

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

IMPACTO DE UM CENÁRIO DE MUDANÇA NO CLIMA SOBRE AS INUNDAÇÕES EM UMA BACIA URBANA COSTEIRA – CASO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE – RIO DE JANEIRO, RJ

*Oswaldo Moura Rezende¹ ; Matheus Martins de Sousa², Ana Caroline Pitzer Jacob³, Francis
Martins Miranda⁴, Luiza Batista de França Ribeiro⁵ & Marcelo Gomes Miguez⁶*

RESUMO – Os eventos hidrológicos são fenômenos naturais potencialmente alterados pela atividade antrópica e modificações nos padrões climáticos. Alterações no uso do solo, canalizações, comportas, desvios, ocupação de áreas naturalmente inundáveis e variabilidade climáticas estão entre os principais fatores responsáveis pelo aumento da frequência e magnitude dos eventos de inundação no mundo. O presente trabalho avalia o impacto de mudanças no clima em uma bacia costeira altamente urbanizada, com de grandes prejuízos para a população decorrentes de inundações: a bacia do Canal do Mangue, na cidade do Rio de Janeiro. Para simular as cheias na bacia foi utilizado o MODCEL, um modelo quasi-2D multicamadas, que representa o espaço urbano através de compartimentos homogêneos, denominados por células, compondo uma rede hidrodinâmica de escoamentos. Foram considerados três cenários climáticos, com padrão hidrológico atual e possíveis aumentos na maré e na intensidade das precipitações. Os resultados mostram que mudanças no clima podem impactar significativamente a área de estudo, intensificando os alagamentos nas áreas já inundáveis, aumentando as áreas inundadas e a profundidade de alagamento, colocando mais pessoas em risco.

ABSTRACT– The hydrological events are natural phenomena potentially altered by anthropic activity and changes in climatic patterns. Anthropic changes in land use patterns, river channeling, floodgates, occupation of naturally flooded areas and climatic variability are among the main factors responsible for increasing the frequency and magnitude of flood events in the world. The present work evaluates the impact of climate changes in a highly urbanized coastal basin that has a history of flood events with great damages to the population: the Canal do Mangue watershed, Rio de Janeiro city. To simulate flooding, the MODCEL was used, a quasi-2D multilayer model, which represents the urban space through cells composing a hydrodynamic flow network. Three climatic scenarios were simulated considering the current hydrological pattern and two possible interferences of the climate change in the tide variations and the intensity of the precipitations. The results show that changes in climate can significantly impact the study area, intensifying flooding in already flooded areas, increasing flooded areas and flooding depth, exposing more people to the risk.

Palavras-Chave – inundações urbanas, mudança climática, MODCEL

1) Programa de Engenharia Ambiental – POLI/UFRJ: Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Bloco A - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-909, +55-21-3938-7830. omrezende@coc.ufrj.br

2) Programa de Engenharia Ambiental – POLI/UFRJ: Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Bloco A - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-909, +55-21-3938-7830. matheus@poli.ufrj.br

3) Aquafluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos: caroline@aquaflexus.com.br

4) Programa de Engenharia Ambiental – POLI/UFRJ: Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Bloco A - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-909, +55-21-3938-7830. francismiranda@gmail.com

5) Aquafluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos: luiza@aquaflexus.com.br

6) Escola Politécnica – POLI/UFRJ: Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Bloco A - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-909, +55-21-3938-7830. marcelogmiguez@poli.ufrj.br

INTRODUÇÃO

As precipitações intensas, áreas alagadas, inundações, enxurradas e a deposição/transporte de sedimentos são fenômenos naturais de origem hidrometeorológica potencialmente alterados pela atividade antrópica e alterações nos padrões climáticos. Alterações antrópicas nos padrões de uso do solo, obras de drenagem, ocupação de áreas naturalmente inundáveis e variabilidade climáticas estão entre os principais fatores responsáveis pelo aumento da frequência e magnitude das inundações no mundo. Com o avanço da urbanização, novas áreas da bacia são impermeabilizadas e um maior volume de escoamento superficial é aportado ao sistema de drenagem, sobrecarregando seu funcionamento. A ocorrência desses eventos de inundações de forma frequente passa a constituir risco para a população, suas benfeitorias e atividades econômicas.

As mudanças do clima globais vêm promovendo alteração na frequência, intensidade, distribuição espacial, duração e sincronismo de eventos extremos, como secas e inundações, aumentando as tensões atuais e futuras sobre os recursos hídricos e uso da terra (SAYERS et al, 2013).

A água é o principal meio pelo qual as mudanças nos padrões climáticos agem sobre o ecossistema terrestre, influenciando as formas de produção, meios de subsistência e o bem-estar das sociedades. Nesse sentido, tais alterações são um importante fator no desempenho dos sistemas de drenagem e resiliência dos sistemas socioeconômicos. Caso a cidade não esteja em processo de adaptação, precipitações acima dos valores esperados tendem a aumentar a frequência de falhas dos sistemas de drenagem urbana, conseqüentemente se revertendo em prejuízos cada vez maiores.

Sob condições de elevação do nível médio do mar, dispositivos da microdrenagem já instalados podem ter sua seção de escoamento parcial ou integralmente “afogada” com maior frequência ou de forma permanente, comprometendo sua eficiência. Canais sujeitos ao efeito de maré possuem dificuldade de escoamento promovido pelo remanso, efeito potencializado pela ocorrência de marés meteorológicas. Períodos prolongados de estiagem também representam perigo. A redução nas velocidades de escoamento em função da diminuição do gradiente hidráulico, facilitam a deposição de sedimentos e resíduos no sistema de drenagem em si, reduzindo a seção hidráulica e aumentando o atrito dos condutos. Isto é, um evento de precipitação intensa após longo período de estiagem encontrará uma rede com menor seção de escoamento disponível e maiores obstáculos ao escoamento. Sob esse novo cenário, sistemas construídos tendem a ser repensados, redimensionados e complementados. Novos sistemas em áreas sob processo de urbanização deverão ter suas chuvas de projeto atualizadas acrescidas de fatores de segurança. O impacto das mudanças do clima, seja pela alteração nos padrões de precipitação ou no aumento do nível médio dos oceanos, em conjunto com o crescimento urbano (alta impermeabilização e ocupação desordenada), tendem a resultar em desafios mais complexos na gestão integrada dos recursos hídricos, principalmente nos países em desenvolvimento onde questões básicas de saneamento ainda não foram equacionadas.

Dessa forma, os impactos potenciais da mudança do clima sobre os sistemas de drenagem resultam de três estressores climáticos, sensíveis à variação de temperatura: *aumento das chuvas intensas; sobrelevação do nível do mar; e intensificação das estiagens*. O presente trabalho, que tem como estudo de caso a bacia do Canal do Manguê, uma bacia costeira altamente urbanizada, busca avaliar os impactos das mudanças climáticas nos eventos de inundações, identificando os pontos mais críticos da bacia.

METODOLOGIA

Para simular as cheias em uma bacia altamente urbanizada esse estudo utiliza uma ferramenta de modelagem matemática. As simulações consideraram cenários climáticos atuais e futuros, sob possíveis impactos das mudanças do clima nas curvas de marés e nas chuvas intensas.

Sistema de modelagem

A modelagem de cheias aplicada em bacias hidrográficas permite representar o fenômeno das inundações e, dessa forma, melhorar a compreensão sobre o comportamento da bacia sob eventos com parâmetros pré-definidos ou registrados. A partir da modelagem das bacias de interesse é possível simular cenários, avaliar a resposta no comportamento dos escoamentos após intervenções físicas no sistema e conceber e analisar diferentes medidas de mitigação das inundações.

A análise de fenômenos de inundação por meio da modelagem matemática demanda o uso de duas ferramentas de modelagem: uma para representar os processos de transformação da chuva em vazão; e outro responsável para simular o comportamento hidrodinâmico dos escoamentos excedentes sobre a bacia. A bacia hidrográfica do Canal do Manguê foi modelada com o apoio do *software* MODCEL, desenvolvido na UFRJ (MIGUEZ *et al.*, 2017). O MODCEL é um modelo quasi-2D (CUNGE *et al.*, 1980), que representa o espaço urbano através de compartimentos homogêneos, denominados por células e interligados por meio de equações hidráulicas, compondo uma rede hidrodinâmica de escoamentos. O conceito de células de inundação foi inicialmente desenvolvido por Zanobetti e Lorgeré (1968) e consagrado por Cunge *et al.* (1980). A primeira versão de um modelo celular desenvolvido no Brasil foi construída para representar o pantanal matogrossense, um grande pântano na região centro-oeste do Brasil (MASCARENHAS & MIGUEZ, 1994). Posteriormente, este modelo foi adaptado a um ambiente urbano, ganhando uma série de novas instalações, sendo apresentado em uma versão inicial por Mascarenhas e Miguez (2002), que está em contínuo aperfeiçoamento, se apresentando como uma alternativa consistente para simular eventos hidrológicos em áreas urbanas complexas. Algumas aplicações anteriores deste modelo podem ser encontradas na literatura (ver, por exemplo, MIGUEZ *et al.*, 2014; BARBEDO *et al.*, 2015, MIGUEZ *et al.*, 2015, NARDINI e MIGUEZ, 2016, MIGUEZ *et al.*, 2017).

Cenários de simulação

Foram simulados cenários climáticos considerando o padrão hidrológico atual e possíveis interferências da mudança do clima nas variações de maré e na intensidade das precipitações, conforme proposto no *Plano de Adaptação Climática do Estado do Rio de Janeiro* (LIMA, 2018). Para a elaboração das chuvas de projeto, foi considerada a duração do tempo de concentração da bacia do Canal do Mangue, estimado em 3h, e tempo de recorrência de 25 anos. As condições hidráulicas do sistema de drenagem da bacia do Canal do Mangue referem-se a uma situação anterior às intervenções do Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais do Rio de Janeiro – PDMAP-RJ. No total, foram considerados três cenários de simulação, que são:

0 – Intensidade de chuva com TR de 25 anos e curva de maré média na Baía de Guanabara.

1 – Impacto da mudança no clima com aumento de 30% na intensidade de chuva e 2,0m na maré.

2 – Impacto da mudança no clima com aumento de 30% na intensidade de chuva e 3,0m na maré.

ESTUDO DE CASO

A bacia do Canal do Mangue está localizada na Região Hidrográfica V (Baía de Guanabara), na região central da Cidade do Rio de Janeiro (CRJ), conforme apresentado na Figura 1. A bacia é composta pelas sub-bacias dos rios Joana, Maracanã, Trapicheiros, Comprido e Papa-Couve. A Figura 2 apresenta a hidrografia da bacia, com os principais afluentes do Canal do Mangue.

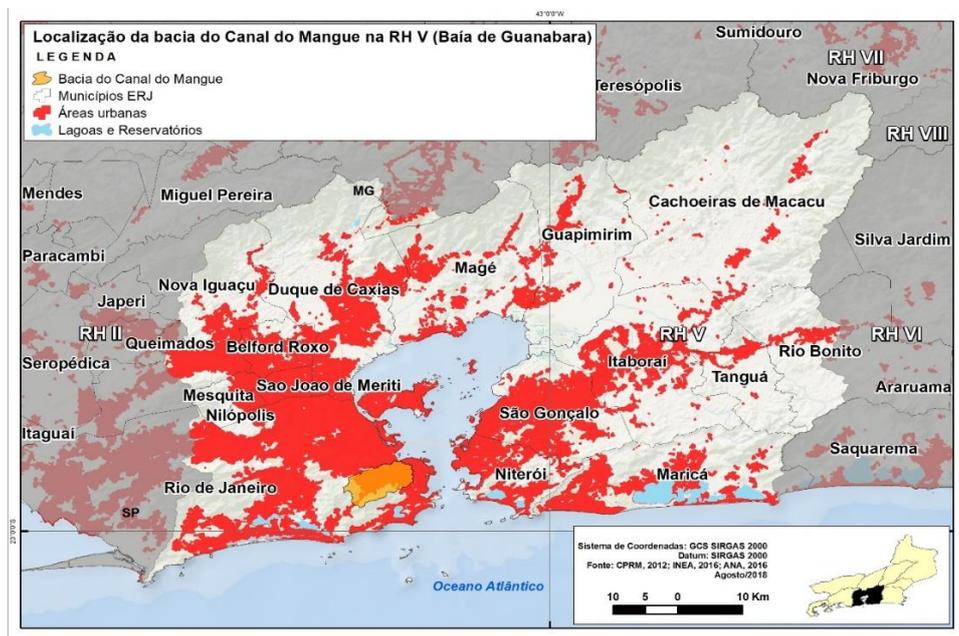


Figura 1 – Localização da bacia do Canal do Mangue na RH V. Fonte: LIMA (2018).

A CRJ foi fundada com objetivo estratégico de defesa, para a criação de um posto avançado de controle colonial. Era assentada entre os morros Cara de Cão e Pão de Açúcar. Posteriormente, a cidade foi transferida para o então morro de São Januário (depois chamado morro do Castelo). Ali, o núcleo urbano ficava protegido entre áreas inundáveis e lagoas, dificultando possíveis ataques por

terra. Com o tempo, crescia a necessidade de se expandir a atividade portuária e a ocupação, principalmente para a região norte da cidade, onde seriam mais fáceis os acessos a estradas importantes que levavam ao interior do Brasil colonial. Entretanto, um grande obstáculo se opunha a esse objetivo, os manguezais e áreas alagadiças adjacentes ao Saco de São Diogo, um “braço do mar” que adentrava o continente e recebia as águas dos rios já mencionados. Dessa forma, o ambiente natural foi aos poucos sofrendo uma série de intervenções antrópicas, com maior intensidade no início do século XX, até a configuração atual apresentada na Figura 3, onde os escoamentos fluviais de toda a bacia foram reunidos em um único canal artificial principal, denominado Canal do Mangue.

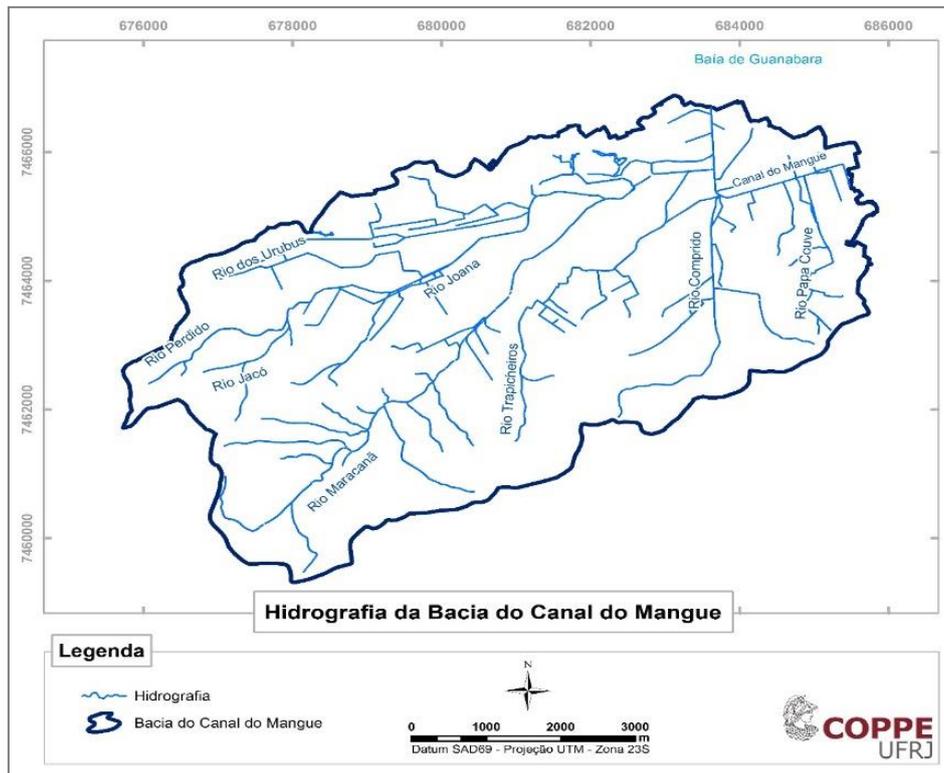


Figura 2 – Principais afluentes do Canal do Mangue, no Rio de Janeiro (Rezende, 2018).



Figura 3 – Evolução da ocupação urbana na região central da cidade do Rio de Janeiro: de Saco de São Diogo ao Canal do Mangue (IPP, 2018).

Modelagem hidrológica-hidrodinâmica da BCM

O primeiro modelo em células para a bacia do Canal do Mangue (BCM) foi desenvolvido no âmbito do Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue. Tal modelo pretendia avaliar a situação em que se encontrava o sistema de macrodrenagem, testando possíveis intervenções para a mitigação dos problemas de inundação existente. Este estudo agregou um conjunto estruturado de informações, avaliações e dados diversos, a ponto de permitir a sua utilização eficiente como área-piloto para estudos de drenagem em toda a CRJ (COPPETEC, 2000).

O processo de modelagem resultou em uma base com mais de 1.000 células, representativas dos rios, canais, grandes galerias, encostas e planícies da bacia do Canal do Mangue. Na época do desenvolvimento do modelo, as divisões de células foram realizadas sobre as cartas aerofotogramétricas da CRJ, em papel.

Calibração e validação do modelo

As informações necessárias para essa etapa, alturas de chuva e medições de nível d'água em trechos dos rios principais, foram obtidas do Sistema de Alerta de Chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro (Alerta Rio), o qual conta com uma rede de 33 estações pluviométricas, espalhadas por todas as regiões da CRJ. Essas estações disponibilizam dados em tempo real, a cada 15 minutos.

Foram selecionadas cinco estações (Santa Tereza, Grajaú, Saúde, Alto da Boa Vista, Tijuca/Muda) para utilização no processo de calibragem do modelo, as quais possuíam informações de evento pluviométrico ocorrido no ano de 2000, utilizado para calibração. Adicionalmente, foram consideradas mais duas estações, instaladas no âmbito do Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue (COPPETEC, 2000): as estações Defesa Civil e Andaraí. O processo de calibração e validação, assim como seus resultados, podem ser vistos em Rezende (2018).

RESULTADOS

Após a etapa de calibração e validação do modelo matemático construído para simulação dos eventos de cheia na bacia do Canal do Mangue, foram simulados os três cenários descritos anteriormente. Os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

Diagnóstico de inundações na bacia do Canal do Mangue

O primeiro cenário simulou o evento hidrológico de projeto, considerando a chuva com TR de 25 anos. A configuração do sistema de drenagem da bacia foi considerada conforme consta no cadastro da rede de macrodrenagem, realizado no Plano Diretor da Bacia do Canal do Mangue (COPPETEC, 2000). Alterações nos canais ou galerias que ocorreram após a realização do cadastro não são consideradas no modelo matemático elaborado. Desta forma, os resultados encontrados não representam um diagnóstico da situação atual, mas uma situação hipotética, relativa a um passado existente. Este cenário serve de base para avaliação de cenários de projeto, que poderão considerar as intervenções propostas inseridas nesta base de modelagem. A Figura 4 apresenta a mancha de

inundação resultante da simulação do evento pluviométrico de TR25 anos. A persistência de muitas áreas alagadas com pequenas profundidades pode ser resultado da não consideração da rede de microdrenagem no modelo. Foram simuladas as galerias com 1,0 metro de diâmetro ou dimensões superiores, a fim de representar os escoamentos na rede subterrânea de maior magnitude.

Uma crítica da bacia se encontra nas proximidades da Praça da Bandeira, que apresenta alagamentos com profundidades de cerca de 1,0 m em decorrência de chuvas com 10 anos de tempo de recorrência, como pode ser observado na Figura 5. Este resultado é corroborado por inúmeros eventos de inundação na bacia. As ruas do Matoso e Pereira de Almeida apresentam profunda sensibilidade a alagamentos. A Figura 6 apresenta a rua do Matoso completamente submersa em decorrência de um evento de chuva intensa ocorrido no dia 12/03/2016. Neste evento, foi registrado na região da Tijuca, pelo Sistema Alerta Rio, uma altura de precipitação de cerca de 105 mm, em um período de 03h25min. Tais valores caracterizam um evento pluviométrico com tempo de recorrência entre 15 e 20 anos.

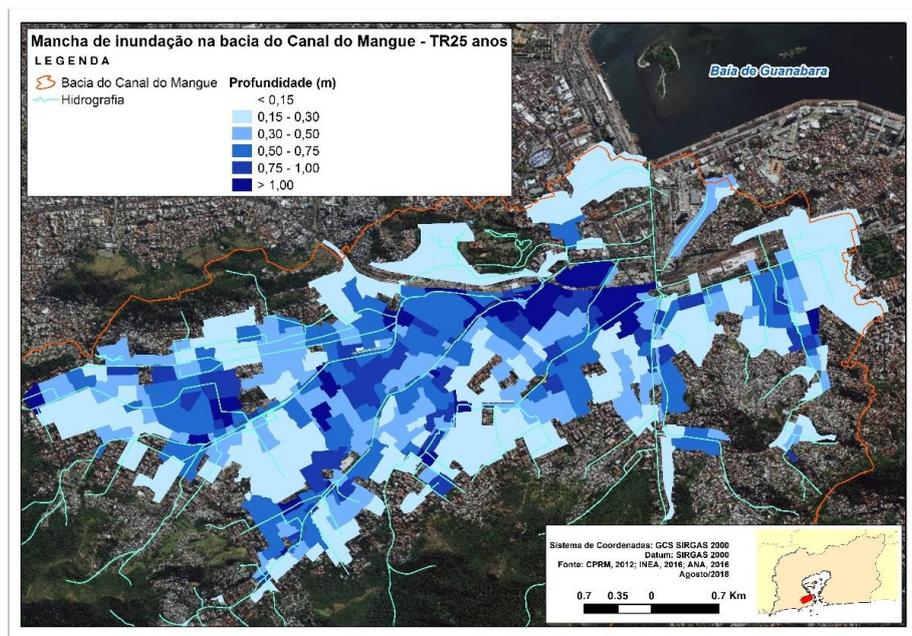


Figura 4. Mancha de inundação na Bacia do Canal do Mangue, resultante de chuva com TR25 anos. (Rezende, 2018).

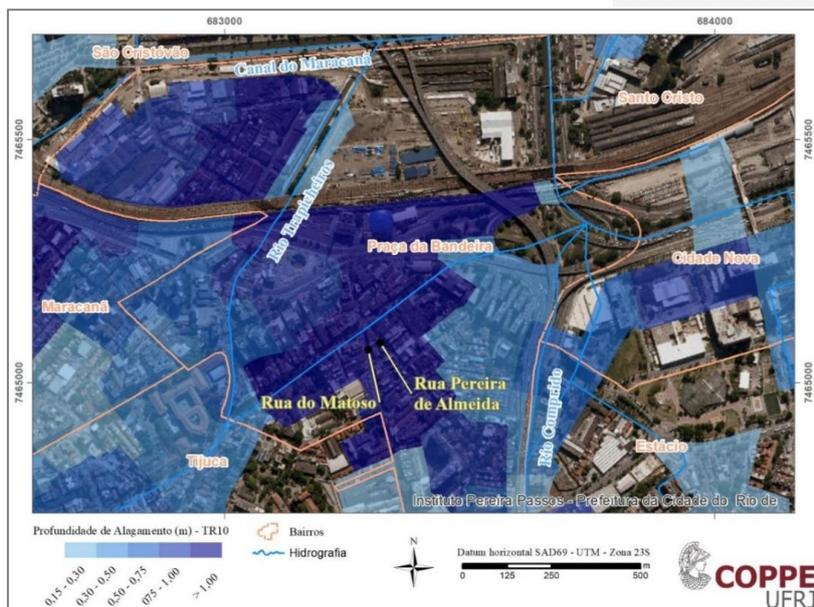


Figura 5. Mancha de alagamento na região da Praça da Bandeira, em decorrência de uma chuva com 10 anos de tempo de recorrência. Fonte: Rezende (2018).



Figura 6. Fotografia da rua do Matoso feita durante um evento de inundação, no dia 12/03/2016
Fonte: Foto divulgada em O Globo <https://goo.gl/cMf79q> (2016)

Prognóstico de inundações na bacia do Canal do Mangue em cenário de Mudança do Clima

Os resultados das simulações dos cenários de mudança do clima indicam um aumento nas áreas inundadas, considerando o evento com 25 anos de tempo de recorrência. Para uma melhor observação das consequências da mudança no clima, representadas pelos impactos no aumento da precipitação intensa e na sobrelevação dos níveis de maré, foram plotadas em um mapa, as manchas de inundação com profundidades superiores a 0,50m, que representa um nível crítico quanto aos impactos na cidade.

A Figura 7 apresenta as manchas resultantes dos cenários atual e com mudança do clima, considerando duas sobrelevações na maré (+ 2,0m e +3,0m). O aumento das áreas impactadas é significativo, com um incremento de 24% de áreas com profundidades superiores a 0,50m, para o cenário de mudança do clima 1, e de 74%, para o cenário de mudança do clima 2.

A sobrelevação do nível de maré tem grande impacto sobre as áreas mais próximas à Baía de Guanabara, atingindo quase toda a região portuária. No pior cenário (cenário 2), com sobrelevação

de 3,0 m na curva de maré, a região central da cidade do Rio de Janeiro seria toda impactada. As manchas não se estendem para para fora da bacia pela limitação geográfica da avaliação, que considera apenas o território dentro da bacia do Canal do Mangue. Portanto, o cenário real será muito mais crítico.

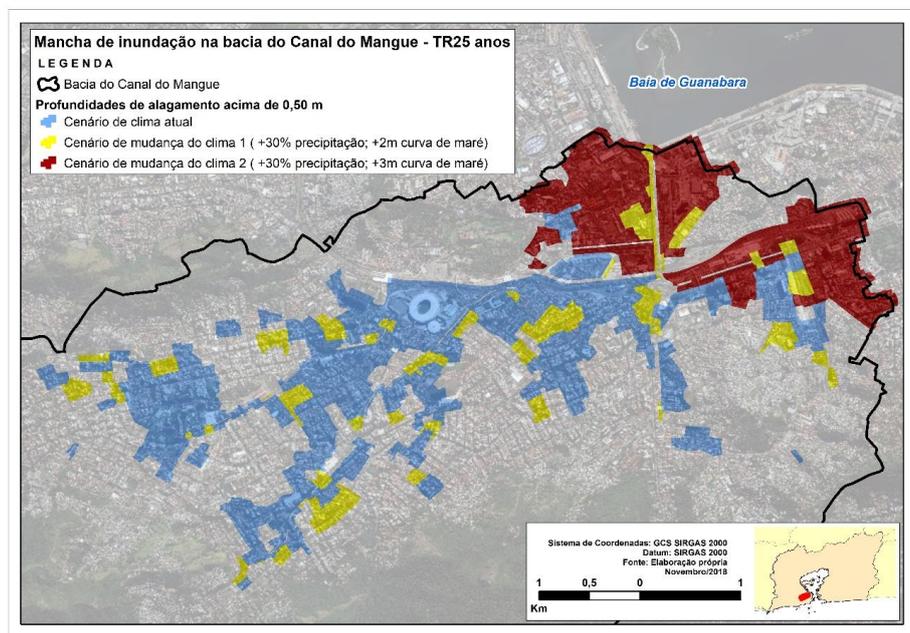


Figura 7 – Manchas de inundação na bacia do Canal do Mangue, resultantes de uma precipitação com TR25 anos, em cenário atual e futuro, com impactos da mudança do clima na chuva e na maré. Fonte: (LIMA, 2018)

CONCLUSÕES

A bacia do Canal do Mangue é uma região estratégica na CRJ e os eventos de inundação podem gerar graves transtornos para a população. Os resultados da simulação hidrodinâmica para a BCM evidenciam as consequências de um processo de urbanização intenso, com alto grau de intervenção antrópica sobre os recursos hídricos e sujeita a influência das variações de maré. Os resultados mostram que mudanças no clima podem impactar significativamente a BCM, intensificando os alagamentos nas áreas já inundáveis, aumentando as áreas inundadas e a profundidade de alagamento, colocando mais pessoas em risco.

Os cenários futuros foram avaliados a partir dos impactos da mudança no clima com aumento no volume de chuvas intensas e na sobrelevação do nível do mar, sem qualquer previsão de alteração no atual padrão de urbanização. Portanto, pode-se esperar que os possíveis impactos da mudança no clima na BCM sejam ainda mais alarmantes. Torna-se importante, portanto, prever ações para a bacia visando o incremento da resiliência a partir de medidas adaptativas no processo de desenvolvimento da região.

REFERÊNCIAS

- BARBEDO, J. M. R.; MIGUEZ, M. G.; VAN DER HORST, D.; CARNEIRO, P.; AMIS, P.; IORIS, A., 2015. Policy dimensions of land-use change in peri-urban floodplains: the case of Paraty. *Ecology and Society: a journal of integrative science for resilience and sustainability*, v. 20, p. art5.
- COPPETEC, 2000. *Execução de concepção e de projetos de obras civis e ações de controle das enchentes na Bacia Hidrográfica do Canal do Manguê*. Rio de Janeiro, 257 p.
- CUNGE, J.A.; HOLLY Jr., F.M.; VERWEY, A., 1980. *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Inglaterra, Pitman Advanced Publishing Program.
- IPP, 2018. *Armazém de Imagens*. Instituto Pereira Passos. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.
- LIMA, 2018. *Plano de Adaptação Climática do Estado do Rio de Janeiro*. Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente, Centro Clima/COPPE/UFRJ.
- MASCARENHAS, F.C.B., MIGUEZ, M.G., 1994, *Modelação de Grandes Planícies de Inundação por um Esquema de Células - Aplicação ao Pantanal de Mato-Grosso*. *Revista Brasileira de Engenharia (RBE)*, Caderno de Recursos Hídricos, v.12, n.2.
- MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; 2002. *Urban Flood Control through a Mathematical Cell*. In: *Water International Resources*, Vol. 27, Nº 2, págs. 208-218, Junho 2002; Illinois, E.U.A.
- MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; MASCARENHAS, F. C. B.; Santos, R.B., 2014. Storage measures as compensatory techniques for urban lowlands flood control. *International Journal of Sustainable Development and Planning: encouraging the unified approach to achieve sustainability*, v. 9, p. 225-236.
- MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; SOUSA, M. M.; Rezende, O. M., 2015. *Urban Floods in Lowlands-Levee Systems, Unplanned Urban Growth and River Restoration Alternative: A Case Study in Brazil*. *Sustainability (Basel)*, v. 7, p. 11068-11097.
- MIGUEZ, M. G. BATTEMARCO, B.P.; SOUSA, M.M.; REZENDE, O.M.; VEROL, A.P.; GUSMAROLI, G., 2017. *Urban flood simulation using MODCEL-an alternative quasi-2D conceptual model*. *Water (Switzerland)*, v. 9, n. 6, p. 445.
- NARDINI, A.; MIGUEZ, M. G., 2016. *An Integrated Plan to Sustainably Enable the City of Riohacha (Colombia) to Cope with Increasing Urban Flooding, while Improving Its Environmental Setting*. *Sustainability (Basel)*, v. 8, p. 198-227.
- REZENDE, O.M., 2018. *Análise Quantitativa da Resiliência a Inundações para o Planejamento Urbano: Caso da Bacia do Canal do Manguê no Rio de Janeiro*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SAYERS, P.; LI Y.; GALLOWAY, G.; PENNING-ROWSELL, E.; SHEN, F.; WEN, K., CHEN, Y. e LE QUESNE, T., 2013. *Flood Risk Management: A Strategic Approach*. Paris, UNESCO.
- ZANOBETTI, D.; LORGERÉ, H. *Le modèle mathématique du Delta du Mékong*. *La Houille Blanche*, n. 5, p. 363-378, 1968. ZANOBETTI, D.; LORGERÉ, H. *Le modèle mathématique du Delta du Mékong*. *La Houille Blanche*, n. 5, p. 363-378, 1968.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e pelo apoio técnico disponibilizado pela Aquafluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos e pelo Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente (LIMA-PPE/COPPE).