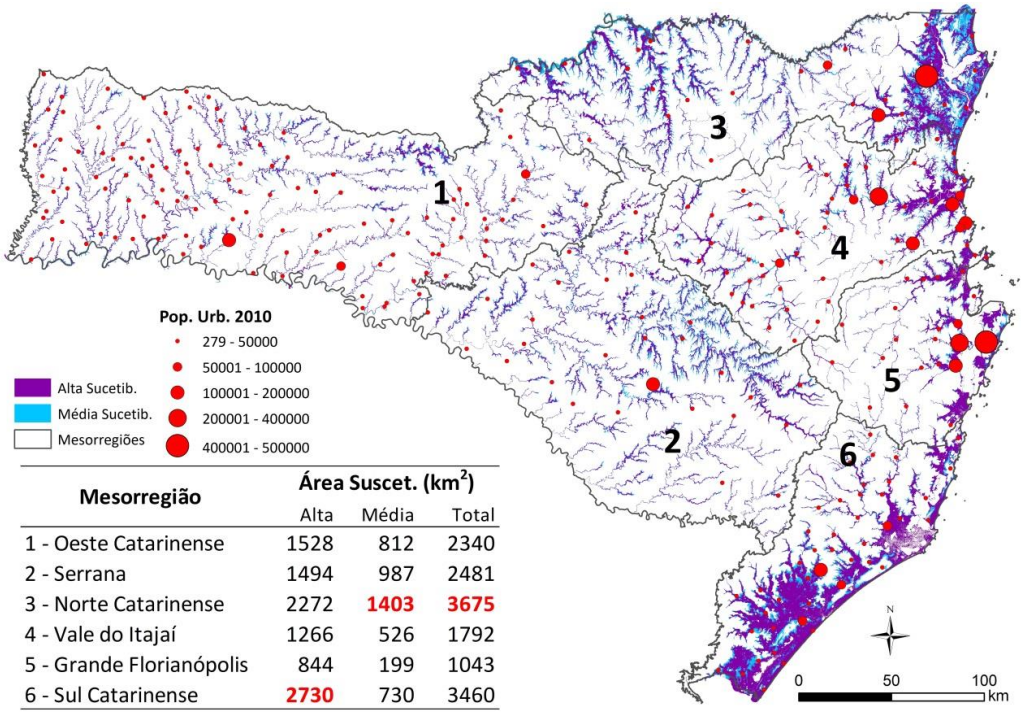


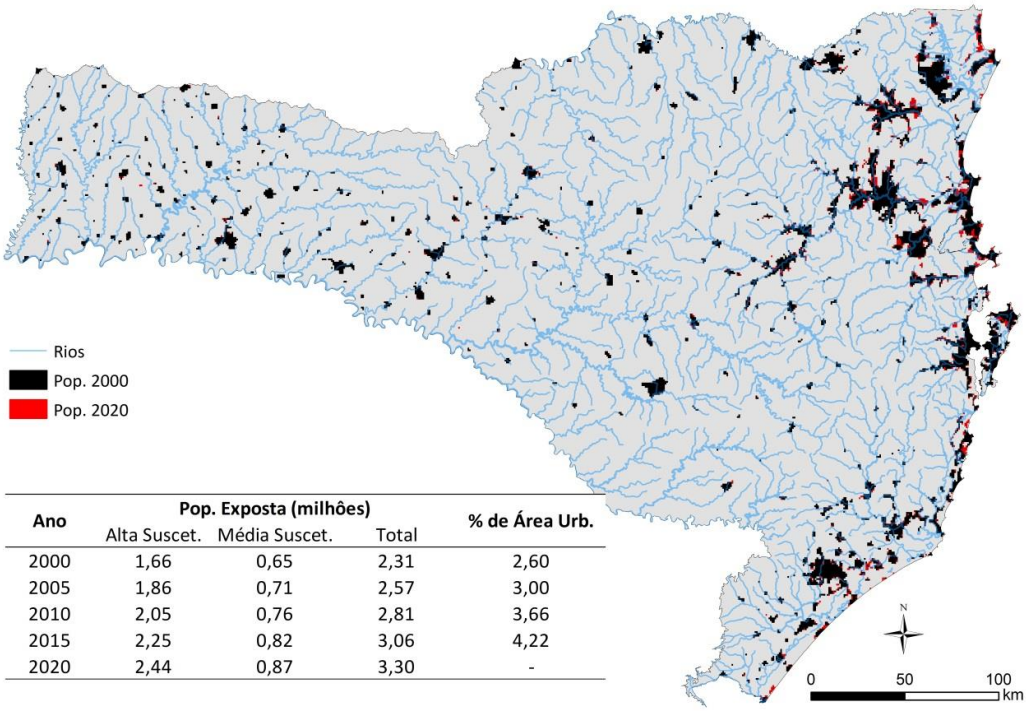
Figura 2 – Variação da área de inundação em relação ao intervalo de fatiamento do HAND e dados geográficos utilizados no presente trabalho.



Mesorregião	Área Suscet. (km²)		
	Alta	Média	Total
1 - Oeste Catarinense	1528	812	2340
2 - Serrana	1494	987	2481
3 - Norte Catarinense	2272	**1403**	**3675**
4 - Vale do Itajaí	1266	526	1792
5 - Grande Florianópolis	844	199	1043
6 - Sul Catarinense	**2730**	730	3460

Figura 3 – Áreas de alta e média suscetibilidade á inundação em Santa Catarina e população urbana dos municípios. Em vermelho os valores mais altos em cada classe.

Cerca de 3,06 milhões de habitantes de Santa Catarina habitam locais de Alta ou Média suscetibilidade á inundação. Desde 2000 até 2015 houve uma taxa de crescimento de 25% da população exposta á inundação, e chegará a 30% em 2020. Analisando o total populacional das áreas de alta e média suscetibilidade, com base nas projeções populacionais, em 2020 cerca de 45% da população do estado de Santa Catarina estará exposta à inundação, ou seja, 3,3 milhões de pessoas (Figura 4). Nota-se também que o aumento das áreas urbanizadas acompanha o aumento populacional, ou seja, não há apenas o crescimento e aumento da densidade populacional, mas também a expansão urbana.



Ano	Pop. Exposta (milhões)			% de Área Urb.
	Alta Suscet.	Média Suscet.	Total	
2000	1,66	0,65	2,31	2,60
2005	1,86	0,71	2,57	3,00
2010	2,05	0,76	2,81	3,66
2015	2,25	0,82	3,06	4,22
2020	2,44	0,87	3,30	-

Figura 4 – Expansão da população entre 2000 e 2020 e da população exposta ás inundações.

A expansão urbana e o crescimento populacional forçam esta população incremental a procurar locais mais distantes dos espaços historicamente ocupados, ou seja, afastam-se da planície de inundação para locais de maior declividade. Isto pode implicar na evolução da tipologia do desastre, da ocupação de áreas propensas a inundar para áreas propensas a deslizar (Kobiyama *et al.*, 2010). Analisando a evolução do total de áreas urbanas do Estado em diferentes classes de declividade adotadas por Jaedicke *et al.* (2014), nota-se que há a diminuição das áreas urbanas em áreas mais planas e um aumento em áreas mais declivosas (> 6°) (Tabela 1).

Tabela 1 - Evolução das áreas urbanas em diferentes classes de declividade*

	0-1°	1-6°	6-12°	12-18°	18-24°	24-45°	>45°
2000	14,41	69,04	13,42	2,42	0,55	0,15	0,01
2005	13,75	67,91	14,63	2,84	0,68	0,18	0,01
2010	13,23	67,12	15,52	3,15	0,76	0,21	0,01
2015	12,93	66,60	16,05	3,36	0,82	0,22	0,01

*Valores em % da área total urbanizada

Usando como indicador os valores das classes do HAND, nota-se uma tendência semelhante à observada na declividade. Há uma redução do percentual do total das áreas urbanas em áreas mais propensas a inundar e um aumento da urbanização em áreas mais distantes e com cotas mais elevadas em relação aos canais fluviais (Tabela 2). Dessa maneira, tanto os dados de declividade como os dados do HAND indicam uma possível evolução da tipologia dos desastres, ou seja, além das frequentes inundações os desastres relacionados a deslizamentos podem vir a se tornar frequentes.

Tabela 2 - Evolução das áreas urbanas para diferentes classes do HAND.

Valores HAND	2000	2005	2010	2015
<12m	46,27	43,51	41,51	40,42
12-20m	18,04	17,97	17,75	17,64
>20m	35,68	38,52	40,74	41,94

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, fez-se uma proposta de análise regional da evolução populacional em áreas suscetíveis a inundação. Estimou-se que em 2020, cerca de 45% da população de Santa Catarina habitará locais propensos a inundar. Além disso, a urbanização está avançando também para locais mais declivosos e possivelmente com maior propensão ao deslizamento. Um possível aumento da frequência dos desastres hidrológicos pode estar relacionado não apenas às mudanças climáticas e do ciclo hidrológico, mas também ao aumento populacional em áreas propensas a inundar. Desta maneira, além dos métodos de prevenção, como o mapeamento aqui apresentado, políticas públicas de regulação da expansão urbana em áreas de alta suscetibilidade devem ser adotadas. Visto que a população global ainda irá crescer, a regulação efetiva do uso da terra, principalmente em áreas suscetíveis às inundações, pode ser uma poderosa ferramenta de prevenção.

Por fim, destaca-se ainda que estudos em escalas de detalhe precisam ser realizados, bem como analisar a população exposta utilizando dados censitários coletados pelo IBGE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CIESIN - CENTER FOR INTERNATIONAL EARTH SCIENCE INFORMATION NETWORK. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals, Revision 10. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). https://doi.org/10.7927/H49884ZR. Acesso em 01 de Maio de 2018.

FARR, T.G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.T.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRGIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.

GICHAMO, T. Z.; POPESCU, I.; JONOSKI, A.; SOLOMATINE, D. River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 37-46, 2012.

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

HAYAKAWA, Y. S.; OGUCHI, T.; LIN, Z. Comparison of new and existing global digital elevation models: ASTER G-DEM and SRTM-3. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 17, 2008.

HIRT, C.; FILMER, M. S.; FEATHERSTONE, W. E. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 57, n. 3, p. 337-347, 2010.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais. **TerraHidro - Plataforma para a execução de aplicações envolvendo modelagem hidrológica distribuída**. Disponível em: http://wiki.dpi.inpe.br/doku.php?id=terrahidro. Acesso em 20 de maio de 2018.

JAEDICKE, C.; VAN DEN EECKHAUT, M.; NADIM, F.; HERVÁS, J.; KALSNES, B.; VANGELSTEN, B. V.; SMITH, J. T.; TOFANI, V.; CIUREAN, R.; WINTER, M.G.; SVERDRUP-THYGESON, K.; SYRE, E.; SMEBYE, H. Identification of landslide hazard and risk 'hotspots' in Europe. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 73, n. 2, p. 325-339, 2014.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; CORREA, G. P.; MICHEL, G. P. Debris flow occurence in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorologic e geomorphic aspects. In: D. de WRACHIEN; C.A. BREBBIA. (Org.). **Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows III**. Southampton: WitPress, 2010, v. 1, p. 77-88

KRON, W. Flood risk= hazard• values• vulnerability. **Water International**, v. 30, n. 1, p. 58-68, 2005.

LLOYD, C. T.; SORICHETTA, A.; TATEM, A. J. High resolution global gridded data for use in population studies. **Scientific data**, v. 4, p. 170001, 2017.

MANFREDA, S.; DI LEO, M.; SOLE, A. Detection of flood-prone areas using digital elevation models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 10, p. 781-790, 2011.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L.; PINHEIRO, A.; NOBRE, C. A. A HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 320-333, 2016.

SAMELA, C.; MANFREDA, S.; PAOLA; F. D.; GIUGNI, M.; SOLE, A.; FIORENTINO, M. DEM-based approaches for the delineation of flood-prone areas in an ungauged basin in Africa. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 2, p. 06015010, 2015.

SILVEIRA, W. N.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; BRANDENBURG, B. **História de Inundações em Joinville 1851 - 2008**. 1. ed. Curitiba: Organic Trading, 2009. v. 1. 153p

SORICHETTA, A.; HORNBY, G. M.; STEVENS, F. R.; GAUGHAN, A. E.; LINARD, C.; TATEM, A. J. High-resolution gridded population datasets for Latin America and the Caribbean in 2010, 2015, and 2020. **Scientific data**, v. 2, p. 150045, 2015

SPECKHANN, G. A.; CHAFFE, P. L. B.; GOERL, R.F.; ABREU, J. J.; ALTAMIRANO FLORES, J. A. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model**.** **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 1, p. 87-100, 2018

SUWANDANA, E.; KAWAMURA, K.; SAKUNO, Y.; KUSTIYANTO, E.; RAHARJO, B. Evaluation of ASTER GDEM2 in comparison with GDEM1, SRTM DEM and topographic-map-derived DEM using inundation area analysis and RTK-dGPS data. **Remote Sensing**, v. 4, n. 8, p. 2419-2431, 2012