



**ABRH**  
Associação Brasileira de  
Recursos Hídricos

## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

### **SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA NA GESTÃO DO RISCO A INUNDAÇÕES: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO PIABANHA, EM PETRÓPOLIS - RJ**

*Leonardo Tristão Chargel<sup>1</sup> & Daniele Pereira B. Amaral<sup>2\*</sup> & José Edson Falcão de F. Júnior<sup>3</sup> & Carolina V. F. de Souza<sup>4</sup> & João Paulo Rezende<sup>5</sup> & Vitor Albernaz<sup>6</sup> & João Paulo Fraga<sup>7</sup>*

**Resumo** – O aumento da ocorrência das inundações urbanas nas últimas décadas, tem tornado cada vez mais importante a incorporação de ferramentas que auxiliem no processo de tomada de decisão no gerenciamento da drenagem urbana. Este trabalho teve como objetivo estudar a bacia do rio Piabanha, nas localidades de Corrêas e Nogueira, região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Para simulação hidrológica foi utilizado o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) e o IBER 2D para as simulações hidrodinâmicas. A avaliação foi realizada para vazões associadas aos tempos de recorrência de 2, 10, 25 e 50 anos e como resultado das simulações foram obtidos mapas com a indicação dos trechos mais críticos para ocorrência de inundações. A metodologia representa uma alternativa importante na simulação e avaliação de medidas de mitigação das inundações urbanas.

**Palavras-Chave** – Inundações; Simulação Hidrodinâmica; IBER

### **HYDRODYNAMIC MODELLING IN THE FLOOD RISK MANAGEMENT: A CASE STUDY OF THE PIABANHA RIVER BASIN, PETRÓPOLIS - RJ**

**Abstract** – The increase in the occurrence of urban floods in the last decades has made the incorporation of tools that aid in the decision making process in urban drainage management more important. The objective of this work was to study the Piabanha river basin, in Corrêas and Nogueira, in the mountain region of Rio de Janeiro State. For the hydrological simulation, the Storm Water Management Model (SWMM) was used and the IBER 2D model for hydrodynamic simulations. The evaluation was performed for flows associated with the recurrence times of 2, 10, 25 and 50 years and, as a result, the simulations maps were obtained with the most critical sections for flood occurrence indication. The methodology represents an important alternative in the simulation and evaluation of urban flood mitigation measures..

**Keywords** – Floods; Hydrodynamic Modelling; IBER

<sup>1</sup> Engenheiro Ambiental, Engenheiro da Coordenadoria de Planejamento e Projetos Estratégicos do INEA – e-mail: leotristao.inea@gmail.com

<sup>2</sup> Engenheira Civil, MSc. em Engenharia Ambiental, Engenheira da Coordenadoria de Planejamento e Projetos Estratégicos do INEA – e-mail: danielpeba.inea@gmail.com

<sup>3</sup> Engenheiro Civil, MSc. em Recursos Hídricos, Coordenador de Planejamento e Projetos Estratégicos do INEA – e-mail: edsonfalcao.inea@gmail.com

<sup>4</sup> Engenheira Ambiental, MSc. em Engenharia de Biosistemas, Bolsista DTI-B CNPq - e-mail: carolvfs.inea@gmail.com

<sup>5</sup> Estagiário de engenharia ambiental da Coordenadoria de Planejamento e Projetos Estratégicos do INEA – e-mail: joaopvr.inea@gmail.com

<sup>6</sup> Estagiário de engenharia ambiental da Coordenadoria de Planejamento e Projetos Estratégicos do INEA – e-mail: vraz.inea@gmail.com

<sup>7</sup> Estagiário de engenharia civil da Coordenadoria de Planejamento e Projetos Estratégicos do INEA – e-mail: jpfraga.inea@gmail.com



## **XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**26 de novembro a 01 de dezembro de 2017**

**Florianópolis- SC**

### **INTRODUÇÃO**

O rio Piabanha nasce na Serra do Mar, em Petrópolis, percorrendo, já em seus primeiros quilômetros de curso, a maior cidade da Região Serrana. Deságua no rio Paraíba do Sul no município de Três Rios, depois de um percurso de oitenta quilômetros. Sua calha está frequentemente sujeita a extravasamentos, sobretudo nos trechos urbanos do município de Petrópolis, o que ocasiona grandes prejuízos e transtornos à população local.

Quando as enchentes se estabelecem de forma recorrente em uma bacia, além do problema de alocação de espaço, a combinação dos efeitos no tempo passa a ser crítica. São necessárias soluções de cunho sistêmico, adotando a bacia como unidade de planejamento, o que requer a necessidade de utilização de ferramentas computacionais de apoio à decisão e ao desenho de soluções efetivas. Nesse contexto, a modelação matemática surge como importante ferramenta de apoio à decisão, por sua capacidade de fornecer respostas sistêmicas para cenários diversos, em um exercício de predição e antecipação de efeitos resultantes de possíveis medidas mitigadoras.

Este trabalho está inserido no contexto do Projeto “Desenvolvimento de um sistema de prognóstico por conjunto de chuvas extremas e sua aplicação em ações de prevenção a desastres naturais” (SPPD), que tem financiamento do CNPq. O projeto visa desenvolver o protótipo de um sistema de predição hidrometeorológico, que permita identificar com antecedência a possibilidade de precipitações que provoquem inundações, além de estimá-la, apoiando assim a diminuição de perdas materiais e as ações da defesa civil. O sistema inicia-se na identificação da formação da precipitação (utilizando modelos meteorológicos), seguido da transformação da precipitação em vazão (utilizando os modelos hidrológicos) e finalizando na propagação da onda de cheia na calha do rio (utilizando modelos hidrodinâmicos).

Neste contexto, o objetivo desse artigo é apresentar os estudos hidrológicos e hidrodinâmicos desenvolvidos para o trecho urbano do rio Piabanha, nas localidades de Corrêas e Nogueira, em Petrópolis. Para a determinação das vazões com diferentes tempos de recorrência foi utilizado o modelo SWMM (*Storm Water Management Model*) e o IBER 2D para as simulações hidrodinâmicas.

### **CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A bacia do rio Piabanha localiza-se no reverso da Serra do Mar. Com área de drenagem de 2.065 km<sup>2</sup>, é uma das menores sub-bacias do Paraíba do Sul, constituindo a Região Hidrográfica IV (RH IV). O município de Petrópolis e seus distritos estão localizados ao longo da bacia do rio Piabanha e seus afluentes, cujo regime hidrológico é regido pelas chuvas que precipitam na região serrana e acarretam frequentes inundações, que causam transtornos e prejuízos recorrentes à população ali instalada.

Para o presente estudo, selecionou-se o trecho do rio Piabanha que compreende os bairros de Corrêas e Nogueira, por possuir recorrentes problemas de inundações. Sua área de drenagem em Nogueira é igual a 159,7 km<sup>2</sup>, tendo uma extensão total de aproximadamente 7,1 km.

## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

No âmbito do projeto, foram instaladas no trecho estudado, duas estações de monitoramento pluvio-fluviométrico (Corrêas Igreja e Nogueira) e realizadas campanhas de medição de vazão, com vistas a subsidiar e calibrar os estudos hidrológicos e hidráulicos.

A Figura 1 apresenta a bacia de drenagem e fotos de um evento extremo ocorrido em 18/03/2013, onde ocorreu o extravasamento do rio Piabanha, inundando parte dos bairros de Corrêas e Nogueira.

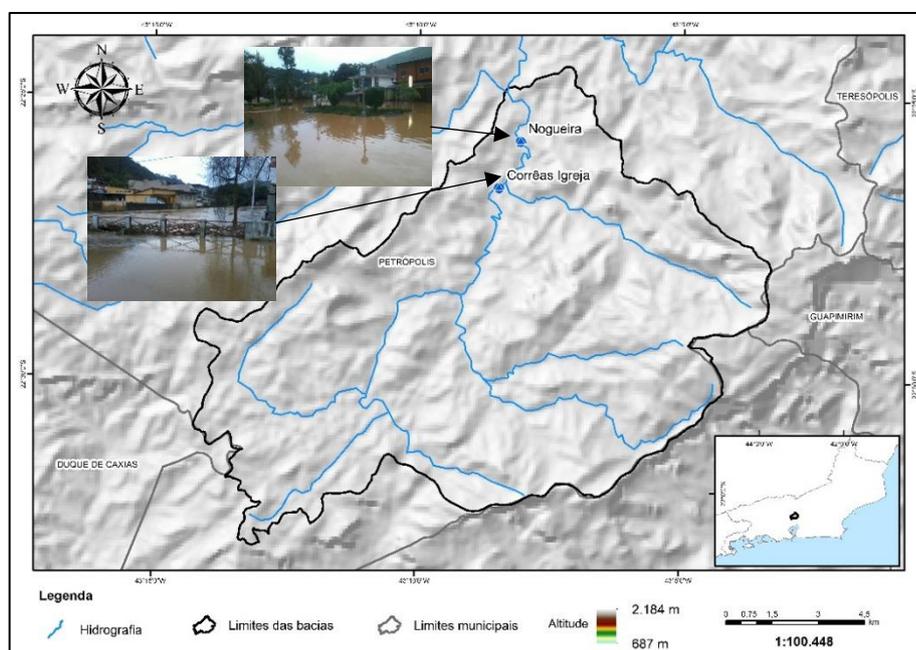


Figura 1 – Localização da bacia de estudo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Modelagem Hidrológica

Para simulação hidrológica utilizou-se o modelo dinâmico chuva – vazão SWMM (*Storm Water Management Model*), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) (ROSSMAN, 2008), por ter sido dentre os modelos testados o que melhor se adequou às características da bacia. O componente relativo ao escoamento superficial do SWMM opera com um conjunto de sub-bacias hidrográficas que recebem precipitações e geram os escoamentos. As simulações estão sendo processadas com o apoio da interface *Storm and Sanitary Analysis* (SSA), que é parte integrante do sistema AutoCAD Civil 3D®.

Foram realizados os estudos para obtenção das vazões associadas aos tempos de recorrência de 2, 10, 25 e 50 anos. Para tal, determinou-se, a partir de dados provenientes da estação pluviométrica Itamarati-SE, operada pela Agência Nacional de Águas (código 2243010), latitude 22,49°S e



## **XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**26 de novembro a 01 de dezembro de 2017**

**Florianópolis- SC**

longitude 43,15°O, uma equação IDF (intensidade – duração – frequência) com vistas à obtenção dos hietogramas.

A bacia de estudo foi dividida em quatro sub-bacias, sendo as informações necessárias para caracterização das mesmas no SWMM: largura representativa das sub-bacias, declividade das sub-bacias, coeficiente de rugosidade de Manning, altura do armazenamento em depressões e parâmetros de infiltração. Os parâmetros do modelo foram ajustados de forma a compatibilizar as vazões máximas às calculadas por meio da metodologia apresentada no Relatório-síntese do trabalho de Regionalização de Vazões da Sub-bacia 58 (CPRM, 2003), dada a inexistência de série histórica fluviométrica com dados consistidos. Destaca-se, entretanto, que alguns parâmetros poderão ser aprimorados ao longo da execução do projeto, visto que ainda estão em execução medições de vazões e consequentemente atualizações nas curvas-chaves desenvolvidas para as estações instaladas.

### **Modelagem Hidrodinâmica**

Várias técnicas para simulação de inundações em áreas urbanas têm sido desenvolvidas e utilizadas com bons resultados nas últimas décadas, as mais robustas utilizando modelos de propagação do escoamento na superfície em 2D. A simulação em duas dimensões na superfície pode ser necessária, especialmente pela complexidade dos caminhos percorridos pelo escoamento no ambiente urbano.

Para determinar as manchas de inundação para diferentes tempos de recorrência foi utilizado o modelo matemático IBER<sup>8</sup>. O IBER é um modelo hidrodinâmico bidimensional que trabalha sobre uma malha de volumes finitos e descreve a propagação do escoamento através das equações de Saint Venant. Dentre suas aplicações destaca-se o mapeamento de áreas de inundação, com fácil integração com ferramentas SIG, que facilitam a implementação da modelagem.

### **Geração dos Elementos Gráficos e Informações Espaciais**

Modelos bidimensionais como o IBER, em geral, requerem grande quantidade de informações de campo, através de levantamentos topobatimétricos ou base contínua, como modelo digital de terreno, que é uma representação numérica com a distribuição espacial e altimétrica contínua do terreno.

Tendo em vista essa necessidade, foi realizado o levantamento de 54 seções topobatimétricas no estirão no rio Piabanha, e nos afluentes Poço do Ferreira e Araras, próximo a confluência com o Piabanha. De forma a complementar as informações topográficas, realizou-se um sobrevoo com VANT (Veículo Aéreo não Tripulado), para aquisição de imagens aéreas e utilização no processamento de dados utilizados na fotogrametria.

---

<sup>8</sup> Desenvolvido pelo Governo Espanhol. Trata-se de um modelo gratuito, fruto de esforços do CEDEX (Centro de Estudos e Experimentações de Obras Públicas), do GEAMA (Grupo de Engenharia de Águas e Meio Ambiente, da Universidade de La Coruña), Grupo Flumen (Universidade Politécnica da Catalunha e Universidade de Barcelona) e o CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia, da UPC). Foi firmada uma cooperação entre o INEA e o UPC para aplicação do IBER em bacias do território do Rio de Janeiro.

## XXII SÍMPOSIOS BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

O equipamento utilizado foi o *3DR IRIS*, um quadricóptero, com função automática de voo, acoplado com uma câmera RGB, que permite a obtenção de imagens aéreas oblíquas, mosaicos georreferenciados, ortoretificadas, modelos digitais de superfície e de terreno. Para o voo foram alocados 15 pontos de controles no terreno, como resultado foram levantados cerca de 2,9 km<sup>2</sup>, gerando um total de 1625 imagens aéreas, com uma média de *ground sample distance* (GSD) de 5,91 cm e com erro da raiz quadrada média (RMS) 2,8 cm.

O levantamento aerofotogramétrico extrai um conjunto elevado e denso de pontos (nuvem de pontos - Figura 2) que constitui a representação do imageamento de uma determinada superfície, incluindo construções, árvores, veículos, etc., o que pode ser captado pela resolução da câmera, gerando um modelo digital de superfície (MDS). Através da classificação desse MDS extrai-se o modelo digital de terreno (MDT).



Figura 2 – Nuvem de pontos

As seções topobatimétricas foram incorporadas ao MDT, oriundo da fotogrametria, gerando um modelo digital de terreno que contém informações altimétricas da calha do rio. A interpolação entre as seções transversais levantadas foi realizada através de ferramentas disponíveis no *software* AutoCAD Civil 3D<sup>®</sup>. Como resultado, obteve-se uma base contínua de informação topográfica, conforme pode ser visto na Figura 3. A partir dessas informações foi gerado o Modelo Digital de Elevação, o qual deu origem à malha de cálculo do IBER.

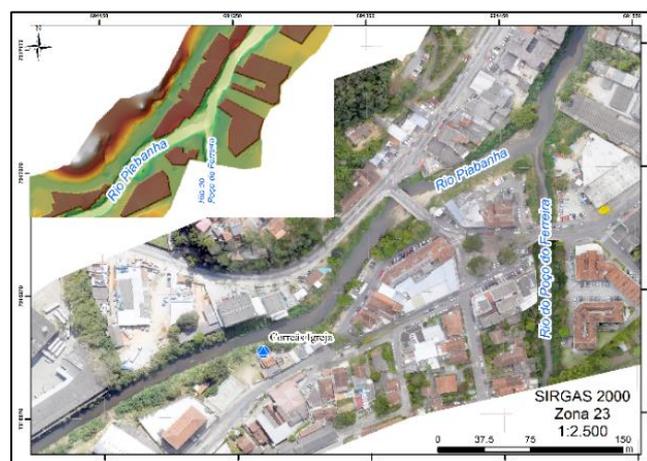


Figura 3 – Trecho da ortofoto e MDE do Piabanha



## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

### Processamento do Modelo

O IBER pode criar/importar geometrias complexas de forma automática, porém, essas geometrias podem ser tão rebuscadas que acabam gerando um número grande de elementos na malha de cálculo, que algumas vezes tendem a ser desnecessários, gerando um alto custo computacional. Assim, visando otimizar os cálculos, optou-se por construir uma malha de cálculo regular no ArcGIS®, e posteriormente importar no IBER. A malha produziu cerca de 158 mil elementos, com as dimensões da malha igual a 4 metros.

As perdas de energia do escoamento nas equações de Saint Venant são estabelecidas através do coeficiente de Manning, que nesse estudo foi atribuído a partir de um arquivo georeferenciado de uso e ocupação do solo, onde foram definidos 6 tipos de ocupação: vegetação (densa, média ou rasteira), áreas impermeáveis, rio e solo exposto. Especificamente para a calha do rio, realizou-se um processo de calibração do coeficiente de Manning, utilizando-se os dados hidrométricos (medições de vazão e registros de níveis d'água) obtidos nas duas estações de monitoramento existentes no trecho de estudo, assim variou-se o valor de Manning até que os resultados se aproximassem com os obtidos nestas duas seções.

### RESULTADOS

Através da modelagem hidrológica foram obtidos os hidrogramas de cheia para os tempos de recorrência de 2, 10, 25 e 50 anos, conforme apresentado na Figura 4. Realizou-se também a simulação para o evento extremo ocorrido nos dias 14 e 15 de dezembro de 2016. Como em cada sub-bacia delimitada há uma estação pluviométrica pertencente à rede de monitoramento do Inea, atribuiu-se um pluviômetro com os respectivos dados destas estações, resultando em uma vazão máxima de 76,6 m<sup>3</sup>/s no exutório da área em estudo, apresentando cotas do nível de água semelhantes aos identificados no evento de dezembro de 2016.

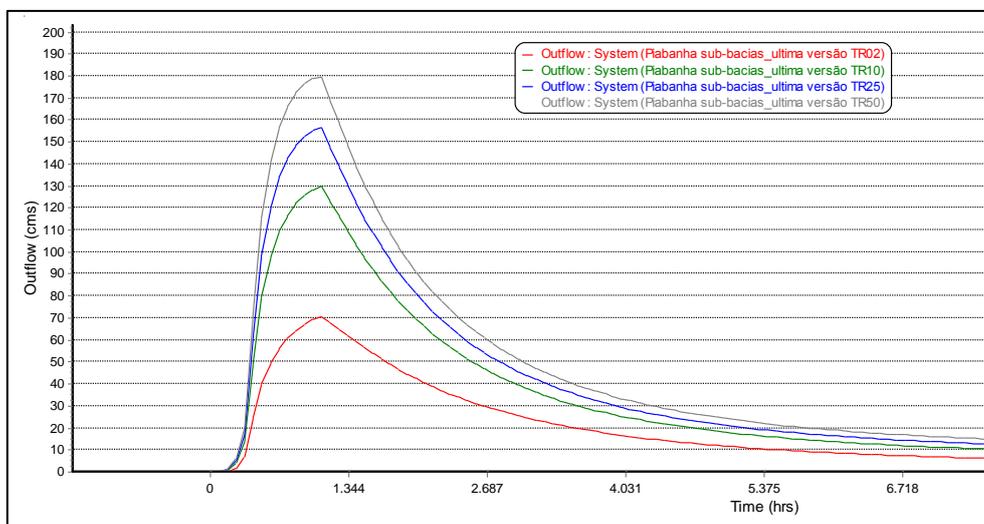


Figura 4 – Hidrogramas para os TR's de 2, 10, 25 e 50 anos

**XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**  
**26 de novembro a 01 de dezembro de 2017**  
**Florianópolis- SC**

A simulação hidrodinâmica foi realizada tendo os hidrogramas de cheia como condição de contorno. Para a modelagem, considerou-se um intervalo de tempo de 80 segundos, sendo o tempo máximo de simulação igual a 50.000 segundos. Desta forma, foram obtidas as manchas de inundação, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6.

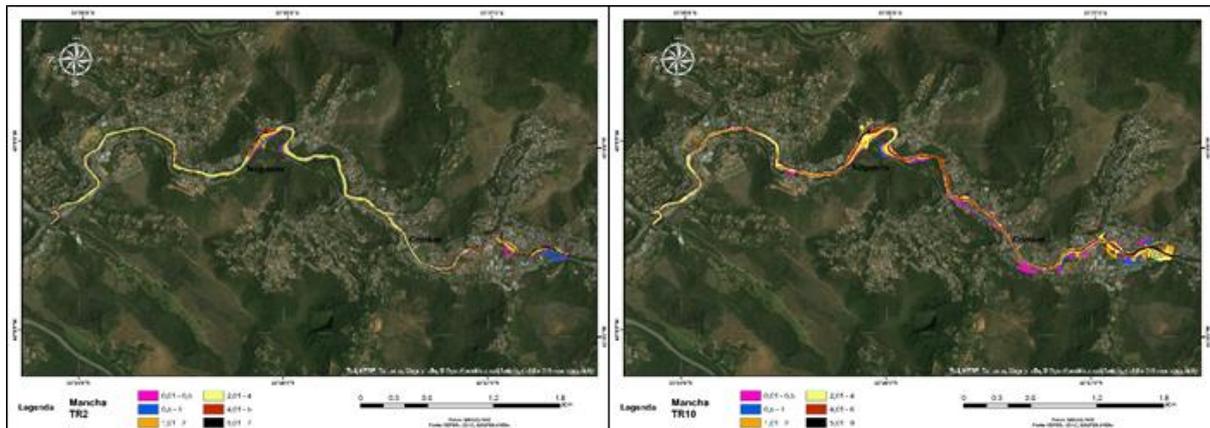


Figura 5 – Mancha de Inundação para os TR's 2 e 10 anos.

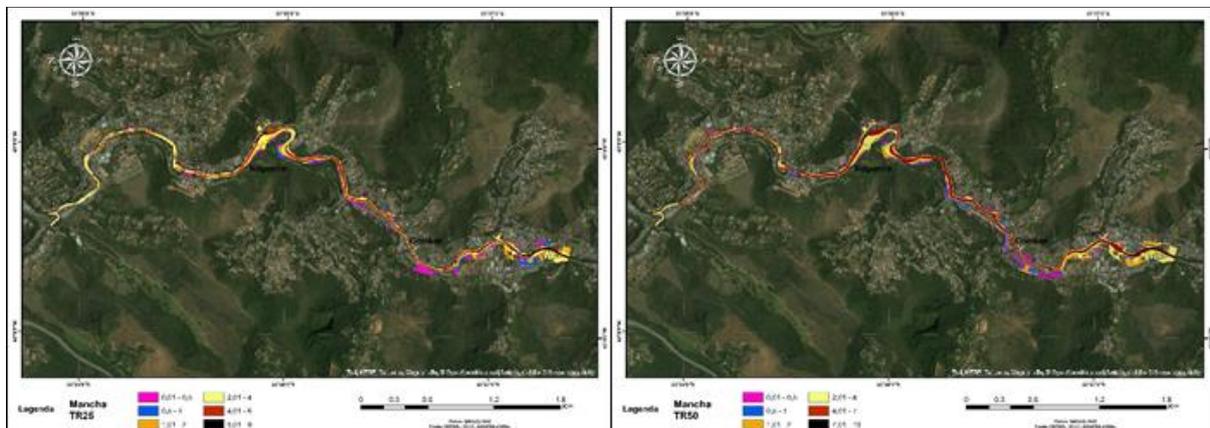


Figura 6 – Mancha de inundação para os TR's 25 e 50 anos.

## CONCLUSÕES

De modo geral, as simulações produziram bons resultados, onde os mapas gerados apresentam como áreas inundáveis regiões que possuem histórico de eventos com inundação. O registro da ocorrência de eventos extremos futuros que provoquem inundação será fundamental para otimizar as manchas de inundações produzidas com o modelo hidrodinâmico.

Cabe destacar que a bacia em estudo sofre um processo acelerado de urbanização que pode provocar mudanças futuras dos hidrogramas de cheia e dos parâmetros utilizados para gerar as manchas de inundações, portanto esse processo deve ser avaliado periodicamente para verificar a necessidade de atualização dos estudos ora realizados.



## **XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**26 de novembro a 01 de dezembro de 2017**

**Florianópolis- SC**

O desenvolvimento desse estudo evidenciou que é imprescindível a realização do monitoramento quantitativo contínuo na bacia estudada, para que se possa obter respostas mais precisas através dos processos de simulação. No início deste estudo enfrentou-se grande dificuldade, por não haver informações hidrométricas de qualidade na bacia.

### **AGRADECIMENTO**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

CAMPOS, A.R., SANTOS, G.G., SILVA, J.B.L., IRENE FILHO, J., LOURA, D.S. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado do Piauí. Revista Ciência Agronômica, v. 45, n. 3, p. 488-498, jul-set, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rca/v45n3/v45n3a08.pdf>>. Acesso em: nov 2016.

BRAGA, R. N. S. Precipitações intensas e equações de Intensidade-Duração- Frequência (Idf) para a cidade do Rio de Janeiro. 2016. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biossistemas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biossistemas. Universidade Federal de Fluminense. Niterói. 2016.

FLUMEN. Hydraulic Reference Manual IBER V1.0. 2012.

ROSSMAN, L. A. SWMM 5: *User's Manual*. Cincinnati, OH : Environmental Protection Agency, 2008.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). Storm Water Management Model (SWMM). Disponível em: <<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>>. Acesso em: jan 2016a.