

MODELAGEM HIDRÁULICA DOS EVENTOS DE INUNDAÇÕES EM LAGES (SC)

Silvio Luís Rafaeli Neto(*), Guilherme da Silva Ricardo, Cindy Fernandes Mendes, Mariana Bonella Cunha.

* Professor do Departamento de Engenharia Ambiental no Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC – silvio.rafaeli@udesc.br

RESUMO

Desastres por inundações ocorrem no estado de Santa Catarina com variados graus de distribuição espacial, impactos e frequência. Preveni-los ou mitigá-los depende de um processo decisório que exige o conhecimento do problema, obtido pela compreensão dos sistemas envolvidos, dos seus componentes e seus respectivos relacionamentos. O modelo hidráulico de um sistema hidrográfico possibilita realizar experimentos sobre uma representação válida do sistema. O objetivo deste trabalho foi analisar o sistema hidráulico de três rios urbanos, no esforço de compreender os principais mecanismos que atuam sobre a formação das inundações nas planícies adjacentes. O estudo foi realizado na cidade de Lages (SC), que apresenta um histórico de eventos extremos. A metodologia produziu um mapa consolidado das áreas de riscos, o qual serviu para avaliar a eficácia do modelo em prever zonas de alagamentos. O modelo *HEC-GeoRAS* foi utilizado para construir a geometria espacial e o modelo *HEC-RAS* para simular a hidrodinâmica. As vazões de entrada nos trechos dos canais foram estimadas pelo Método Racional. O trabalho apontou evidências sólidas de que as inundações no sistema possuem dependência da distribuição espacial das chuvas. O modelo foi capaz de reproduzir o mapa de riscos a partir das vazões superestimadas pelo Método Racional.

PALAVRAS-CHAVE: HEC-RAS, Inundações, Mapa de Risco, Bacia Hidrográfica, Geoprocessamento.

INTRODUÇÃO

A cidade de Lages é o principal polo econômico do Planalto Serrano de Santa Catarina, onde vive uma população de cerca de 155.000 hab. O núcleo urbano abrange uma área aproximada de 125km², dividido em 3 distritos, sendo que 92% desta área é drenada por um conjunto de 9 sub-bacias, das quais fazem parte a bacia hidrográfica do Rio Carahá e a bacia do Rio Ponte Grande, afluentes do Rio Caveiras. Diversos eventos de cheias foram registrados na cidade, como nos anos de 1997, 2005, 2008, 2011 e 2013. Em todas estas situações, houve prejuízos sociais significativos a ponto do estado e município criarem estruturas institucionais, como Defesa Civil e Conselho de Municipal de Defesa Civil e físicas, como abrigos, todos articulados por um Plano de Contingências.

Cheias ou inundações são fenômenos de natureza geográfica que ocorrem no tempo e no espaço, cujos problemas decorrentes tendem a ser de difícil solução porque envolvem variáveis de natureza geográfica (domínio espacial do problema), técnica (conhecimento científico e tecnologia), organizacional (pública, privada, níveis de decisão), social (variáveis do tomador de decisão como estilo, número, acesso à informação, nível de poder) e temporal (RAFAELI NETO, 2000). Quando provocam prejuízos ou impactos sociais e/ou econômicos, são tratadas como Desastres Naturais.

Alguns estudos foram realizados até o momento tendo como resultado principal os mapas das inundações ocorridas em 2005, 2008 e 2011, produzidos pela Prefeitura Municipal de Lages – PML. Sensores de chuva cedidos pelo Centro Nacional de Monitoramento Gerenciamento e Alerta de Desastres Naturais – CEMADEN também foram instalados na cidade, cujos dados de monitoramento estão disponíveis junto à Defesa Civil do município. Apesar da estrutura de estado já criada e da disponibilidade de dados de monitoramento desde 2005, não há na literatura qualquer estudo aprofundado sobre estes eventos nesta região. Tais estudos seriam importantes para delinear um sistema de gerenciamento de desastres por inundações, nos moldes praticados na União Europeia e Estados Unidos.

As três bacias hidrográficas analisadas estão conectadas pelos seus canais principais. Seus exutórios, que são os pontos para onde converge todo o escoamento superficial da bacia, encontram-se próximos e dentro da área de risco de inundações levantada. Evidências colhidas nos mapas de alagamentos dos anos de 2005, 2008 e 2011, bem como nas séries de precipitações das estações meteorológicas das cidades de Lages e Painel, apontam para situações específicas de alagamentos, provavelmente associadas à distribuição espacial das chuvas. Dessa forma a variação espacial da chuva sobre as áreas de captação das três bacias reflete nas vazões nos exutórios, e isto cria cenários de alagamentos específicos na planície de inundações.

Destaca-se ainda que a precipitação em apenas uma bacia também é passível de resultar em enchente, entretanto tem-se como hipótese que as inundações na cidade de Lages são prioritariamente causadas por ondas de cheias provenientes

dos rios Carahá e Ponte Grande e que a área de drenagem do terço superior da bacia hidrográfica do rio Caveiras contribui secundariamente para os alagamentos nessas duas bacias.

Logo, este estudo utiliza simulações hidráulica e hidrológica para mapear manchas de inundação e assim comparar o limite e intensidade das áreas alagáveis nas bacias de estudo, na cidade de Lages, com as áreas de risco já mapeadas em conjunto com a prefeitura do município. O presente estudo também procura contribuir para o melhor planejamento urbano e auxiliar nas tomadas de decisões relacionadas aos eventos de cheias no município.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de Estudo

Os canais escolhidos para a modelagem hidráulica foram os rios Carahá, Ponte Grande e Caveiras (Figura 1), em cujas margens situam-se as planícies naturais de inundação. Os mapas básicos das inundações dos anos de 2005, 2008 e 2011, fornecidos pelo município de Lages, foram validados no Sistema de Informação Geográfica *ArcGis* 10.1 sobre um Modelo Digital de Terreno (MDT) (SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL DO ESTADO DE SANTA CATARINA, 2013) com resolução de 1m. As bacias hidrográficas possuem áreas de 30Km², 27Km² e 493km², respectivamente.

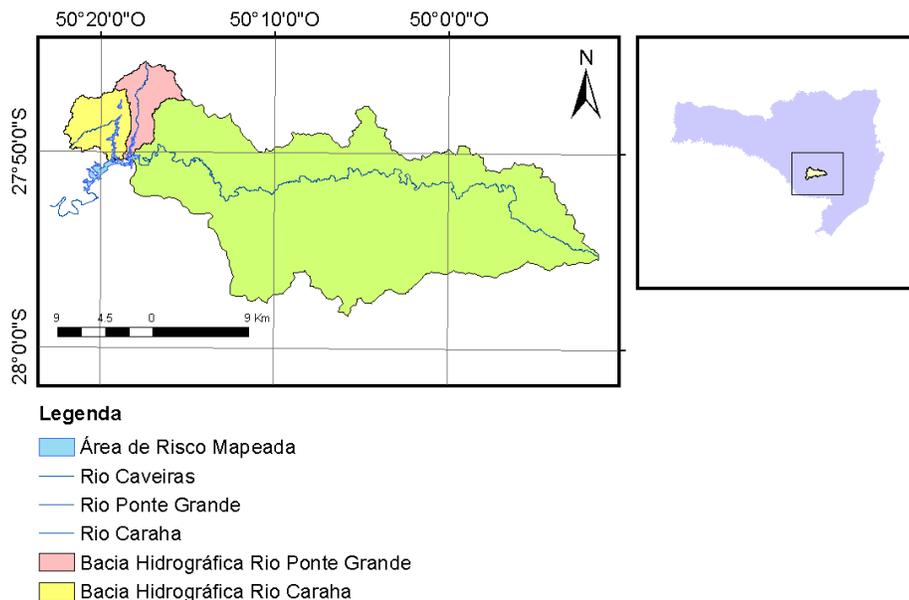


Figura 1 – Bacias hidrográficas das áreas de risco de inundações na cidade de Lages (SC).

Simulação hidráulica dos eventos de inundação

Um mapa de riscos de inundações foi consolidado a partir de três mapas produzidos pelo município de Lages, dos anos de 2005, 2008 e 2011. Este mapa foi utilizado como referência para se construir a estrutura geométrica da área de modelagem. Esta estrutura foi elaborada no aplicativo *HEC-GeoRAS* (USACE, 2012), integrado com o *ArcGIS* 10.1, de acordo com a metodologia de MAGALHÃES et al. (2013) e FRANÇA & RIBEIRO (2013). A estrutura foi composta pelos três canais e suas áreas de entorno imediato, consideradas pelo mapa de riscos, como áreas sujeitas a alagamentos em eventos extremos. Os canais foram divididos em trechos, uma vez que a modelagem se realiza por trechos do sistema hidrográfico. O rio Caveiras foi dividido em três trechos, o rio Carahá em um trecho e um trecho para o rio Ponte Grande (Figura 3), totalizando cinco trechos de simulação.

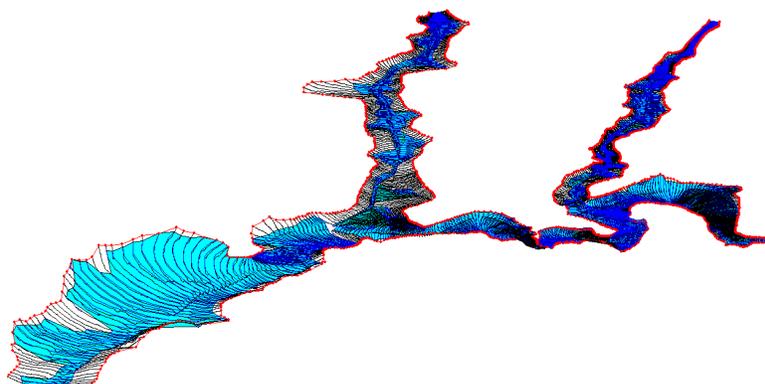


Figura 2 - Estrutura geométrica da área de risco de inundação.

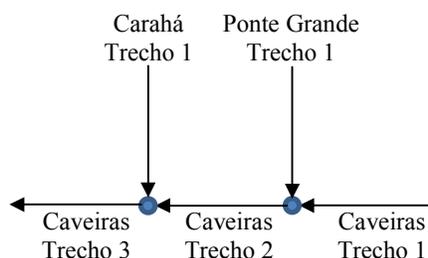


Figura 3 – Diagrama unifilar da composição de trechos para a modelagem hidráulica das planícies de inundações em Lages (SC).

A modelagem hidráulica foi realizada por meio do aplicativo *HEC-RAS* (USACE, 2010), para o cenário do dia 30/08/2011. O aplicativo permite simular situações de inundações nos trechos, a partir de parâmetros e condições de contorno e vazões de entrada. Estabeleceu-se o coeficiente de *Manning* igual a $n = 0,03 \text{ s.m}^{-1/3}$ para todas as calhas dos cinco trechos e $n = 0,04 \text{ s.m}^{-1/3}$ para as áreas externas às calhas dos rios, ou seja, para as planícies de inundações (FRANÇA & RIBEIRO, 2013). A simulação foi feita com base no componente *steady flow*. Segundo USACE (2012), este componente do sistema de modelagem é necessário para o cálculo do gradiente da superfície da água, num fluxo constante e gradualmente variado. O sistema pode trabalhar com uma rede de canais ou com um único canal. O componente *steady flow* é capaz de modelar os regimes de escoamento subcrítico, supercrítico, ou uma composição deles. O regime adotado na simulação foi o supercrítico.

A falta de monitoramento fluviométrico no sistema hidráulico estudado dificultou a estimativa das vazões de entrada nos trechos dos canais. Por esta razão, as vazões de entrada nos trechos dos rios Carahá e Ponte Grande e no trecho 1 do rio Caveiras foram estimadas pelo Método Racional (equação 1), a partir das chuvas registradas nas estações Lages e Painei, no dia 30/08/2011, e ponderadas de acordo com as áreas de captação de cada bacia. As vazões dos trechos 2 e 3 do rio Caveiras foram calculadas de acordo com o acúmulo das vazões a montante desses trechos. Apesar de este método limitar-se a pequenas bacias e tender a superestimar as vazões em bacias maiores, optou-se pela sua utilização considerando sua simplicidade e rapidez na estimativa da descarga.

$$Q = \frac{C i A}{360} \quad \text{Equação (1)}$$

Na Equação 1, Q é a vazão de escoamento superficial que alimenta os canais ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), i é a intensidade da chuva (mm/h), A a área da bacia (hectares) e C o coeficiente de escoamento superficial médio da bacia. Adotou-se C igual a 0,4 para as bacias dos rios Carahá e Ponte Grande por serem bacias urbanas e 0,28 para a bacia do rio Caveiras, por ser predominantemente ocupada por campos, florestas, agricultura e reflorestamentos (RAFAELI NETO, et al., 2013).

A intensidade da chuva i horária foi calculada pelo método da desagregação de chuvas (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013), a partir das chuvas de 1 dia registradas no dia 30/08/2011, nas estações Lages e Painei. A chuva registrada na estação Lages foi aplicada para as bacias dos rios Carahá e Ponte Grande. A chuva registrada na Estação Painei foi considerada representativa bacia do terço superior do rio Caveiras.

O mapa de alagamento oriundo da simulação foi gerado no aplicativo *HEC-GeoRAS*, integrado no *ArcGIS*. 10.1. O processo de modelagem hidráulica está ilustrado na figura 4.

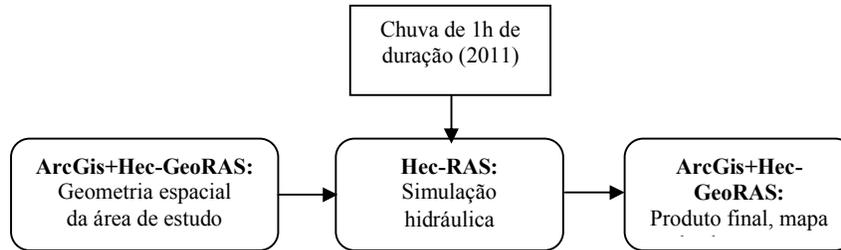


Figura 4 – Workflow para a simulação das áreas de inundação com os aplicativos *ArcGIS*, *HEC-RAS* e *HEC-GeoRAS*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapa de riscos de inundações

O mapa de riscos de inundações do núcleo urbano de Lages incorpora as áreas dos alagamentos mapeados pelo município nos eventos de 2005, 2008 e 2011 (Figura 5). Este mapa também representa as planícies inundáveis nas margens dos rios Carahá, Ponte Grande e Caveiras. Esta área totaliza 5,7Km², o que representa apenas 1,0 % da área total das bacias. O rio Ponte Grande é o que apresenta a menor planície inundável, estendendo-se por cerca de 3,6 km, a partir do seu exutório com o rio Caveiras. A planície inundável do rio Carahá estende-se por cerca de 4,9 km sendo que, aparentemente, possui espalhamento lateral mais pronunciado que do o rio Ponte Grande. O rio Caveiras demonstra possuir uma ampla extensão inundável (10,9 km), conectada com as demais.

O mapa de riscos limita-se a representar o resultado de inundações de três eventos específicos e não pode ser considerado como mapa definitivo. De fato, outros eventos de inundações foram observados em outros trechos desta rede de canais, mas não foram mapeados. Por esta razão, não foram considerados neste estudo.

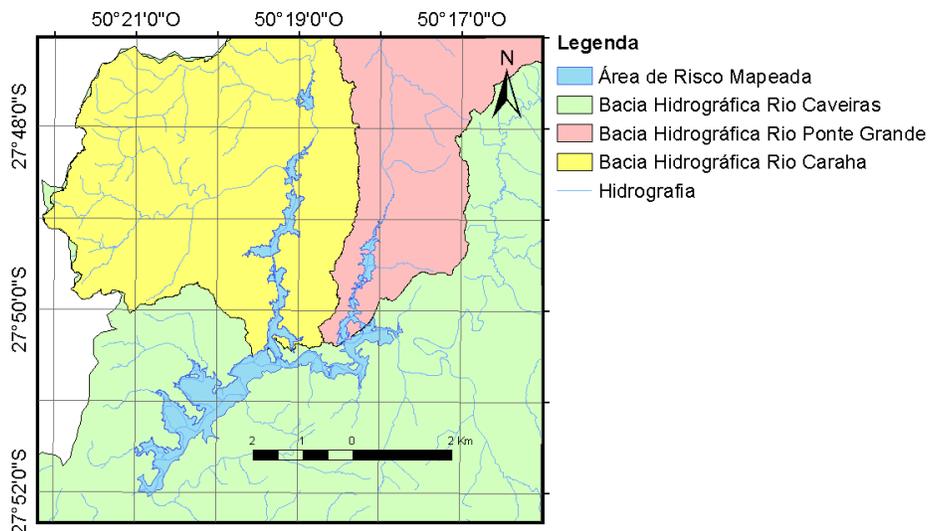


Figura 5 - Mapa da área de risco de inundações em Lages.

O mapa de riscos sugere haver influência do rio Caveiras na formação das inundações nos rios Carahá e Ponte Grande. A sinuosidade do rio Caveiras e a ampla faixa inundável são indícios do armazenamento de grandes volumes de água neste local. Contudo, ao se analisar os mapas dos eventos individuais, constata-se que cada evento produziu um mapa diferente. (Figura 6).

A mancha de inundação no evento de 2005 atingiu o trecho único do rio Carahá e o trecho 3 do rio Caveiras. No evento de 2006, o rio Caveiras não registrou inundação, porém os trechos únicos dos rios Carahá e Ponte Grande foram atingidos. No evento de 2011, foram atingidos os trechos conectados dos rios Ponte Grande, Caveiras e Carahá. Apesar do evento de 2005 apresentar uma área de alagamento aparentemente maior junto ao rio Caveiras, o evento de 2011 foi o que apresentou maiores chuvas registradas nas estações Lages e Paineel.

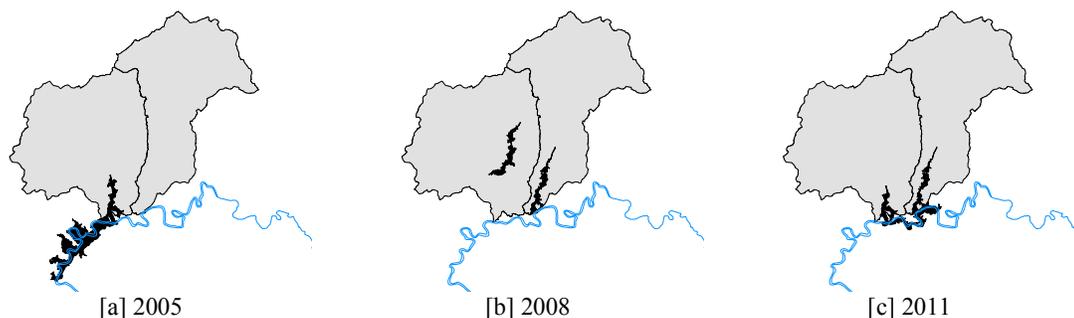


Figura 6 – Mapas das inundações dos eventos de 2005, 2008 e 2011 em Lages (SC). (Fonte: Prefeitura Municipal de Lages).

A configuração das três manchas de inundações indica que o padrão dos alagamentos pode variar, o que deve estar associado com a distribuição espacial da chuva. O evento de 2008 sugere que a chuva se concentrou nas bacias dos rios Carahá e Ponte Grande. Os eventos de 2005 e 2011 sugerem que a chuva distribuiu-se na área de captação do terço superior da bacia do rio Caveiras. A Figura 6 [b] mostra que o rio Caveiras não participou do processo de inundação, o que pode ser um indicativo de que o sistema climático posicionou chuvas concentradas apenas nas bacias dos rios Carahá e Ponte Grande. Por outro lado, as figuras 6[a] e 6[c] mostram a participação do rio Caveiras na formação das áreas alagadas, com ou sem a participação do seu afluente Ponte Grande. Estas constatações recomendam a necessidade de monitoramento contínuo das chuvas na área de contribuição do rio Caveiras, uma vez que sobre as bacias dos rios Carahá e Ponte Grande já existem 6 pluviômetros automáticos cedido à Defesa Civil Municipal pelo CEMADEN.

Modelagem hidráulica

A estrutura geométrica da área de alagamento resultou em cinco trechos de canais, com extensões variando de 2,3 a 4,9km (Tabela 1). Estes trechos foram interceptados por 1468 perfis transversais. As alturas acumuladas de chuvas de 1 dia das estações Lages (109,6mm) e Paineel (100,8mm) do dia 30/08/2011 produziram vazões de entrada de $175 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no trecho Carahá, $157 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no trecho Ponte Grande e de $1850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no primeiro trecho do rio Caveiras. As vazões de entrada nos trechos 2 e 3 do rio Caveiras foram definidas considerando o acúmulo das vazões a montante dos trechos.

O Tempo de Retorno (TR) medido em anos para as chuvas utilizadas na modelagem foi calculado pelo método de Gumbel descrito por (ASSIS et al., 1996). Os valores obtidos foram de 9,12 anos para o evento de 109,6mm e 5,62 anos para o evento 100,8mm. As séries históricas utilizadas neste cálculo abrangeram os períodos de 1941 a 2014, para a estação de Lages, e de 1958 a 2014, para a estação de Paineel. Para a estação de Lages, chuvas com TR de 200 e 400 anos corresponderiam a alturas de 170mm e 183,3mm, respectivamente. O maior evento de chuva de 1 dia registrado nas séries históricas foram de 177mm (TR=287,7) para estação de Lages, e 134,2mm (TR=28,3) para a estação de Paineel.

As vazões estimadas para os trechos (Tabela 1) mostraram-se superdimensionadas quando se compara o mapa simulado pelo modelo (Figura 7) com o mapa de 2011 (Figura 6 [c]). A principal causa para esta disparidade provavelmente está no método utilizado para estimar a vazão de escoamento superficial. O Método Racional pressupõe que a chuva se distribui uniformemente na bacia e que o escoamento superficial é dependente de um coeficiente de escoamento médio. Para as bacias dos rios Carahá e Ponte Grande adotou-se um coeficiente de escoamento superficial de 0,4, compatível para áreas urbanas. Estas bacias são bastante antropizadas e impermeabilizadas (RAFAELI NETO & CORDEIRO, 2015). No caso da bacia do rio Caveiras, considerou-se um coeficiente de escoamento superficial igual a 0,28 devido a esta bacia possuir cobertura vegetal predominante (RAFAELI NETO et. al., 2013).

Tabela 1 – Vazões de entrada nos canais dos rios Carahá, Ponte Grande e Caveiras.

Canal/Rio	Área Bacia (km ²)	Trecho	Extensão (m)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Trechos Contribuintes	C
Carahá	30	1	4.920	175	T1 (Carahá)	0,40
Ponte Grande	27	1	3.645	157	T1 (Ponte Grande)	0,40
Caveiras	493	1	2.302	1850	T1 (Caveiras)	0,28
		2	3.643	2007	T1 (Caveiras) + T1 (Ponte Grande)	0,28
		3	4.915	2182	T1 (Caveiras) + T1 (Ponte Grande) + T1 (Carahá)	0,28

Por outro lado, a semelhança perceptível do mapa da área de riscos de inundações e o mapa da inundação simulada pelo modelo *HEC-RAS* indica que o modelo é capaz de reproduzir a área inundável. Esta constatação está evidente no trecho do rio Ponte Grande e nos três trechos do rio Caveiras. O trecho único do rio Ponte Grande evidencia a precisão do modelo na estimativa da área inundada, assim como o modelo apresenta evidências claras de que o complexo de inundação se estende também ao trecho 3 do rio Caveiras.

Quanto ao rio Carahá, o modelo não reproduziu a área inundável na sua foz com o rio Caveiras. A causa disto possivelmente está na geometria das seções transversais que ali foram colocadas. O rio Carahá foi alterado por um canal lateral construído para extravasar o excesso de água para o rio Caveiras. Esta obra alterou a geometria natural do sistema Carahá-Caveiras tornando-o mais complexo em relação ao seu estado natural. Pretende-se pesquisar em trabalhos futuros novas geometrias da área inundável naquele local, com novas configurações das sessões transversais, a fim de melhorar a modelagem. A falta de continuidade da área inundável no exutório do rio Carahá junto ao rio Caveiras, apresentada pelo modelo, é também a provável causa das áreas de inundação do rio Carahá estarem concentradas a montante do seu exutório.

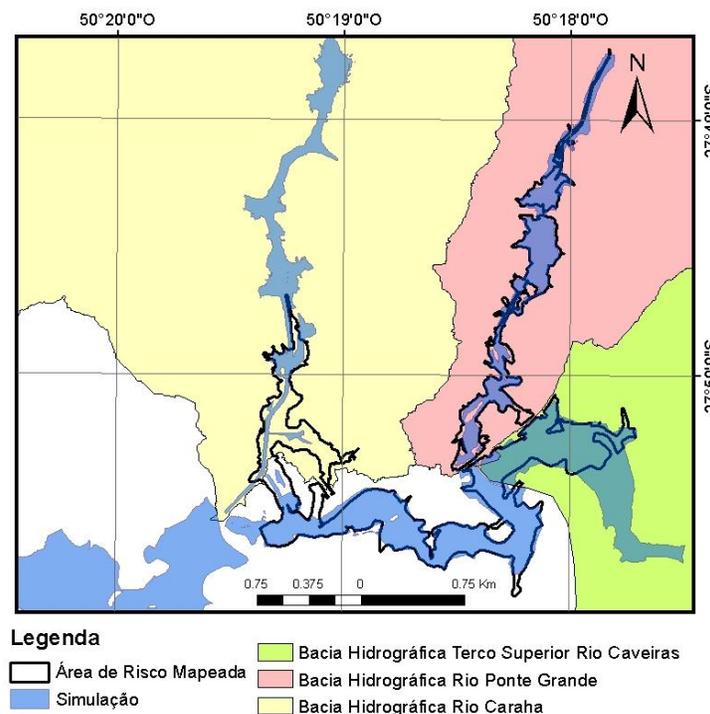


Figura 7 – Mapa da área de risco e da área de inundação simulada pelo modelo *HEC-RAS* em Lages (SC).

Os coeficientes de *Manning* foram estabelecidos com base no Manual do Usuário do aplicativo *HEC-RAS*. A rigor, estes coeficientes devem ser aprimorados através da incorporação de um mapa de uso e ocupação do solo. Este mapa será construído em trabalhos futuros a partir de ortofotos digitais na escala 1:10.000 (SDS, 2013).

CONCLUSÃO

O modelo *HEC-RAS* apontou que as inundações em Lages estão condicionadas ao complexo hidráulico dos rios Carahá, Ponte Grande e Caveiras. Houve evidências de que estes eventos apresentam dependência das chuvas e sua distribuição espacial.

Recomenda-se para trabalhos futuros a melhoria da geometria espacial da foz do rio Carahá no rio Caveiras, a ponderação regional das chuvas, incluindo novas estações pluviométricas, a medição de vazões em eventos extremos de chuvas, a inclusão de mapa de uso e ocupação do solo na área inundável e a utilização de modelo hidrológico para estimativas mais acuradas das vazões nos trechos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>>. Acesso em: 18 agosto 2015
2. ASSIS, F. N., et al, 1996. *Aplicações de Estatística à Climatologia*. Ed. Universitária, UFPEL, Pelotas, RS.
3. COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p.
4. FRANÇA, B. T.; RIBEIRO, C. B. M. Modelagem hidrológica e hidráulica para mapeamento de áreas de risco de inundações urbanas na bacia hidrográfica do rio pomba. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, 11, 2013, Bento Gonçalves, RS. Anais. Porto Alegre, 2013.
5. MAGALHÃES, L. F. O; MONTE, B. M. O; FRAGOSO JÚNIOR, R. C.; Costa, D. Calibração de um modelo hidráulico para zoneamento de manchas de inundação no município de Rio Largo/AL. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, 11, 2013, Bento Gonçalves, RS. Anais. Porto Alegre, 2013. RAFAELI NETO, S. L. R. Um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundações. Tese (Doutorado em Engenharia – Escola Politécnica da USP). Universidade de São Paulo, 2000.
6. RAFAELI NETO, S. L. R., BECEGATO, V. A. CABRAL, J. B. P. Monitoramento da qualidade da água do rio caveiras no planalto serrano de santa catarina com suporte de tecnologias de geomática. Boletim Goiano de Geografia (Online). Goiânia, v. 33, n. 1, p. 27-46./jan/abr. 2013.
7. RAFAELI NETO, S. L.; CORDEIRO, M. T. A. Análise do comportamento de sistemas urbanos por meio de componentes de sistemas hidrológicos. GEOUSP: Espaço e Tempo (Online), [S.l.], v. 19, n. 1, p. 142-155, abr. 2015. ISSN 2179-0892. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/99771>>. Acesso em: 20 Set. 2015.
8. SDS - SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: ENGEMAP, 2013. Documento Digital.
9. US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). HEC-RAS: River analysis system: User's Manual. USACE, Davis: 351 p, 2010.
10. US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). HEC-GeoRAS: GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGIS. User's Manual USACE, Davis: 242 p, 2012.