

Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundações

Recebido: 20/10/12
revisado: 12/05/13
aceito: 06/01/14

Leonardo Romero Monteiro
Masato Kobiyama

RESUMO: O Brasil tem sofrido com a ocorrência de diversos de desastres naturais, principalmente as inundações. O Decreto Nº 7.257 de Agosto de 2010, considera as ações de prevenção de desastres naturais por meio da identificação, mapeamento e monitoramento de risco, perigo e vulnerabilidades. O presente trabalho propõe uma metodologia para mapear áreas de perigo a inundações, apresentando um estudo de caso na Bacia do Braço do Baú, localizada no município de Ilhota/SC. A metodologia consiste na criação da precipitação de projeto e na utilização da modelagem hidrológica e hidrodinâmica. Para mapear as áreas de perigo é utilizado o Índice de Perigo, função da profundidade da lámina de água e da velocidade de escoamento. Por fim, é criado um mapa de perigo de inundações baseado em três mapas de inundações de 5, 20 e 100 anos de período de retorno.

PALAVRAS-CHAVE: Mapa de Perigo; Modelagem; Inundação

ABSTRACT: Brazil has been suffering from several natural disasters, especially floods. Decree No. 7,257 of August 2010, considers the natural disaster prevention actions by identifying, mapping and risk, hazard and vulnerability monitoring. The present paper proposes a methodology to map flood hazard areas, presenting a case study in Braço do Baú basin, located in Ilhota city, Santa Catarina state. The methodology consists in creating a storm design and using hydrological and hydrodynamic modeling. For mapping the hazard areas, a hazard index which is a function only of the water depth and flow velocity is used. Finally, a flood hazard map is created based on three flood maps of 5, 20 and 100 return period years.

KEY WORDS: Flood Hazard Mapping Proposal

INTRODUÇÃO

Entre 1999 e 2008, no Brasil, ocorreram pelo menos 49 grandes episódios de desastres naturais, totalizando 5,2 milhões de pessoas atingidas, 1.168 óbitos e um prejuízo econômico de US\$ 3,5 bilhões (EM-DAT, 2011). Dois episódios recentes no país foram as tragédias nos estados de Santa Catarina na Bacia do Itajaí em 2008 (FRANK; SEVEGNANI, 2009) e no Rio de Janeiro, em sua Região Serrana, no início de 2011 (FREITAS et al., 2012). Através da análise do banco de dados do *Emergency Disasters Data Base* (EM-DAT), pode-se observar que o desastre natural mais relevante no Brasil é o de inundações, responsável por mais de 60% dos mortos e das perdas patrimoniais entre os anos de 1982 e 2010, em relação a todos os desastres naturais.

No Brasil não existe nenhum programa sistemático de controle de enchentes que envolva seus diferentes aspectos. O que se observa são ações isoladas. (TUCCI; BERTONI, 2003). O Decreto

Nº 7.257 de Agosto de 2010, considera as ações de prevenção de desastres naturais por meio da identificação, mapeamento e monitoramento de riscos, perigos e vulnerabilidade locais. Com isso, torna-se clara a necessidade da criação de mapas de perigo em âmbito nacional.

Na bacia do rio Itajaí-Açu, na década de 80, foi desenvolvido pela CPRM para o DNAEE um estudo de mapeamento das áreas de inundações em nove cidades da região que poderiam orientar o zoneamento. No entanto, não houve interesse das cidades no desenvolvimento de medidas não-estruturais (TUCCI; BERTONI, 2003). Nas décadas de 70 e 90, ainda para esta região, foram construídas três barragens de controle de enchentes. Porém, como visto em 2008, elas não foram suficientes para evitar os desastres naturais que provocaram inúmeras perdas. Desta forma, torna-se evidente a necessidade da adoção de medidas não-estruturais.

O zoneamento propriamente dito é a definição de um conjunto de regras para a ocupação das áreas

de risco de inundações, visando à minimização futura das perdas materiais e humanas em face das grandes cheias (TUCCI, 2007). De acordo com Goerl et al. (2012), o risco é usualmente definido como função do perigo e da vulnerabilidade. Assim sendo, o risco representa a suscetibilidade de uma comunidade de sofrer danos ou perdas devido a um perigo.

Existe uma diferenciação entre mapa de inundações, mapa de perigo de inundações e mapa de risco de inundações. O mapa de inundações consiste na limitação das áreas inundadas com a altura da lâmina de água. Este está atrelado a um único período de retorno. De acordo com de Moel et al. (2009), o mapa de perigo de inundações contém informações sobre a probabilidade e/ou magnitude de um evento, enquanto o mapa de risco contém informações adicionais sobre as consequências (danos econômicos, número de pessoas afetadas). Neste sentido, os mapas de inundações são utilizados para a criação do mapa de perigo de inundações que, junto com fatores de vulnerabilidade, é utilizado para criar o mapa de risco de inundações.

Mesmo existindo inúmeros modelos hidráulico-hidrológicos, não há uma metodologia brasileira para padronizar o mapeamento de perigo a inundações, visto que este fornece informações valiosas e claras para gestão urbana. O desenvolvimento da pesquisa em desastres naturais no Brasil ainda é tímido, mas tem ganhado destaque nos últimos anos.

Desta forma, os objetivos do presente trabalho são (i) propor uma metodologia para o mapeamento

de perigo de inundações, utilizando, em grande parte, dados disponíveis nacionalmente, e (ii) demonstrar a aplicabilidade dessa metodologia por meio de um estudo de caso bacia do Braço do Baú, no município de Ilhota – SC.

METODOLOGIA PROPOSTA

A Figura 1 mostra as etapas do mapeamento de perigo de inundações através da metodologia proposta.

Processos principais

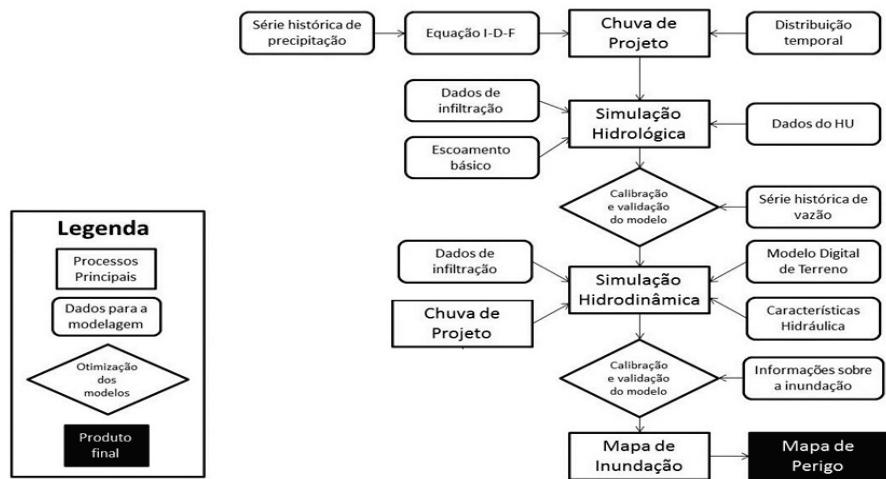
Os *processos principais* são a parte vital desta metodologia. Pode-se entender que eles são a coluna vertebral metodológica, pois ligam todos os processos físicos com o banco de dados para se obter o resultado final. Os outros itens garantem o bom funcionamento destes processos.

Precipitação de projeto

Pode-se estimar uma precipitação hipotética provável para uma área de estudo. Para se esta precipitação são necessárias a equação i-d-f e a distribuição temporal da precipitação. Outra informação que pode auxiliar nesta tarefa é a distribuição espacial da precipitação.

Equação i-d-f: Na criação do mapa de perigo, são utilizados os períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos. O tempo da duração da precipitação deve ser o tempo de duração crítica, ou seja, o tempo de precipitação que causará a maior vazão de pico. A duração

FIGURA 1.
Etapas do
mapeamento
de perigo de
inundações
através da
metodologia
proposta.



crítica é o tempo ideal em que a intensidade, em uma Equação i-d-f, é elevada e a área de contribuição da bacia também é grande.

Visto que a Equação i-d-f é um método concentrado, aconselha-se utilizar mais do que uma quando se trabalha com bacias grandes e existe banco de dados para isso.

Distribuição temporal: Loukas (2002) comentou sobre a importância da variação temporal da precipitação e aplicou análises estatísticas realizando comparações entre os dados observados para estimar a distribuição temporal. Monteiro & Kobiyama (2011) afirmaram que quanto mais tardar o pico do histograma ocorrer, maior será a vazão de pico que este produzirá e, consequentemente, maior será a importância em inundações. A partir desta consideração, os autores adotaram o quarto quartil do Método de Huff que representa a distribuição temporal da precipitação com o pico de intensidade mais tardio. Caso exista algum estudo de distribuição temporal na área de estudo em questão este deve ser utilizado primordialmente.

Modelagem Matemática

A modelagem matemática é realizada através de simulações hidrológicas e hidrodinâmicas. Para isso, a bacia de estudo deve ser dividida em: sub-bacias de contribuição (BCs) e área inundável (AI). As simulações hidrológicas são realizadas para as BCs e as hidrodinâmicas para a AI.

As BCs são diferenciadas da AI pelo elevado potencial de inundações que a segunda possui. Isto ocorre por causa da grande declividade média dos rios principais das BCs e por estas serem bacias de cabeceira. Como auxílio para esta diferenciação, deve-se realizar visitas de campo e obter informações em entrevistas com moradores.

As áreas que constituírem o mapa de inundações não podem ser consideradas como BCs. Os mapas de perigo são confeccionados apenas para a AI, visto que não há necessidade deste estudo nas BCs. Independentemente do modelo matemático a ser utilizado, este deve ser sempre calibrado e validado para o local e condições do problema.

Simulação hidrológica: Qualquer modelo hidrológico de precipitação-vazão pode ser utilizado para esta metodologia, desde que ele seja adequado para a bacia de estudo. Aconselha-se utilizar modelos de levar em consideração as características de infiltração, de escoamento superficial e de escoamento básico.

As limitações dos modelos hidrológicos estão principalmente relacionadas ao tamanho da bacia simulada.

Simulação hidrodinâmica: A simulação hidrodinâmica é responsável pela interação das propriedades topográficas, com as propriedades hidrológicas e hidráulicas. Aconselha-se utilizar modelos bidimensionais ou tridimensionais, visto que mapas de inundações são criados, necessitando assim da simulação do escoamento em no mínimo duas direções, característica que os modelos unidimensionais não reproduzem com exatidão. No uso de modelo bidimensional ou tridimensional em grandes áreas aconselha-se a simulação em computadores com bom processamento

Mapeamento de Inundação

O mapa de inundações pode ser criado de duas maneiras diferentes, através da confecção de uma mancha de inundações a partir de dados observados da inundações ou através da modelagem hidrodinâmica.

O primeiro método fornece um mapa com mais exatidão, porém é de difícil criação, pois os dados precisam ser adquiridos em pleno evento de inundações (GIGLIO; KOBIYAMA, 2011). Ainda, pode-se recuperar os dados das inundações através de registros deste evento, ou seja, além da coleta em campo, estes dados também podem ser recuperados através de fotografias, vídeos, jornais ou declaração de pessoas presentes no evento. Outro ponto negativo deste método é a inflexibilidade em criar mapas com períodos de retorno pré-estabelecidos.

No segundo método, referente à modelagem hidrodinâmica, utiliza-se modelos físicos ou matemáticos para a criação dos mapas de inundações. Na metodologia proposta pelo presente trabalho, este mapa é resultado da modelagem hidrodinâmica. De qualquer forma, para a calibração e validação do modelo hidrodinâmico, é recomendada a utilização das cotas do evento de inundações.

O mapa de inundações sempre está relacionado a um período de retorno que é utilizado diretamente na confecção do mapa de perigo. A qualidade do mapa depende da qualidade dos procedimentos que o antecedem, e é muito sensível ao modelo digital de terreno.

Dados para modelagem

Os dados de entrada na modelagem podem ser adquiridos de formas distintas. No presente trabalho os dados foram separados em dados de campo, dados

calculados e dados adquiridos (Tabela 1). Os dados de campo possuem maior confiabilidade, porém quando difíceis ou impossíveis de serem adquiridos, torna-se necessário utilizar os dados calculados ou adquiridos.

Otimização dos modelos

As técnicas de otimização são utilizadas em diferentes áreas do conhecimento para a busca da melhor solução de uma função matemática sujeita ou não a restrições (TUCCI, 1998). Para a modelagem hidrológica, deve-se escolher qual o principal aspecto do hidrograma a ser aperfeiçoado. Como exemplos de aspectos do hidrograma, encontram-se a vazão de pico, a ascensão, a recessão ou o volume total escoado.

Já, para a modelagem hidrodinâmica dirigida ao estudo de inundação, tornam-se necessários dados de cotas ou limite de algum evento de inundação que possa ser simulado. Através de vídeos, podem-se estimar também a velocidade aparente do escoamento. O objetivo da otimização nesta modelagem é aproximar dados calculados de área, cota ou velocidade aos dados observados.

TABELA 1
**Principais formas com que os dados de modelagem
são adquiridos**

	Dados de campo	Dados obtidos	Dados calculados
Séries históricas de precipitação	X	X	
Equação i-d-f		X	X
Distr.temporal	X	X	X
Dados de infiltração	X	X	X
Escoamento de base	X	X	X
Hidrograma unitário			X
Séries históricas de vazão	X	X	
Modelo digital de terreno*	X	X	X
Características hidráulicas	X	X	X
Informações sobre inundação	X	X	

* O modelo digital de terreno foi um dado calculado através de dados de campo (GPS) e dados obtidos (IBGE).

Mapa de Perigo

O mapa de perigo é o produto final desta proposta metodológica. Para sua criação é necessário quantificar este perigo, pois existem diferentes níveis de perigo que podem causar diferentes tipos de dano (Tabela 2).

PRENEVE (2001) propôs uma caracterização do mapa de perigo de inundação que estabelece três zonas para identificar os diferentes níveis de perigo, que variam com o período de retorno. Desta forma, o mapa de perigo é uma função de frequência de inundação (período de retorno) e intensidade (índice de perigo).

O Índice de Perigo (IP) proposto por Stephenson (2002) é expresso por:

$$P = b \cdot v \quad (1)$$

onde b é a profundidade de inundação em metros; e v é a velocidade do escoamento em m/s. Percebe-se que o IP é expressado pela vazão unitária.

TABELA 2
Níveis de Perigo de Inundação (PREVENE, 2001)

Definição do Perigo de Inundação		
Nível do Perigo	Cor do Mapa	Descrição
Alto (3)	Vermelho	As pessoas estão em perigo, tanto dentro quanto fora de suas casas. As construções estão em alta possibilidade de serem destruídas.
Médio (2)	Laranja	As pessoas correm possibilidade de fatalidades fora de suas casas. Construções talvez sofram danos e podem ser destruídas.
Baixo (1)	Amarelo	A possibilidade de fatalidades é baixa ou inexistente. Construções podem sofrer danos.

Este índice está ligado diretamente à energia do escoamento, ou seja, ao seu potencial destrutivo. O IP foi inicialmente criado para indicar qual o local mais adequado para o desenvolvimento urbano. Usando esse índice, Stephenson (2002) propôs diferentes tipos de perigos (Figura 2), que pode ser relacionado aos níveis apresentados na Tabela 2.

Eventos mais severos, com maior profundidade da lâmina da água e velocidade, ocorrem com menor frequência. Pequenos eventos de inundação são mais frequentes, porém possuem um menor potencial destrutivo. Desta forma, o mapa de perigo de inundação é elaborado como a combinação de intensidade e período de retorno de diversos mapas de inundação.

Os valores do período de retorno podem ser alterados conforme o interesse do estudo. Embora PRENEVE (2001) adotou 10, 100 e 500 anos (Tabela 3 e Figura 3), o presente trabalho adota os períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos para adequar o método à realidade brasileira, onde precipitações com alta intensidade ocorrem com uma frequência elevada.

TABELA 3
PROBABILIDADE DE PERIGO (PREVENE, 2001)

Probabilidade	Período de Retorno (anos)	Probabilidade de Superar
Alta	10	10%
Média	100	1%
Baixa	500	0,2%
Muito Baixa	> 500	< 0,2%

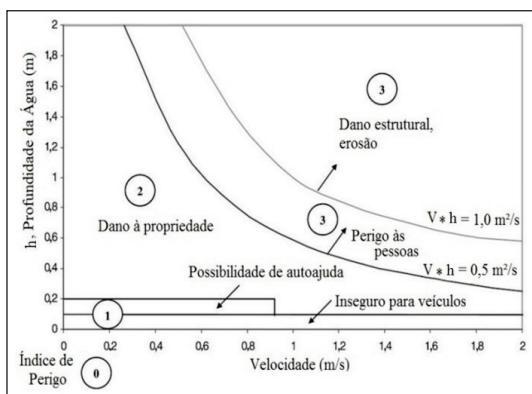


FIGURA 2. Diagrama do perigo de inundação (Adaptado de Stephenson, 2002).

ESTUDO DE CASO

Área de estudo

A área de estudo é composta pela bacia hidrográfica do Braço do Baú (48 km^2), que faz parte do Complexo do Baú e se localiza no município de Ilhota, estado de Santa Catarina. O município possui 12.324 habitantes (IBGE, 2010) e está inteiramente dentro da bacia do Rio Itajaí (Figura 4). Tanto o município como o Rio Itajaí são marcados por um histórico de problemas com inundações.

Os usos do solo da bacia consistem em 50% de mata (capoeira, capoeirão, mata secundária e clímax), 15% de plantação de banana, 13% de capoeirinha, 11% de reflorestamento, 9% cultivo de arroz, 1% de outros cultivos e 1% solo exposto (LIMA et al., 2010). Diversos relatos foram elaborados referenciando os desastres naturais ocorridos no Complexo do Baú em 2008, alguns deles com intuios científicos, como Lima et al. (2010) e Frank e Sevgnani (2009), além de outros com intuito social, por exemplo, Menezes (2009) e Pereira (2009).

Para a aplicação da metodologia a bacia do Braço do Baú foi dividida em 16 BCs e uma AI (Figura 5 e Tabela 4). Por meio de observação em campo e entrevistas com moradores locais, verificou-se quais áreas foram inundadas no evento extremo de 2008. Com um GPS de precisão, coletou-se 12 pontos geográficos onde os moradores informaram ser o limite da inundação de novembro de 2008.

		PROBABILIDADE	ALTA	MÉDIA	BAIXA	MUITO BAIXA	
INTENSIDADE	ALTA	ALTA					perigo baixo ou nulo
		MÉDIA					
	BAIXA						
Perigo Alto (vermelho)							
Perigo Médio (laranja)							
Perigo Pequeno (amarelo)							

FIGURA 3. Níveis de perigo discretizados (PREVENE, 2001).

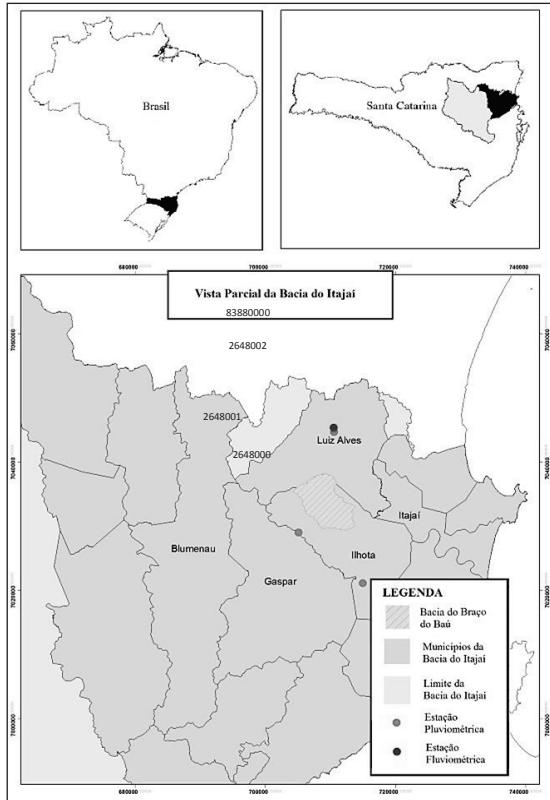


FIGURA 4. Mapa de localização do Complexo do Baú.

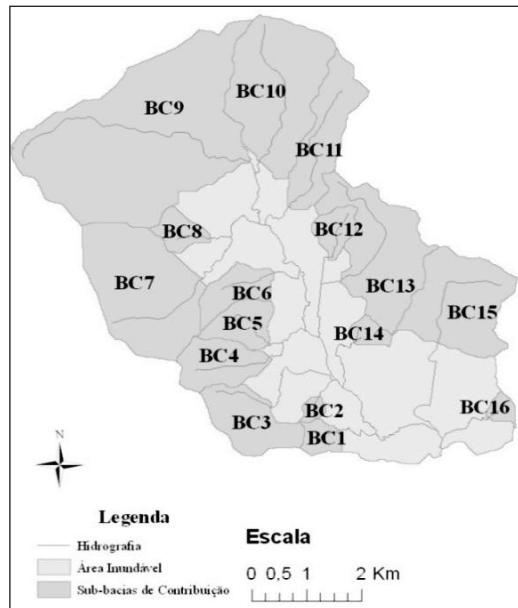


FIGURA 5. Divisão de estudo da bacia do Braço do Baú.

TABELA 4
Características das sub-bacias

Sub-bacias	Área (km ²)	Declividade Rio Principal (%)	Sub-bacias	Área (km ²)	Declividade Rio Principal (%)
BC1	0,40	9,0	BC10	4,12	12,5
BC2	0,16	13,9	BC11	1,96	11,0
BC3	1,56	9,5	BC12	0,55	6,0
BC4	1,25	13,3	BC13	3,28	3,3
BC5	0,87	6,5	BC14	0,30	7,0
BC6	0,89	4,3	BC15	2,95	7,0
BC7	4,20	5,7	BC16	0,23	11,9
BC8	0,53	13,3	AI	14,65	0,4
BC9	9,96	6,0			

Dados Utilizados

Os dados calculados, adquiridos e de campo, utilizados nesse estudo de caso se encontram nas Tabelas 5, 6 e 7, respectivamente.

Precipitação de Projeto

Optou-se em utilizar apenas 2 estações 2648001 e 2648002 para este estudo. Em ambas, falhas foram encontradas nos dados. Todas as falhas destas estações foram preenchidas através do Método da Distância Inversa com estas e 5 estações vizinhas (02648019, 02648024, 0269007, 02649010 e 02748000).

Com as falhas preenchidas criou-se uma única série histórica referente à bacia de estudo com as

estações 02648001 e 02648002 através do Método de Thiessen. Com isso foi elaborada a Equação i-d-f.

A fórmula de Ven te Chow adaptada pela MOPU (1987) foi utilizada para o cálculo do T_c da bacia, levando em conta as considerações de Silveira (2005) sobre as características de bacias para a utilização de fórmulas de T_c . O valor encontrado foi de 6 horas.

Desta forma, simulações foram realizadas acrescentando uma hora ao tempo de duração da precipitação, até que pelo menos o valor de uma das considerações, de volume ou de vazão de pico, fosse menor do que o calculado anteriormente. A duração da precipitação que forneceu a maior vazão de pico foi a de 15 horas. Assim, para o presente trabalho, considerou-se que 15 horas é o tempo de duração crítica da precipitação.

TABELA 5
Informações sobre os dados calculados

Dado	Método
Séries históricas de precipitações ao redor e na bacia de estudo	Método da Distância Invertidas (SINGH, 1992)
Série histórica de precipitação para bacia de estudo	Método de Thiessen (SINGH, 1992)
Precipitação de projeto	Equação de i-d-f (BERNARD, 1932) e Método de Huff (HUFF, 1967)
Tempo de concentração	Fórmula de Ven te Chow (MOPU, 1987)
Coeficiente de armazenamento	Proposição de Dooge (1973)
Vazões das BCs	HEC-HMS 3.5
Número de Deflúvio	USDA (1986) e Uso do solo
Manning	Observações em campo e Proposição de Cowan (1956)
Escoamento de base	Métodos de regionalização de vazão (TUCCI, 1995)

TABELA 6
Informações sobre os dados adquiridos

Dado	Fonte
Séries históricas de precipitação	ANA (2010)
	Estação 2648001
	09/1927 até 12/2006
Série histórica de vazão	Estação 2648002
	01/1941 até 12/2006
Mapa topográfico	ANA (2010)
	Estação 83880000
	04/1929 até 10/2004
Mapa hidrológico	IBGE (2010)
	Gaspar 28823/ Escala 1:50.000
Uso do solo	IBGE (2010)
	Gaspar 28823/ Escala 1:50.000

TABELA 7
Informações sobre os dados de campo

Dado	Equipamento
Perfil hidráulico dos rios	Haste numerada e trena
Escoamento de base	Flowtracker Sontek
Pontos topográficos	GPS diferencial Trimble

Modelo Hidrológico

Para a modelagem hidrológica utilizou-se o *software* HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) desenvolvido por USACE-HEC (2000). Este programa é gratuito e está disponível em <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

O HEC-HMS simula processos de precipitação-vazão de sistemas de bacias hidrográficas dendríticas, e pode ser aplicado em uma ampla variedade de áreas geográficas (USACE-HEC, 2010).

A modelagem hidrológica foi realizada utilizando os modelos e os parâmetros referenciados na Tabela 8. O Número de Deflúvio (CN) foi obtido através do auxílio dos estudos de Lima et al. (2010) que realizaram a discriminação do uso do solo para a área do Braço do Baú.

TABELA 8
Estrutura do HEC-HMS

Modelo	Método	Parâmetros
Perdas de Precipitação	Modelo da Retenção Potencial Máxima - SCS Curve Number	Precipitação de projeto; Número de Deflúvio; Perdas Iniciais; Áreas impenetráveis
Transformação do Escoamento Superficial	Método do Hidrograma Unitário de Clark	Precipitação efetiva; Área da bacia; Tempo de concentração; Coeficiente de armazenamento
Escoamento de base	Constante Mensalmente	Vazão do escoamento de base mensal

O escoamento de base foi obtidos através do Método de Regionalização de Vazões proposto por Tucci et al. (1995) utilizando a bacia vizinha, de Luiz Alves.

A calibração e validação foram realizadas apenas para a bacia de Luiz Alves, a qual teve seus parâmetros de entrada calculados de forma semelhante do que a bacia de estudo. Esta medida foi necessária, porque apenas esta bacia possuía dados de vazões observadas. Foram alterados na calibração somente os parâmetros do modelo de perda, pois os valores destes parâmetros foram considerados iguais para todas as sub-bacias.

Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico escolhido foi o FLO-2D, proposto por O'Brien et al. (1993). Este modelo é uma efetiva ferramenta para delimitar perigo de inundação e determinar formas de minimizar inundações. Diversos hidrogramas podem ser adicionados para a mesma simulação, sendo eles referentes ao canal ou à planície de inundação (FLO-2D SOFTWARE INC., 2009).

FLO-2D é um modelo de conservação de volume. Ele transporta o volume da inundação dividido em uma série de grids para o escoamento superficial ou através de segmentos de canais. A progressão de uma onda de cheia sobre o fluxo dominante é controlada pela topografia e resistência ao fluxo. (FLO-2D SOFTWARE INC., 2009).

Nesta etapa, os parâmetros de entrada foram: os pontos de elevação retirados do mapa topográfico e aperfeiçoados com pontos coletados em campo; as informações hidrográficas como perfis transversais e longitudinais dos rios; as informações dos hidrogramas das sub-bacias obtidos através da modelagem hidrológica; as próprias precipitações que causaram estas vazões; as informações referentes ao uso do solo e seu nível de saturação; e o coeficiente de Manning do canal e da planície de inundação. O método adotado para estimar a infiltração foi o Modelo da Retenção Potencial Máxima, igual ao caso da modelagem hidrológica.

Para a modelagem 2D sempre é necessário criar as condições de contorno. Também é necessário definir o tamanho do grid que está diretamente relacionado à escala do mapa topográfico. Pode-se definir o tamanho do grid como o tamanho mínimo do pixel do mapa topográfico utilizado. Para mapas com escala de 1:50.000 é aconselhado utilizar pixels mínimos de 20 metros, ou seja, 400 m² (CASTAÑON, 2003). Detalhes como pontes, estradas e construções foram desconsiderados.

Os parâmetros variados na calibração foram o número de Manning e o perfil transversal dos canais. Nas entrevistas, diversos moradores afirmaram que, na inundação de 2008, praticamente todos os rios foram assoreados devido à ocorrência de inúmeros escorregamentos. Desta forma, foram realizadas simulações com os perfis transversais dos rios e sem eles, somente utilizando os talvegues topográficos.

Mapa de perigo

Para mapear as áreas de perigo foram utilizados o Índice de Perigo proposto por Stephenson (2002)

e as considerações de PREVENE (2001). O perigo da inundação é função da profundidade da lâmina de água e de sua velocidade. O mapa de perigo foi criado para os períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos. A intensidade (Índice de Perigo) é de 0,1 a 0,5 m²/s para a baixa, 0,5 a 1,0 m²/s para a média e mais do que 1,0 m²/s para a alta.

Resultados e Discussões do Estudo de Caso

Hidrogramas de Contribuição para uma Área Inundável

A equação i-d-f gerada para calcular precipitações intensas é:

$$i = \frac{863,92 \cdot TR^{0,191}}{(10,3 + t)^{0,745}} \quad (2)$$

Na calibração do modelo hidrológico se deu prioridade para a minimização dos erros relacionados à ascensão e ao pico dos hidrogramas.

Para analisar a variação dos hidrogramas com os diferentes períodos de retorno, apenas três sub-bacias representativas do conjunto total foram contempladas, isto é, BC2, BC9 e BC11, pois BC2 é a menor sub-bacia, BC9 é a maior sub-bacia e BC11 é uma sub-bacia com área mediana. Foram verificadas as variações dos resultados em função dos diferentes períodos de retorno. Os itens analisados foram o volume total do hidrograma e a vazão de pico (Tabelas 9 e 10). Através destas comparações, identifica-se como principal ponto a grande variação do volume total e da vazão de pico, sendo que estes dois itens possuem variação muito parecida, cerca de 150%.

Identificação, Detalhamento e Comparação das Áreas Inundadas

O FLO-2D foi calibrado a partir do evento extremo de novembro de 2008. A mancha de inundação que melhor se ajustou aos pontos coletados foi a produzida pela simulação sem os perfis transversais, a qual foi utilizada para a criação dos mapas de inundação.

As áreas inundadas foram identificadas e detalhadas através da ferramenta FLO-2D Mapper, que faz parte do pacote do próprio software FLO-2D. Para uma área ser considerada inundada é necessário que em algum momento da simulação do modelo

21

TABELA 9
Comparação dos volumes totais

	Período de Retorno (anos)				Diferença de 5 a 100 anos do volume total
	5	20	50	100	
BC2 (m ³)	13	19	25	31	138%
BC9 (m ³)	326	488	642	788	142%
BC11 (m ³)	63	94	125	154	144%

TABELA 10
Comparação das vazões de pico

	Período de Retorno (anos)				Diferença de 5 a 100 anos da vazão de pico
	5	20	50	100	
BC2 (m ³ /s)	0,4	0,6	0,9	1,1	175%
BC9 (m ³ /s)	16,7	26,3	35,2	43,7	162%
BC11 (m ³ /s)	4,4	6,9	9,2	11,4	159%

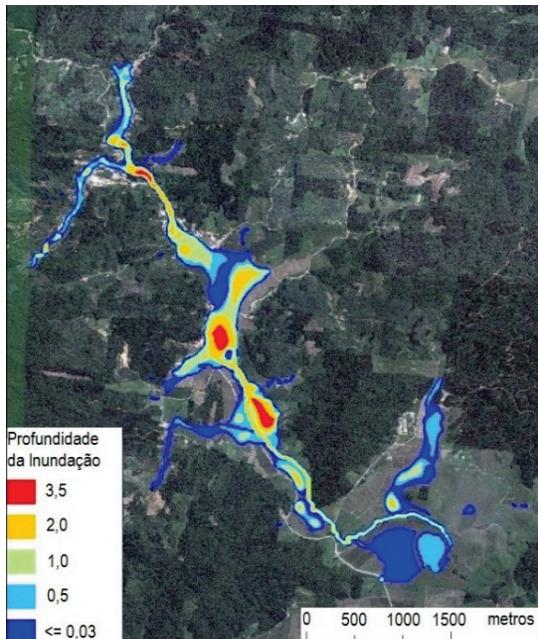


FIGURA 6. Mapa de Inundação - Período de Retorno de 5 anos.

TABELA 11
Comparação para os períodos de retorno

Período de Retorno	Área Máxima Inundada (AMI)	Volume Máximo de Inundação (VMI)	Dif. para AMI de TR 5	Dif. para VMI de TR 5
anos	km ²	m ³	%	%
5	2,89	1.572.112	-	-
20	3,08	2.191.556	7	39
50	3,21	2.698.792	11	72
100	3,31	3.147.212	14	100

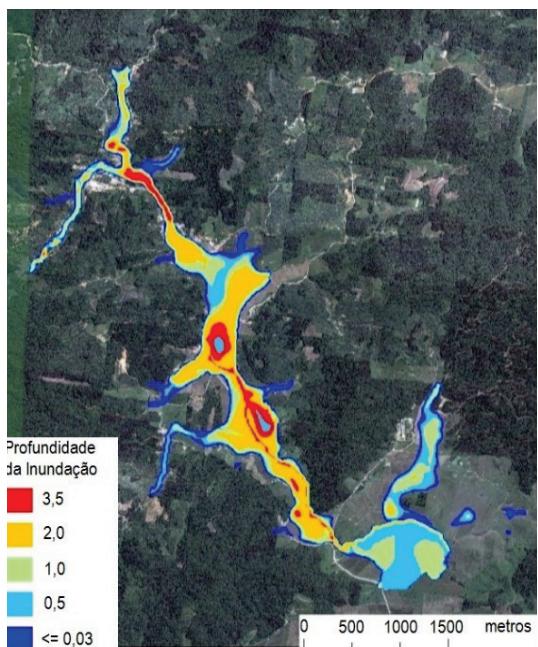


FIGURA 8. Mapa de Inundação - Período de Retorno de 100 anos.

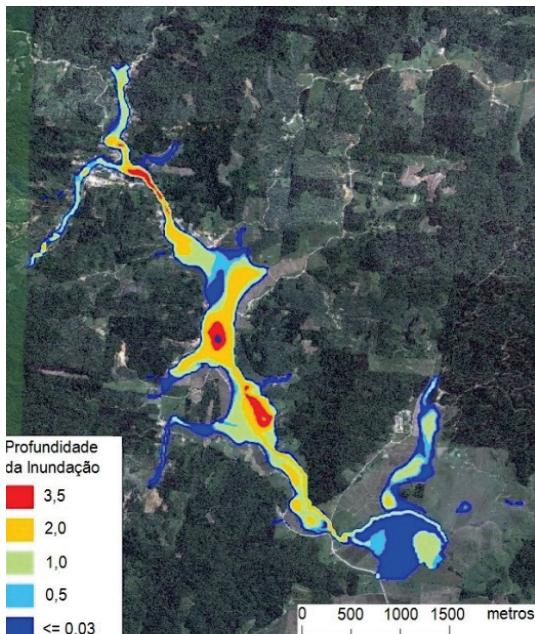


FIGURA 7. Mapa de Inundação - Período de Retorno de 20 anos.

Nota-se a pequena variação da área inundada e a elevada variação do volume de inundação. Observando apenas a área inundada, as vazões das sub-bacias em função do período de retorno, não demonstram grande importância para as inundações. Porém, em relação ao volume, esta hipótese é desmentida. Uma das justificativas para este comportamento distinto de ambos os parâmetros é a característica geomorfológica na própria bacia. Esta bacia possui muitas áreas declivosas, criando uma forma encaixada na região de inundação.

Mapeamento das Áreas de Perigo de Inundação

O mapa de perigo, produto final, foi criado com o auxílio da ferramenta Mapper FLO2-D e com os mapas de inundação de tempos de retorno de 5, 20 e 100 anos (Figura 9). Os níveis de perigo são identificados da seguinte maneira: 3 para Perigo Alto (vermelho); 2 para Perigo Médio (laranja); 1 para Perigo Pequeno (amarelo) e 0 para Perigo Inexistente (sem cor).

Foi observado na Figura 9 que as BC1, BC2, BC5, BC6, BC8, BC12, BC14 e BC16 possuem participação pequena na área do mapeamento de perigo. Estas

sub-bacias possuem vazão de pico menor do que 2 m³/s para o período de retorno de 5 anos e menor do que 5 m³/s para o período de retorno de 100 anos. A consideração da baixa importância dessas sub-bacias despreza o efeito da sinergia das vazões de contribuição.

Para a localização de vias de transporte não se deve adotar nenhum perigo como aceitável, pois em casos de desastres naturais estas devem estar sempre acessíveis para a evacuação de pessoas. As obras de importância pública, como hospitais e escolas, devem ser localizadas em locais onde existe no máximo o perigo baixo. Obras, como parques para lazer, que são utilizadas apenas quando não existe ocorrência da precipitação, podem ser construídas aceitando o perigo alto, desde que após um evento de inundação estes locais sejam reconstituídos. As demais obras devem ser realizadas aceitando o perigo médio, mas sempre tentando reduzir este ao máximo.

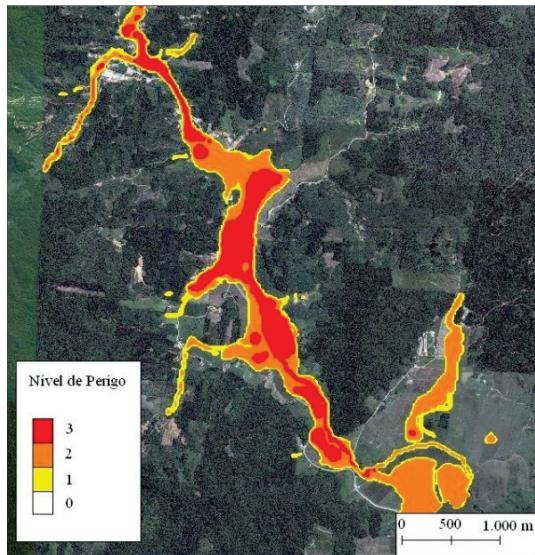


FIGURA 9. Mapa de Perigo de Inundação.

Com base nessas considerações, as vias de transporte estão em situação precária, pois possuem partes com o nível de perigo 3. Algumas residências estão localizadas em áreas com nível de perigo 2 e 3. De uma forma geral, a localidade possui poucas construções em áreas indevidas, mas isso se deve por ser uma bacia rural.

A Tabela 12 mostra a área de cada categoria para cada período de retorno. De acordo com Kobiyama et al. (2010) as áreas de proteção permanente (APP)

em Santa Catarina deveriam possuir de 20 a 30 metros a partir da margem dos rios. As APPs estão dentro das áreas de inundação. Assim, as APPs devem ser preservadas devido à segurança humana (Figura 10).

TABELA 12
Áreas de perigo para as diferentes categorias

Categoría	0	1	2	3	Total
Área (km ²)	45,65	0,11	1,52	0,72	48,00
	95%	0%	3%	2%	100%

23

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho propôs uma metodologia para o mapeamento de perigo de inundação e aplicou-a para a Bacia do Braço do Baú, no município de Ilhota – SC, como estudo de caso. A metodologia consiste em: determinar a equação de precipitações intensas, gerar hidrogramas de contribuição para a área inundável delimitada, detalhar a área inundável e então estruturar um mapa de perigo em função de diferentes períodos de retorno de precipitação. Nesta metodologia, é necessário realizar a modelagem hidrológica e hidrodinâmica. Para isso, foram utilizados os modelos HEC-HMS e FLO-2D, respectivamente.

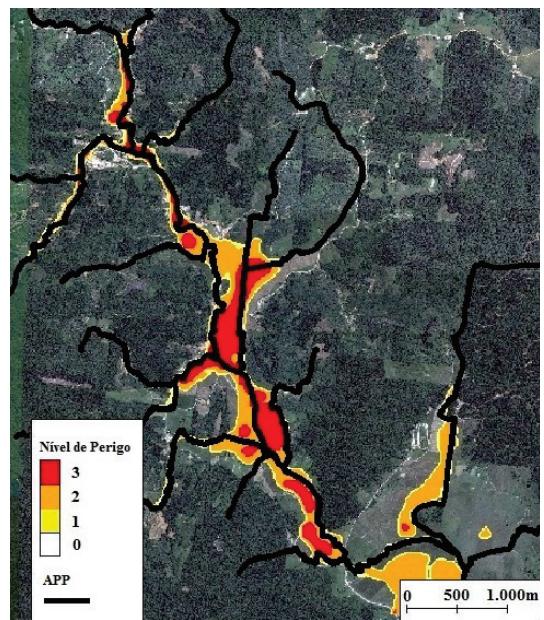


FIGURA 10. Mapa de Perigo de Inundação e das áreas de proteção permanente (APP).

Os hidrogramas gerados tiveram uma variação do volume total e da vazão de pico de cerca de 150% na comparação das precipitações com TR de 5 e 100 anos para as mesmas sub-bacias. Também considerando a comparação das precipitações com TR de 5 e 100 anos, a variação da AMI foi de 14% e a variação do VMI de 100% de 5 a 100 anos. Ou seja, a variação da profundidade da lâmina de água foi mais expressiva do que a da área inundada.

A profundidade da água não é o único fator que oferece riscos para a vida das pessoas. De acordo com Stephenson (2002), a velocidade também fornece potencial destrutivo da inundação.

As vias de transporte estão em situação precária, próximas ao rio. Algumas residências estão locali-

zadas em áreas com nível de perigo 2 e 3. De uma forma geral, a localidade possui poucas construções em áreas indevidas, mas isso se deve por ser uma área rural. As áreas de proteção permanente (APP) coincidem com as áreas de inundação. Assim, as APPs devem ser preservadas devido à segurança humana.

AGRADECIMENTO

O presente trabalho faz parte do projeto “Análise e Mapeamento das Áreas de Risco a Movimentos de Massa e Inundações nos Municípios de Gaspar, Ilhota e Luiz Alves (complexo do morro do baú), SC” (209/2009) financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC).

Referências

- ANA – AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Hidroweb. Disponível em [<http://hidroweb.ana.gov.br>], acesso em julho de 2010.
- BERNARD, M. M. Formulas for rainfall intensities of long duration. Trans. Amer. Soc. Civil Eng., 96, 592-606, 617-624, 1932.
- CASTAÑON, C. A. B. Recuperação de imagens por conteúdo através de análise multi-resolução por wavelets. 2003. 84p. Dissertação (mestrado em Ciências da computação e Matemática computacional) – Instituto de Ciências matemáticas e de Computação (ICMC), São Carlos. 2003.
- CHRISTOFOLLETTI, A. Geomorfologia. São Paulo, Edgar Blücher, 2^a edição, 1980.
- COWAN, W. L. Estimating hydraulic roughness coefficients: Agricultural Engineering, 37(7), p. 473-475, 1956
- de MOEL, H., van ALPHEN, J., and AERTS, J. C. J. H.: Flood maps in Europe – methods, availability and use, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 289-301, 2009.
- DOOGE, J. C. I. Linear theory of hydrologic systems. Tech. Bull. Nº 1468. Agricultural Research , U. S. Dept. of Agriculture, Washington, D. C., 1973.
- EM-DAT. The OFDA/CRED International Disaster Database. [on line] <<http://www.em-dat.net/>>. Visitado em 24 de maio. 2011.
- FLO-2D SOFTWARE INC. Reference Manual / GDS Manual / Data Input Manual / Mapper Manual. Tutoriais do modelo FLO-2D. Version 2009. 2009.
- FRANK, B.; SEVEGNANI, L. Desastre de 2008 no Vale do Itajaí. Água, gente e política. Agência de Água do Vale do Itajaí, Blumenau – SC, 192 p., 2009.
- FREITAS, C. M.; CARVALHO, M. L.; XIMENES, E. F.; ARRAES, E. F.; GOMES, J. O. Vulnerabilidade socioambiental, redução de riscos de desastres e construção da resiliência – lições do terremoto no Haiti e das chuvas fortes na Região Serrana, Brasil. Ciência & Saúde Coletiva, 179(6), pp.1577-1586, 2012
- GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de Rio Negrinho. In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (2011:Maceió) Maceió: ABRH, Anais, 17p., 2011.
- GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M.; PELLEIN, J.R.G.M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: Estudo de caso do município de Rio Negrinho - SC. Boletim de Geografia, Maringá, 30(1), pp. 81-100, 2012.
- HUFF, F. A. Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. Water Resources Research, Illinois State Water Survey, Urbana 3(4). pp. 1007-1019, 1967.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades – Gaspar. Disponível em [www.ibge.gov.br], acesso em junho de 2010.
- KOBIYAMA, M.; MONTEIRO, L.R.; MICHEL, G.P. Aprender Hidrologia para Prevenção de Desastres Naturais. In: 28º Seminário de Extensão Universitária da Região Sul. Florianópolis: UDESC. 6p, 2010.
- LIMA, G.M.A.; BASTOS, L.C.; BELTRAME, A.V. Correlação entre o movimento de massa e a cobertura vegetal na bacia do Braço do Baú, Município de Ilhota – SC. In Anais do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação, Recife, Jul. 2010, 8pp.
- LOUKAS, A. Flood frequency estimation by a derived distribution procedure. Journal of Hydrology 255, pp. 69 – 89, 2002.

- MENEZES, J.G.R. A tragédia do Morro do Baú. Nova Letra Gráfica e Editora, Blumenau – SC, 438 p., 2009.
- MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M. Influência da distribuição temporal da precipitação em inundações. In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (2011: Maceió) Maceió: ABRH, Anais, 2011. 16p.
- MOPU Tecnología Carreteras. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales, Textos de la Dirección General de Carreteras, n 12, Espanha, 124 p. 1987.
- O'BRIEN, J.S.; JULIEN, P.Y.; FULLERTON, W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. J. of Hyd. Eng., ASCE, 119(2), pp. 244 – 259, 1993.
- PEREIRA, M. Ilhota, 23 de novembro de 2008: diário de uma tragédia. HB Editora, Blumenau – SC, 272 p., 2009.
- PREVENE. Contribution to "Natural" Disaster Prevention in Venezuela. Cooperation: Venezuela – Switzerland – PNUD. 2001.
- SILVEIRA, A.L.L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 10, pp. 5 – 23, 2005.
- SINGH, V. P. Elementary Hydrology. New Jersey: Prentice Hall, 973 p., 1992.
- STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. Urban Water, 4, pp. 425-430, 2002.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 1ª Ed, Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 669p., 1998.
- TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. 1ª Ed, Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 393p., 2007.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. Inundações Urbanas na América Latina. 1ª Ed, Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 471p., 2003.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T.; Drenagem Urbana. 1ª Ed, Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 428p., 1995.
- USACE-HEC. Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 157 p., 2000.
- USACE-HEC. Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v3.5 – User's Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 318 p., 2010.
- USDA. Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55. Soil Conservation Service, Washington, 1986.

Leonardo Romero Monteiro | Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS. E-mail: leonardoromeromonteiro@gmail.com

Masato Kobiyama | Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – ENS/UFSC. E-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br