

Impactos das obras de drenagem e da urbanização no desempenho hidráulico de um canal em Aracaju/SE

Hiêgor Barreto Rodrigues ^[1], Willams Andrade Lima ^[2], Ludmilson Abritta Mendes ^[3]

[1] hiegorbr@gmail.com. [2] willams.andradelima@gmail.com. [3] lamendes@ufs.br. Universidade Federal de Sergipe / Departamento de Engenharia Civil.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho do sistema de macrodrenagem do Canal Santa Maria, situado na cidade de Aracaju-SE, considerando a situação atual e futura, com base na máxima taxa de ocupação do solo permitida pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) municipal. Para a modelagem hidrodinâmica do canal, foi utilizado o *software Storm Water Management Model (SWMM)*. Foi observado que a impermeabilização máxima da área poderá aumentar o escoamento superficial direto das sub-bacias em até 5,3 vezes e do sistema em mais de 50%, a vazão unitária de pico em até 150%, e pode ultrapassar os limites máximos de velocidade admissível e lâmina d'água, ocorrendo o transbordamento do canal. Essas mudanças tornaram-se ainda mais intensas com a ocupação e impermeabilização da lagoa do bairro 17 de Março e seu entorno. Verificou-se que o projeto de dragagem aprovado pelo município, se não for implementado em conjunto com medidas que atenuem a geração de escoamento superficial nos lotes, tende a perder eficiência ao longo do tempo, considerando o aumento da urbanização e da taxa de impermeabilização da superfície dos lotes na região.

Palavras-chave: Inundação. Modelagem. SWMM.

ABSTRACT

The present study aimed at assessing the performance of the Santa Maria channel stormwater system in the city of Aracaju-SE, considering the current and future land occupation, based on the maximum occupancy rate in the region according to the current municipal laws. Storm Water Management Model (SWMM) was used for the channel hydrodynamic modeling. It was observed that the maximum impermeabilization rate may increase the runoff in sub-basins up to 5.3 times, on the system up to 50%, the peak flow rate up to 150%, and it may exceed the maximum limits of permissible speed as well as water depth, resulting in overflowing. Those changes became more severe after a lagoon adjacent to the channel was simulated as impermeabilized. It was found that the dredging project approved by the municipality, if not implemented together with measures that mitigate the surface runoff generation in the lots, tends to lose yield over time, considering the increase in urbanization and land impermeabilization degree of the lots in the studied area.

Keywords: Flooding. Modelling. SWMM.

1 Introdução

A expansão da urbanização no Brasil é relativamente recente. Seu início remonta ao conjunto de mudanças na economia e na sociedade por volta da década de 1930. O crescimento rápido sem o planejamento adequado trouxe implicações preocupantes nas perspectivas ambiental e hidrológica, uma situação comumente notada nas cidades brasileiras de médio e grande porte (TUCCI, 1995; BRITO; HORTA; AMARAL, 2001).

Com a impermeabilização das áreas urbanas, as parcelas de infiltração, interceptação e escoamento são significativamente alteradas, o que resulta na diminuição da absorção das chuvas pelo solo e no aumento do escoamento superficial direto, favorecendo a ocorrência de inundações (TUCCI, 1997; YUSUF, 2019).

Uma das cidades que sente as consequências dessa falta de planejamento é Aracaju, onde está localizado o bairro Santa Maria, que começou a ser habitado em 1932, quando da retificação do canal Santa Maria. Por se tratar de um núcleo que não era reconhecido como bairro até o ano 2000, sua ocupação se deu forma desordenada e pouco planejada (VIEIRA, 2011).

Segundo Aracaju (2015b), o canal Santa Maria sofreu alterações de uso e forma desde sua criação até os dias atuais. A última obra que o canal recebeu ocorreu em 2015, quando foi realizada parte de sua dragagem, avaliada em R\$18.000.000,00 para resolver problemas de alagamentos na região. Hoje, há trechos com seções assoreadas e cobertas de vegetação, não identificáveis como um conduto hidráulico.

O objetivo deste trabalho, portanto, é avaliar o impacto que as ações de dragagem e o processo de urbanização provocou no sistema de macrodrenagem do bairro Santa Maria, situado na cidade de Aracaju, no estado de Sergipe, considerando também cenários futuros de ocupação, com base na máxima taxa de impermeabilização do solo permitida pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) municipal.

2 Referencial teórico

A alteração da resposta hidrológica de bacias urbanas em decorrência do processo de ocupação dessas áreas é objeto de diversos estudos. Rezende e Araújo (2015), analisando bacias urbanas em Mato Grosso e Goiás, relatam que o aumento das áreas impermeáveis está diretamente ligado à expansão da

urbanização, sendo o aumento da impermeabilização fator crítico para a redução da infiltração e aumento das vazões de pico.

Segundo Gonçalves, Batista e Ribeiro (2016), que analisaram as alterações em uma microbacia urbana em São Carlos/SP, o crescimento urbano relaciona-se ao aumento da impermeabilização de terras, que, por sua vez, altera os caminhos das águas pluviais, principalmente seu destino, com interferência significativa no ciclo hidrológico da região.

Já Rodrigues e Blanco (2018) investigaram as vazões de pico na bacia hidrográfica do Igarapé do Urumari, em Santarém/PA, para três cenários: 1960, 2017 e um cenário futuro com ocupação máxima permitida em lei. De acordo com os pesquisadores, a vazão de pico no cenário futuro aumentou 2,24 vezes em relação ao cenário de 2017 e 6,80 vezes em relação ao de 1960. Esses valores foram relacionados ao grau de impermeabilização da localidade nos respectivos cenários: 2,96%, 62% e 90%.

Em Campina Grande/PB, Santos, Rufino e Barros Filho (2017) avaliaram o impacto da ocupação do solo e seus efeitos em uma região de urbanização consolidada. Em seu estudo, relatam que os alagamentos na região ocorrem pela falta de melhorias do sistema de micro-drenagem e pela elevada taxa de ocupação. Na região, a lei estabelece que as quadras devem ter ocupação máxima de 60%, embora tenha sido verificada ocupação de mais de 90%.

O processo de dragagem dos cursos d'água urbanos é comum no Brasil e tem como característica a alteração na geometria dos canais. O aumento da largura do canal alavanca a sua capacidade hidráulica, permitindo maiores vazões nos eventos de cheia, que, por seu turno, propiciam a erosão das margens, assoreando as seções à jusante. Somado a isso, a urbanização tende a intensificar o processo de erosão e a descarga de sedimentos grosseiros, o que reduz a sinuosidade do curso d'água, aumentando as velocidades de escoamento e a declividade do fundo (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Acercas dessas questões, Tasca *et al.* (2017) defendem que a eficácia de um sistema de drenagem está diretamente relacionada com o estudo hidrológico, o qual ampara o planejamento urbano. Tucci (2005) entende que os estudos hidrológicos de bacias urbanas muito se beneficiam do emprego de modelos computacionais, pois eles facilitam a realização de prognósticos e a investigação dos efeitos decorrentes de uma série de intervenções ou alterações realizadas na bacia hidrográfica, entendida como um sistema.

Dentre os modelos empregados em estudos de drenagem urbana estão os hidrodinâmicos, que usam métodos numéricos para resolver equações diferenciais parciais sem recorrer a simplificações (TUCCI, 2005). Um dos softwares que realiza a modelagem hidrodinâmica é o Storm Water Management Model (SWMM), que tem se mostrado confiável para estudos de dimensionamento de componentes de drenagem e de estruturas de retenção para controle de inundações e se destaca por ser gratuito, de código aberto e dotado de interface gráfica simples e intuitiva (ROSSMAN, 2015; GIRÃO et al., 2017). Além disso, pode ser utilizado em associação a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (BARCO; WONG; STENSTROM, 2008; HUANG; JIN, 2019).

3 Método da pesquisa

A região ao redor do canal Santa Maria foi delimitada por enquadramento da imagem de satélite, disponível na plataforma *Google Earth Pro* e exportada a partir do *Quantum Geographic Information System* (QGIS), um SIG gratuito e de código aberto. Utilizou-se a imagem de dezembro de 2003, por melhor retratar a região na situação inicial de urbanização, notadamente antes da pavimentação das vias (Figura 1).

Figura 1 – Imagem de satélite da região de estudo em dezembro de 2003



Fonte: Google Earth Pro 7.3.2 (2003).

3.1 Delimitação das sub-bacias

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) foram obtidos a partir do projeto TOPODATA, do Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2020). Foram obtidas duas quadrículas dos MDE com resolução de 30 m, com as quais foi gerado um mosaico, ponto de partida para a extração de curvas de nível para cada 1 m.

A análise primordial para a divisão da área em sub-bacias foi realizada automaticamente pelo algoritmo *r.watershed*, do complemento GRASS, disponível em conjunto com o QGIS. Estabeleceu-se o tamanho mínimo inicial das bacias de 1000 pixels para a geração do arquivo principal de delimitação de sub-bacias e 250 pixels para o posterior ajuste fino manual das divisões a partir das curvas de nível, para melhor correspondência com a realidade. O algoritmo *half-basins* foi executado para cada resolução separadamente.

3.2 Cenários de uso e ocupação do solo

Neste estudo, foram realizadas simulações da bacia do Canal Santa Maria para quatro cenários diferentes, definidos em função da ocupação da bacia e das condições do canal. O primeiro considerou a região de estudo em seu estágio inicial de urbanização, com as seções antigas do canal. O segundo cenário também considerou o estágio inicial da urbanização, porém com a dragagem do canal concluída. As informações referentes ao projeto de dragagem do canal foram cedidas pela Empresa Municipal de Obras e Urbanização (Emurb).

O terceiro cenário considerou o Canal Santa Maria dragado e a máxima impermeabilização prevista no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) de Aracaju (ARACAJU, 2000). No quarto cenário, a bacia tem a mesma impermeabilização do terceiro, porém com a urbanização e a ocupação da lagoa atualmente existente no bairro 17 de Março, para investigar a importância da lagoa para o desempenho do sistema de drenagem. O resumo dos cenários é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo dos cenários de estudo

Cen.	Dragagem	Estágio de impermeabilização	Condição da lagoa
1	Não realizada	Inicial (2003)	Preservada
2	Concluída	Inicial (2003)	Preservada
3	Concluída	Máximo por lei	Preservada
4	Concluída	Máximo por lei	Urbanizada

Fonte: elaborado pelos autores.

Para avaliar as possíveis consequências das mudanças no canal e da ocupação na região de estudo, os cenários foram comparados por meio das seguintes variáveis obtidas com a modelagem: volume de pico do escoamento superficial direto, vazão de pico unitária, relação y/D e velocidade de escoamento.

3.3 Modelagem dos dados

A modelagem hidrodinâmica do canal foi realizada no *software* SWMM, utilizando-se o modelo de onda dinâmica, e para a infiltração, o modelo do Soil Conservation Service (SCS). Foram adotadas as seguintes hipóteses, a fim de simplificar o modelo:

- A chuva é uniforme em toda a bacia;
- o escoamento superficial se dá apenas pela superfície da bacia;
- o escoamento pelo canal não considera contribuições irregulares de esgoto;
- a declividade das sub-bacias é uniforme;
- revestimento homogêneo do canal;
- desconsiderado o acúmulo de sedimento no canal.

Conforme Rossman (2015), as variáveis e os parâmetros das sub-bacias exigidos pelo SWMM para a modelagem hidrodinâmica são: precipitação; exutório; área de drenagem; largura característica; declividade média; fração impermeável da área; rugosidade; profundidade do armazenamento em depressão; e Número de Curva ou Curve Number (CN).

A largura característica da bacia é a razão da sua área pela média dos comprimentos máximos de escoamento (equação 1):

$$L = \frac{A}{l_m} \quad (1)$$

em que L é a largura característica da bacia (m); A é a área da bacia (m^2); l_m é a média dos comprimentos máximos de escoamento (m), dada pela equação 2:

$$l_m = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right] \quad (2)$$

em que Kc é o índice de compacidade da bacia (adimensional), dado pela equação 3:

$$Kc = \frac{0,28 \times P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

em que P é o perímetro da bacia (km) e A é área da bacia (km^2).

Para a declividade média das sub-bacias foi adotada a declividade do seu talvegue principal. Nos cenários 1 e 2, os talvegues foram definidos pelas curvas de nível. Com as alterações causadas pela urbanização, nos cenários 3 e 4 o direcionamento dos talvegues considerou a implantação dos canais de drenagem pluvial.

O cálculo do tempo de concentração considerou o percurso dentro da sub-bacia seguido pelo percurso no canal (equação 4):

$$t_c = t_{sb} + t_{can} \quad (4)$$

em que t_c é o tempo de concentração (min); t_{sb} é o tempo de escoamento na sub-bacia, seja na superfície ou em um canal dentro da sub-bacia (min); t_{can} é o tempo de escoamento no canal até o seu exutório (min), sendo t_{sb} e t_{can} calculados pelo método de Kirpich (equação 5):

$$t_c = 3,989 L^{0,77} S^{-0,385} \quad (5)$$

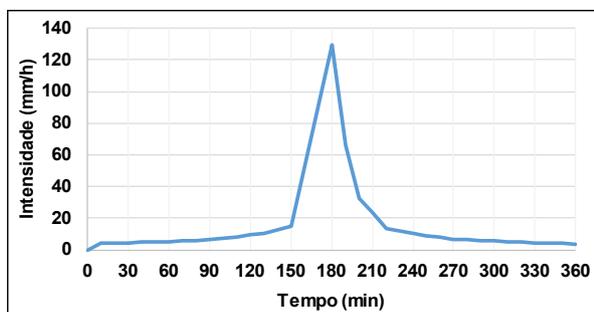
em que L é o comprimento do canal (km) e S é a declividade média da sub-bacia (m/m).

Adotou-se o tempo de concentração final como o maior tempo de concentração do percurso da água de cada sub-bacia até o exutório do canal Santa Maria.

Os parâmetros rugosidade da bacia e profundidade de armazenamento em depressão foram obtidos pela modelagem considerando a chuva ocorrida no dia 24/05/2015, que causou o transbordamento do Canal Santa Maria. Conforme o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o evento chuvoso daquele dia teve um acumulado de 101,5 mm (INMET, 2020), sendo, dessa forma, adotado um hietograma com altura acumulada semelhante (Figura 2). Dentre os possíveis valores para o armazenamento em depressão, Rossman (2015) indica a faixa de 1,27 a 2,54 mm para superfícies impermeáveis e de 2,54 a 7,62 mm para superfícies permeáveis. Para o evento

chuvoso de 24/05/2015, chegou-se ao transbordamento do canal com 1,91 mm nas superfícies impermeáveis e 5,08 mm nas superfícies permeáveis, valores próximos à média das respectivas faixas recomendadas.

Figura 2 – Hietograma de entrada baseado no evento chuvoso de 24/05/2015



Fonte: elaborado pelos autores.

Para os cenários 1 e 2, que refletem a situação da região no ano de 2003, foram consideradas duas categorias de ocupação do solo: permeável e impermeável. A primeira englobou todas as áreas não ocupadas para habitação, uso industrial ou outros fins. Para a segunda, todas as áreas que transformaram o solo, impermeabilizando-o (vias pavimentadas com asfalto, residências, indústrias e afins). Nos cenários futuros 3 e 4, considerou-se a ocupação do solo em toda a área ocupável da região de estudo conforme o PDDU (ARACAJU, 2000). O Quadro 1 apresenta o parcelamento aplicado para áreas ocupáveis nos cenários 3 e 4.

Com base nos dados da Carta de Solos de Aracaju (ARACAJU, 2004), classificaram-se os solos nos grupos A, B e C (TUCCI, 2001) para obtenção dos valores de CN, os quais são apresentados no Quadro 2.

Quadro 1 – Parcelamento e uso do solo aplicado aos cenários futuros

ÁREA TOTAL (100%)		Doação ao Poder Público Municipal		Fração impermeável	Fração permeável
		Área verde	15%	-	15%
		Ruas, passeios e urbanização	20%	20%	-
		Área de lotes			
65%		Permeabilidade mínima obrigatória do lote	5%	-	3,25%
		Área impermeável máxima do lote	95%	61,75%	-
		FRAÇÃO TOTAL		81,75%	18,25%

Fonte: Aracaju (2000).

Quadro 2 – Valores de CN adotados no estudo

Descrição do uso do solo A		Tipo do solo		
		B	C	
Área permeável	Matos e gramas cobrem 75% ou mais da área	39	61	74
	Matos cobrem 50 a 75% da área	49	69	79
	Terra	72	82	87
Área impermeável	Lotês residenciais até 500 m² e 65% de taxa de impermeabilização	77	85	90

Fonte: Adaptado de Collischonn e Dornelles (2015).

Os hietogramas de entrada foram elaborados a partir da curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) válida para Aracaju (ARAGÃO et al., 2013), exposta na Equação 6:

$$i = \frac{1092,22 \times T^{0,196}}{(t + 9,32)^{0,736}} \quad (6)$$

em que i é a intensidade da chuva (mm/h); T , o período de retorno (ano); t , a duração (min).

Para definir a duração da chuva, foi avaliada a variação da vazão de pico com o aumento da duração da chuva, pela construção de um modelo concentrado da bacia no SWMM, no qual o escoamento superficial segue diretamente para o exutório, desconsiderando a existência do canal.

Na modelagem do canal, ele foi dividido em 8 condutos, identificados de C1 a C8, a partir dos exutórios das sub-bacias. Segundo Rossman (2015), os parâmetros dos condutos necessários para a modelagem hidrodinâmica são: nós de entrada e de saída do conduto; geometria da seção transversal; comprimento; e rugosidade do conduto. Pela Equação de Manning (Equação 7), o SWMM relaciona tais parâmetros à vazão escoada:

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{2/3} \times \sqrt{S} \quad (7)$$

em que Q é a vazão escoada (m^3/s); A é a área molhada da seção transversal do conduto (m^2); R_h é o raio hidráulico da seção transversal (m); S é a declividade do conduto (m/m) e n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Foi considerado que o canal, antes de sua dragagem, apresentava-se coberto de vegetação e com lixo e, após a dragagem (Figura 3), como sendo limpo e, como revestimento, solo em boas condições. Embora a situação atual do canal seja dissemelhante ao adotado no projeto de dragagem, conforme mostrado nas Figuras 4, 5 e 6, modelou-se o canal nos cenários 2 a 4 sob as condições de projeto, ou seja, sob as melhores condições de uso.

Figura 3 – Obra de dragagem do canal Santa Maria



Fonte: Aracaju (2015a).

Figura 4 – Canal Santa Maria, conduto 3 em 2019



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 5 – Canal Santa Maria, conduto 7 em 2019



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 6 – Canal Santa Maria, conduto 8 próximo ao exutório em 2019



Fonte: elaborado pelos autores.

4 Resultados e discussão

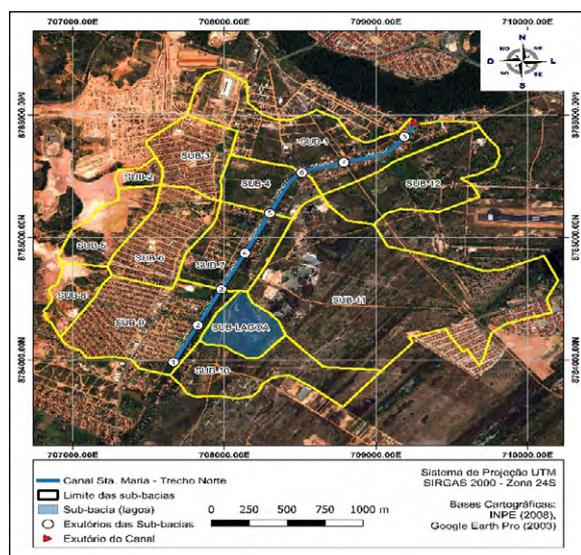
A bacia de contribuição do canal Santa Maria apresenta uma área de 539,02 ha e foi dividida em 13 sub-bacias, apresentadas na Figura 7.

4.1 Alteração do uso e ocupação do solo

A taxa de impermeabilização média do solo para ambos os cenários 1 e 2, que retratam a situação inicial de urbanização, foi de 18,00%. Esse percentual cresceu três vezes para os cenários 3 e 4 de urbanização consolidada, referentes à ocupação projetada para o ano de 2050 (Figura 8).

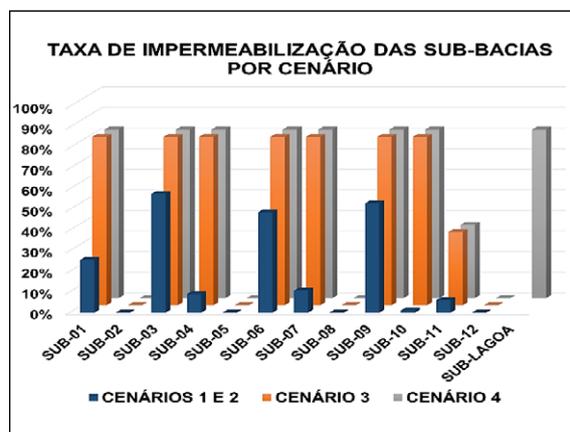
No cenário 3, a taxa de impermeabilização alcançou 54%. O cenário 4, que considera a ocupação da lagoa, apresentou uma taxa de impermeabilização do solo de 55% da área total. Este valor é muito próximo do relatado por Santos, Rufino e Barros Filho (2017), que verificaram taxa de impermeabilização do solo de 57% para bairros de urbanização consolidada com problemas frequentes de inundação em Campina Grande/PB.

Figura 7 – Área de estudo com a divisão das sub-bacias do canal Santa Maria



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 8 – Impermeabilização das sub-bacias do canal Santa Maria em cada cenário



Fonte: elaborado pelos autores.

4.2 Duração da chuva de projeto

Na modelagem da bacia concentrada, para a determinação da duração da chuva de projeto, a bacia foi considerada com as seguintes características: área de 539,02 ha; largura média de 5397,11 m; declividade média de 1,78%; 55% de área impermeável; e CN médio igual a 70. Os outros parâmetros são iguais aos escolhidos na modelagem das sub-bacias.

O tempo de concentração obtido para a região de estudo, considerando todas as sub-bacias, foi de 180 minutos. Assim, adotou-se um passo de tempo de 20 minutos no hietograma de projeto. Foram elaborados hietogramas de diferentes durações e período de retorno de 30 anos. As vazões de pico obtidas para cada duração estão dispostas na Tabela 2. Nota-se, com o aumento da duração da chuva, a diminuição da variação percentual da vazão, que gradativamente perde significância. A partir de 360 minutos de duração de chuva, a vazão de pico passou a variar menos que 1,0%.

Tabela 2 – Variação da vazão de pico com a duração da chuva

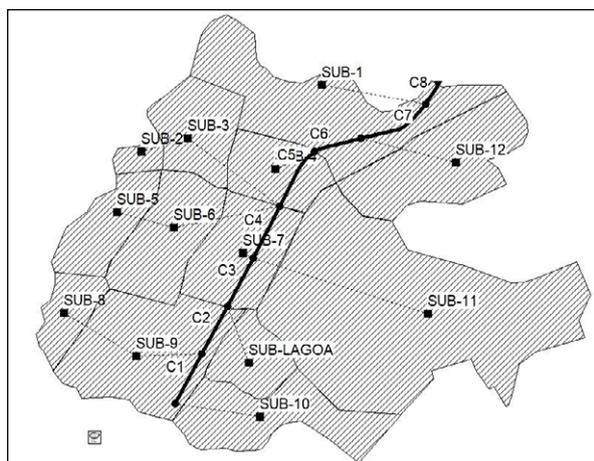
Duração da chuva (min)	Vazão de pico (m³/s)	Variação da vazão
60	180,503	-
120	188,215	4,27%
180	191,787	1,90%
240	194,580	1,46%
300	196,947	1,22%
360	198,998	1,04%
420	200,795	0,90%
480	202,380	0,79%
540	203,788	0,70%
600	205,043	0,62%

Fonte: elaborado pelos autores.

4.3 Volume de escoamento superficial direto (ESD)

A Figura 9 apresenta a representação da divisão das sub-bacias no SWMM, com finalidade meramente ilustrativa.

Figura 9 – Modelo das sub-bacias no SWMM

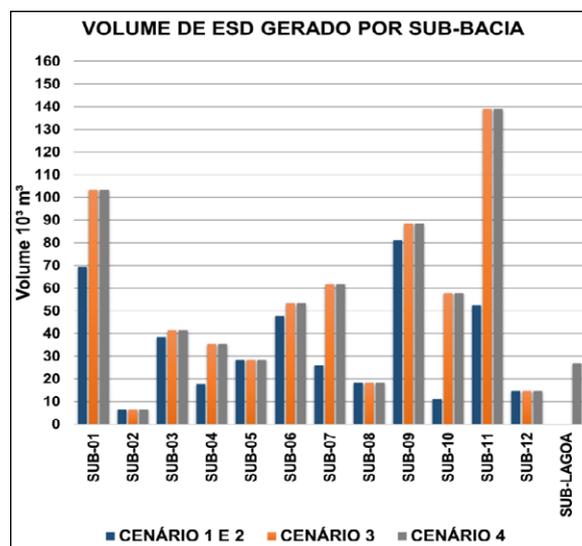


Fonte: elaborado pelos autores.

As sub-bacias que apresentavam baixa impermeabilização nos cenários 1 e 2 registraram o maior aumento de volume de ESD, conforme apresentado na Figura 10. A SUB-10, por exemplo, com 0,93% de área impermeável nos cenários 1 e 2, gerou um volume de ESD 5,3 vezes maior após a impermeabilização máxima prevista por lei. A superfície da SUB-03, por sua vez, já era 57,65%

impermeabilizada nos cenários 1 e 2, apresentando, assim, um crescimento menor do volume de ESD com a urbanização consolidada. No geral, após a urbanização consolidada, o volume de ESD apresentou um crescimento maior que 50% comparando-se os cenários 2 e 3.

Figura 10 – Volume de ESD gerado nas sub-bacias



Fonte: elaborado pelos autores.

Yusuf (2019), analisando a capacidade de um canal na rodovia Jalan Pagarsih na cidade Bandung, na Indonésia, também relata que, após ocorrer excesso de impermeabilização do solo por construções inadequadas, é gerado escoamento superficial excessivo, aumentando a descarga no sistema de drenagem.

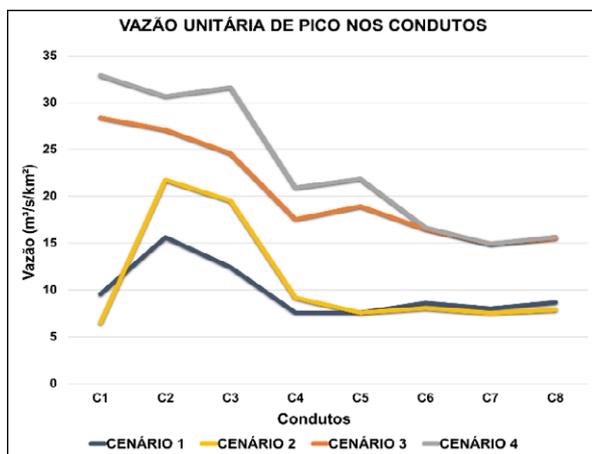
4.4 Vazão de pico unitária

No cenário 1, a vazão de pico unitária foi máxima no conduto C2, uma vez que ele recebe a contribuição de uma sub-bacia de expressiva taxa de impermeabilização, a SUB-9. Após o conduto C4, a vazão unitária no cenário 1 tendeu a um valor constante até o fim do escoamento no canal.

O cenário 2 apresentou vazão de pico unitária 40% maior no conduto C2 e 57% maior no conduto C3; a vazão de pico no conduto C2 foi 17,04 m³/s no cenário 1 e 23,71 m³/s no cenário 2 para as mesmas sub-bacias de contribuição (Figura 11). Esse resultado se justifica pela maior capacidade hidráulica do canal no cenário 2, apresentando seções transversais maiores e menor coeficiente de rugosidade, por conseguinte, escoando maiores volumes de água nos trechos iniciais. Porém,

o aumento das seções perde significância ao longo do escoamento devido à mudança de outras variáveis, como a declividade.

Figura 11 – Vazão de pico unitária nos condutos para os diferentes cenários



Fonte: elaborado pelos autores.

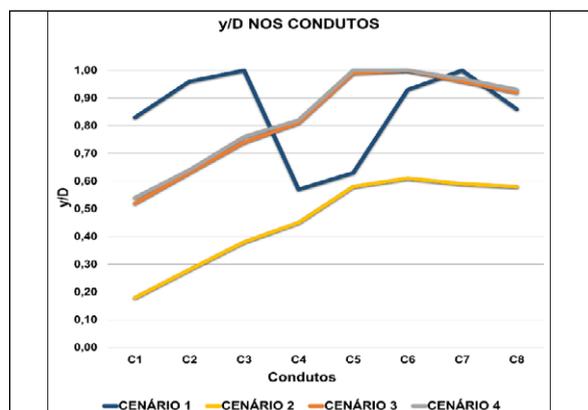
Comparando-se o cenário 2 com o cenário 3, nota-se como impacto da urbanização o aumento da vazão de pico em todos os condutos, com crescimento de até 150%. Em outra situação, a comparação do cenário 4 com o cenário 3 mostra um aumento na vazão unitária de pico dos condutos C1 até o C5, com destaque para o crescimento no conduto C3. Tal fenômeno deve-se ao fato de que a contribuição da sub-bacia da lagoa, que no cenário 4 gera ESD, chega ao canal pelo conduto C3.

4.5 Relação y/D

No cenário 1, os condutos manifestaram falta de capacidade hidráulica para o escoamento do volume gerado pela bacia de contribuição. Os condutos C2 e C6 apresentaram y/D máximo superior a 0,9 (Figura 12), acima da recomendação de São Paulo (2012), que aconselha uma borda livre de, pelo menos, 10% da dimensão vertical. Nos condutos C3 e C7, a lâmina de água superou a capacidade do conduto, ou seja, houve o transbordamento do canal.

No cenário 2, a dragagem do canal mostrou efetividade. Todos os condutos apontaram capacidade hidráulica para o escoamento gerado, com y/D máximo de 0,61 no conduto C6.

Figura 12 – Relação y/D dos condutos do canal nos diferentes cenários



Fonte: elaborado pelos autores.

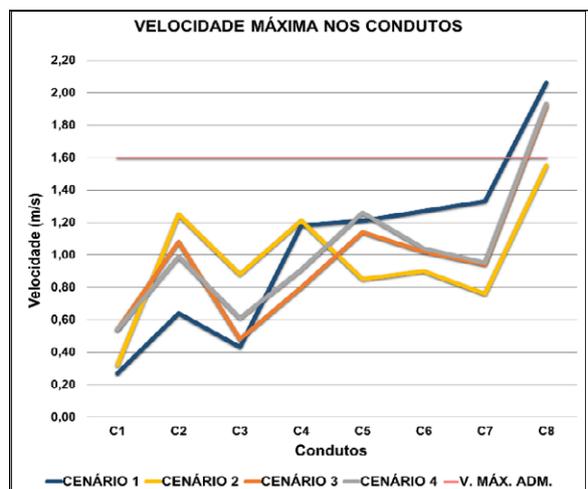
No cenário 3, porém, percebe-se que as ações de urbanização do bairro, com o aumento da área impermeabilizada, tornaram a dragagem insuficiente para o escoamento no canal. A partir do conduto C5, todos os condutos ultrapassaram a recomendação de borda livre de São Paulo (2012), com o conduto C6 apresentando transbordamento.

Com a impermeabilização da região da lagoa, simulada no cenário 4, a situação torna-se ainda mais grave, com o aumento da relação y/D máxima em todos os condutos e ocorrência de transbordamento nos condutos C5 e C6.

4.6 Velocidade do escoamento

A velocidade de pico do escoamento nos condutos é mostrada na Figura 13.

Figura 13 – Velocidade de pico nos condutos do canal Santa Maria em diferentes cenários



Fonte: elaborada pelos autores.

Para a urbanização inicial (cenários 1 e 2), a velocidade de pico nos condutos variou, principalmente, conforme o coeficiente de rugosidade. Do início do escoamento até o conduto C4, os condutos pré e pós-dragagem possuem declividades similares. Devido a isso, os condutos C1, C2 e C3 apresentaram maiores velocidades no cenário 2 por possuírem um menor coeficiente de rugosidade, o que facilita o escoamento. A partir do conduto C4, porém, os condutos apresentam declividade mais acentuada no cenário 1 do que no cenário 2. Assim, mesmo com maior coeficiente de rugosidade, os condutos C5 até C8 apresentaram maior velocidade no cenário 1, devido à sua maior declividade em relação ao cenário 2.

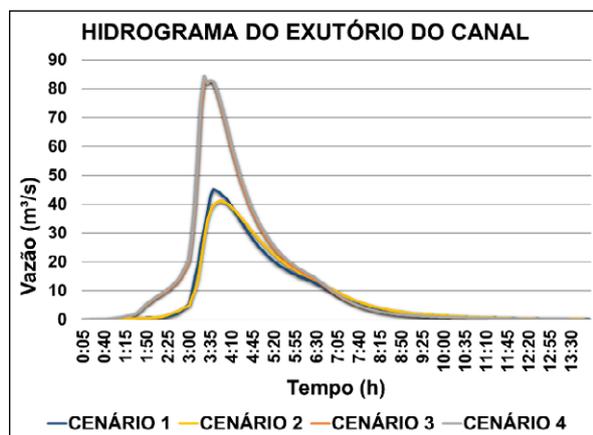
A urbanização da sub-bacia da lagoa faz com que o ESD gerado nessa sub-bacia contribua para o conduto C3 e, assim, notou-se uma diminuição da velocidade à montante e aumento, à jusante.

Segundo Rio de Janeiro (2010), a velocidade máxima admissível entre os diferentes solos em canais sem revestimento é de 1,6 m/s. Porém, percebe-se que a velocidade no conduto C8 ultrapassa esse limite nos cenários 1, 3 e 4. A extrapolação desse limite põe em risco a estabilidade dos taludes do canal, podendo levar à erosão do leito, comprometendo a capacidade hidráulica do conduto.

4.7 Hidrograma no exutório

O hidrograma de cheia observado no exutório da bacia de contribuição do canal Santa Maria é mostrado na Figura 14 para cada cenário de simulação.

Figura 14 – Hidrograma no exutório da bacia de contribuição do canal Santa Maria



Fonte: elaborado pelos autores.

Para os cenários 1 e 2, que possuem a mesma taxa de impermeabilização, o hidrograma apresenta uma pequena diferença em seu pico. Essa dissemelhança foi ocasionada pela diferença de velocidade entre os dois cenários causada pela dragagem do canal. Assim, como o cenário 1 apresenta maior velocidade no exutório, a sua vazão de pico alcança valor um pouco maior que o obtido no mesmo ponto no cenário 2: 45,22 m³/s e 41,12 m³/s, respectivamente.

Quando são comparados os cenários 1 e 2 com os cenários 3 e 4, a taxa de impermeabilização é o principal contraste: foi perceptível o expressivo aumento na vazão do exutório, atingindo um crescimento maior que 100% se comparado o cenário 2 aos cenários 3 e 4.

Brito *et al.* (2020) observaram aumento de 367% na vazão em um cenário urbanizado quando comparado a um cenário pré-desenvolvimento na região de recarga de aquífero da bacia do Paranoá, no Distrito Federal. Para um cenário futuro com 80% de impermeabilização, Censi, Zanandrea e Michel (2017) verificaram um aumento em média da vazão em 3,5 vezes com período de retorno de 50 anos para uma bacia urbana em Ibirama/SC. Em São Carlos/SP, Benini e Mendiondo (2015) observaram vazão máxima na bacia do Mineirinho 319,4% maior para 2025, com Plano Diretor, quando comparada com seu cenário analisado em 2000.

Por fim, os cenários 3 e 4 apresentaram sensível variação em sua vazão de pico. O cenário 3 apresentou vazão de pico de 82,62 m³/s no exutório, enquanto o cenário 4 apresentou crescimento dessa vazão, atingindo 84,47 m³/s. Esse aumento foi ocasionado pela impermeabilização da sub-bacia da lagoa do bairro 17 de Março.

5 Conclusão

A bacia de contribuição do canal Santa Maria demonstrou heterogeneidade quanto ao grau de impermeabilização de sua superfície no estágio inicial de urbanização, indicando que a ocupação da região não ocorreu de maneira uniforme ao longo do tempo. Como resultado, o crescimento significativo de volume de escoamento superficial direto após a consolidação da urbanização se deu de forma mais intensa nas sub-bacias menos impermeabilizadas no estágio inicial. Nessas áreas, os volumes de escoamento aumentaram expressivamente, chegando a ser 5 vezes maior em uma das sub-bacias analisadas.

O projeto de dragagem do canal Santa Maria prevê melhoraria significativa no desempenho hidráulico do canal pelo aumento de sua capacidade de escoamento e, assim, evitando transbordamentos. Porém, os ganhos obtidos com a dragagem poderão ser perdidos no futuro. O projeto de dragagem demonstrou ser insuficiente para atender à demanda num cenário de máxima impermeabilização permitida pela legislação municipal, pois o canal, mesmo dragado, não suportará o escoamento gerado com a urbanização consolidada. Essa situação é ainda um pouco mais crítica no cenário de ocupação da lagoa do bairro 17 de Março e seu entorno, visto que ela atua como uma pequena bacia de retenção das chuvas.

Ressalta-se que as simulações deste estudo não consideraram situações que se apresentam na região, como lotes com fração permeável menor do que a exigida por lei, o lançamento nos canais de esgotos sem tratamento e de resíduos sólidos e o arraste, até os canais, dos sedimentos gerados por construções, movimentos de terra e limpeza dos lotes. A consideração de tais fatores nas simulações acarretaria um desempenho hidráulico pior do que o obtido neste estudo.

Fica evidente que os projetos de drenagem que se baseiam apenas em aumento da capacidade hidráulica do canal, por dragagem ou aumento das dimensões da calha, perdem sua eficiência ao longo do tempo, devido ao aumento contínuo da taxa de impermeabilização. Isso se dá pelo fato de essas ações não atuarem sobre a causa das inundações, que é a geração excessiva de escoamento superficial direto. Nesse sentido, o Poder Público deve considerar, na concepção de projetos de drenagem, medidas que interfiram diretamente sobre o balanço hídrico nos lotes, tanto atenuando a parcela da chuva que se transforma em escoamento como retardando ao máximo a ocorrência do pico do escoamento. A revisão dos critérios de parcelamento e uso do solo, para favorecer a manutenção de áreas para infiltração, e o incentivo à implantação de estruturas para armazenamento das águas pluviais dentro dos lotes são ações que, em conjunto com a construção e manutenção de canais, podem melhorar a longo prazo a eficiência do sistema de macrodrenagem urbana.

REFERÊNCIAS

ARACAJU. **Lei Complementar nº 42 de 4 de outubro de 2000**. Institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Aracaju, cria o sistema

de planejamento e gestão urbana e dá outras providências. Aracaju, 2000. Disponível em: <http://leismunicipa.is/hikdg>. Acesso em: 10 jan. 2020.

ARACAJU. **PMA acelera andamento da obra de dragagem do canal Santa Maria**. 08 out. 2015a. Disponível em: <https://www.aracaju.se.gov.br/noticias/66719> Acesso em 18 jan. 2020.

ARACAJU. **Prefeitura de Aracaju dá início à obra do Canal do Santa Maria**. 29 abr. 2015b. Disponível em <https://www.aracaju.se.gov.br/noticias/64642>. Acesso em 18 jan. 2020.

ARACAJU. Secretaria de Planejamento. **Mapa geoambiental de Aracaju – Carta de avaliação da ocupação em função da recomendação do uso do solo**. Aracaju, 2004. Disponível em: https://www.aracaju.se.gov.br/userfiles/seplan/arquivos/geoambiental/Legisla%c3%a7%c3%a3o_Final_Geral.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020.

ARAGÃO, R.; SANTANA, G. R.; COSTA, C. E. F. F.; CRUZ, M. A. S.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 3, p. 243-252, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/BhXZtxVXDqwJjwLD9X6GXS/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 dez. 2019.

BARCO, J.; WONG, K. M.; STENSTROM, M. K. Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s.l.], v. 134, n. 4, p. 466-474, abr. 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:4\(466\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:4(466)). Acesso em: 10 dez. 2019.

BENINI, R. de M.; MENDIONDO, E. M. Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho. **Floresta e Ambiente**, [s.l.], v. 22, n. 2, p. 211-222, jun. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.103114>. Acesso em: 10 jan. 2020.

BRITO, A. J. de; CONSERVA, C. dos S.; ARAUJO, C. B.; LAVINAS, E. C.; ANDRADE, L. M. S. de. Expansão Urbana e Drenagem: Análise das soluções propostas para manejo de águas pluviais em região produtora de água na bacia do Paranoá, DF. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [s.l.], v. 9, p. 588-605, 21 fev. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020588-605>. Acesso em: 15 mai. 2020.

BRITO, F.; HORTA, C. J. G.; AMARAL, E. F. L. **A urbanização recente no Brasil e as**

aglomerações metropolitanas. 2001. Disponível em: <http://www.ernestoamaral.com/docs/presentations/IUSSP2001apaper.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2020. Acesso em: 10 jan. 2020.

CENSI, G.; ZANANDREA, F.; MICHEL, G.P. Impactos da urbanização sobre o sistema de drenagem de uma bacia urbana em Ibirama, SC. In: **Anais XXII SBRH – Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, SC, 2017. Florianópolis: ABRH, 2017. Disponível em: <http://anais.abrhidro.org.br/works/2132>. Acesso em: 27 abr. 2020.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2015.

GIRÃO, L. F. O.; SIMÕES, N. E. C.; MARQUES, J. A. A. S.; LEITÃO, J. P. C.; PINA, R. D. Modelação hidráulica e de qualidade da água dos sistemas de drenagem em meios urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 22, n. 2, p. 351-360, mar. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016161318>. Acesso em: 19 dez. 2019.

GONÇALVES, L. M.; BAPTISTA, L. F. S.; RIBEIRO, R. A. O uso de técnicas compensatórias de drenagem para controle dos impactos na urbanização. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 92-106, maio 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17271/19800827112016>. Acesso em: 19 dez. 2019.

GOOGLE EARTH PRO 7.3.2. Aracaju, SE. Coordenadas 24L, E 708429.29m, N 8785195.28m. Data da visualização: 30 jan. 2020. Data da imagem: 08 dez. 2003.

HUANG, M.; JIN, S. A methodology for simple 2-D inundation analysis in urban area using SWMM and GIS. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 97, p. 15-43, maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03623-2>. Acesso em: 10 jan. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Banco de Dados Meteorológicos Para Ensino E Pesquisa (BDMEP).** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 18 fev. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil.** 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>. Acesso em: 30 jan. 2020.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem Urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

REZENDE, G. B. M.; ARAÚJO, S. M. S. Análise da taxa de impermeabilização e tempo de concentração nas sub-bacias da área urbana de Barra do Garças – MT, Pontal do Araguaia – MT e Aragarças – GO. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 10, n. 5, p. 27-37, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.18378/rvads.v10i5.3727>. Acesso em: 10 dez. 2019.

RIO DE JANEIRO (Cidade). **Instruções Técnicas para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulico de Sistemas de Drenagem Urbana.** Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/1377338/DLFE-215301.doc/InstrucoesTecnicasProjetosdeDrenagem1.versao.doc>. Acesso em: 29 fev. 2020.

RODRIGUES, L. L.; BLANCO, C. J. C. Vazão de pico em uma bacia hidrográfica com diferentes níveis de urbanização em Santarém/PA. **Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais**, [s.l.], v. 9, n. 7, p. 62-75, 24 set. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2018.007.0007>. Acesso em: 10 dez. 2019.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1.** Cincinnati: United States Environmental Protection Agency, 2015.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; BARROS FILHO, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande - PB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 22, n. 5, p. 943-952, 6 jul. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016146661>. Acesso em: 10 dez. 2019.

SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais**, volume II. Aspectos tecnológicos: fundamentos. São Paulo, 2012. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento_urbano/arquivos/manual-drenagem_v2.pdf. Acesso em: 10 dez. 2019.

TASCA, F. A.; FINOTTI, A. R.; POMPÊO, C. A.; GOERL, R. F. O papel da drenagem urbana na prevenção de desastres hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Itajaí Açu. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 69/1, p. 129-142, fev. 2017. Disponível em: <http://>

www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44036. Acesso em: 10 jan. 2020.

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. In: **Água Doce**. UFRGS, 1997. Disponível em http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/importacao/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/outros_documentos_tecnicos/curso-gestao-do-territorio-e-manejo-integrado-das-aguas-urbanas/aguameio%20urbano.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. In: TUCCI, Carlos e M. (org.) **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001. p. 391-442. (v. 4)

TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS M. T. (Orgs.) **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH; Editora da UFRGS, 1995. (p. 15-36)

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

VIEIRA, E. C. J. **Políticas Urbanas e Imagens da Cidade: Da “Terra Dura” ao Bairro de “Santa Maria” em Aracaju-SE**. 232f. Dissertação (Mestrado em Sociologia) –Núcleo de Pós-graduação e Pesquisa em Ciências Sociais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011.

YUSUF, R. Study of Urban Drainage Network Performance in Maximum Discharge Storage in the City of Bandung. **Kne Social Sciences**, [s.l.], v. 3, n. 12, p. 711-722, 25 mar. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18502/kss.v3i12.4143>. Acesso em: 20 jan. 2020.