



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

HIÊGOR BARRETO RODRIGUES
WILLAMS ANDRADE LIMA

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MACRODRENAGEM DO TRECHO NORTE DO
CANAL SANTA MARIA EM ARACAJU-SE PARA URBANIZAÇÃO FUTURA**

SÃO CRISTÓVÃO, SE
2020

HIÊGOR BARRETO RODRIGUES
WILLAMS ANDRADE LIMA

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MACRODRENAGEM DO TRECHO NORTE DO
CANAL SANTA MARIA EM ARACAJU-SE PARA URBANIZAÇÃO FUTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe (UFS), para
encerramento do componente curricular
ENCIV0157 – Trabalho de Conclusão de Curso
e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes

São Cristóvão, SE
2020

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

Aprovado em: ____ / ____ / _____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes – Universidade Federal de Sergipe
(Presidente) Nota _____

Bel. Eng. Civil Leonardo de Carvalho Souza Santa Rita – Universidade Federal de Sergipe
(Examinador 1) Nota _____

Bel. Eng. Civil Yuri Batista Ishizawa – Universidade Federal de Sergipe
(Examinador 2) Nota _____



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
 MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
 UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
 CONSELHO DO ENSINO, DA PESQUISA E DA EXTENSÃO
 RESOLUÇÃO Nº 10/2014/CONEPE



ANEXO II

SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO ELETRÔNICA

Autorizo a Universidade Federal de Sergipe a disponibilizar, através de seu Repositório Institucional e catálogo online do Sistema de Bibliotecas, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9.610/98, o texto integral da obra abaixo citada, em formato digital, para fins de leitura, impressão e download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir da data abaixo firmada.

() Especialização (X) Graduação () Residência médica

Núcleo/Departamento: Departamento de Engenharia Civil (DEC)

Título: AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MACRODRENAGEM DO TRECHO NORTE DO CANAL SANTA MARIA EM ARACAJU-SE PARA URBANIZAÇÃO FUTURA

Autor: HIÉGOR BARRETO RODRIGUES

CPF: 074.723.215-67

E-mail: hiegorbr@gmail.com

Autor: WILLAMS ANDRADE LIMA

CPF: 046.192.055-75

E-mail: willams.andradelima@gmail.com

Orientador: Prof. Dr. LUDMILSON ABRITTA MENDES

CPF: 032.953.426-28

E-mail: lamendes@ufs.br

Data de conclusão: 04 de abril de 2020.

Data de depósito: _____ de _____ de _____

Hiegor Barreto Rodrigues

 Assinatura do Autor

Willams Andrade Lima

 Assinatura do Autor

AGRADECIMENTOS

Muito se fala sobre gratidão e a sua importância. Ao longo dos últimos anos, aprendi mais sobre agradecer e como isso é essencial e engrandecedor na vida de qualquer ser humano. Assim, aqui ficam os meus agradecimentos aos que estiveram comigo nessa jornada, até nos pequenos detalhes. Não seria quem sou se não tivesse a sorte de ter pessoas tão incríveis ao meu lado.

Aos meus pais, Jéssica e Ivan, que nunca deixaram faltar nada, seja material ou imaterial. Vocês são minha fonte de inspiração, minha força e o motivo da minha busca incessante por ser sempre a minha melhor versão. Amo vocês.

Aos meus irmãos, Hivens e Hígor, que, assim como os meus pais, estão comigo desde que nasci. Não consigo nem imaginar o mundo sem vocês. Obrigado por todas as risadas, brigas e por tornarem o meu crescimento mais feliz. Vocês, sem dúvida, têm grande participação na moldagem do ser que sou hoje.

À minha namorada, Beatriz, por estar comigo durante toda essa jornada, nos altos e baixos, sendo sempre a minha fortaleza e me fazendo conhecer o mundo sob uma outra ótica. Te amo.

À Universidade Federal de Sergipe, mais especificamente, ao Departamento de Engenharia Civil, por todo aprendizado ao longo da graduação e pela oportunidade de conhecer diversas pessoas importantes para o meu crescimento. Dentre essas, um salve especial para Luís, Gustavo e Gabrielle, pois tive a sorte de tê-los mais próximos nessa jornada.

À DESO e a SGL, pela experiência proporcionada e grande contribuição na minha formação profissional.

Aos companheiros dessa jornada final: Will e Ludmilson. O primeiro como dupla, com uma sinergia impressionante. O segundo, como orientador e amigo, dando toda atenção e suporte necessário, inclusive sobre assuntos além dos muros da universidade. Sem vocês, o trabalho não seria tão divertido e prazeroso.

Por fim, sinto-me seguro para dizer que concluo essa etapa muito mais feliz, maduro e pronto para os próximos desafios que a vida me trará.

Obrigado a todos!

Hiêgor Barreto Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Ao final da década passada, a rainha Elizabeth II nos lembrou que é através dos pequenos passos que as maiores mudanças ocorrem. A chegada ao ponto final desta etapa ocorreu pela soma das pequenas conquistas ao longo dos anos, resultando na concretização de um sonho. É na chegada ao topo da escada deste trampolim que agradeço imensa e primeiramente a Deus, por ter criado este vasto e indecifrável universo. Ao universo por ter dado essa forma magnífica à nossa casa, o planeta Terra: arredondado, elipsoidal; o mais lindo geóide.

Agradeço à minha mãe, Edelma, que sempre me amou incondicionalmente, que me ensinou os melhores valores, que sempre me deixou repousar à sua sombra. Obrigado pelo amor que nem sempre pude retribuir como esperado. A senhora é uma grande parte desta conquista. Je t'aime!

À minha maninha, Stephany, que me deu tantas risadas nesse caminho. Obrigado por todo lanchinho e carinho que recebi quando passei horas olhando a tela de um computador. Obrigado também por me deixar sempre bonito e de cabelo arrumado, até nos dias mais loucos.

A meu namorado, Tynno, por incansavelmente estender-me a mão – as duas mãos – em todo e qualquer momento que precisei, até mesmo quando pensei que não precisei. Obrigado por nunca me deixar faltar amor, por me nutrir de bons sentimentos, por todo café quentinho, por tudo que ainda há de acontecer. Seu pinguinho te ama e amar-te-á!

À minha best friend, Mimary, por toda dose de sanidade e amizade firme que me deu. Obrigado por toda a paciência de me ouvir, até quando você estava sem tempo para você mesma. Não deixarei de ser Teu amigo, onde quer que eu esteja.

À meus familiares, como meus padrinhos e seus filhos – meus primos, que sempre depositaram tanta confiança em mim. Obrigado por me manterem sempre em suas orações.

À EMURB, por depositarem a confiança na ciência, e principalmente à COPLAN, onde fiz tantos laços. Agradeço aos meus colegas, supervisores e um valeuzão para Lucas, que dentro de seu universo me viu como um amigo e pôs tanto empenho para a realização deste trabalho. Andresa, obrigado pelo QGIS. Gilberto, por todo o ensinamento!

Ao ensino público brasileiro, onde sempre fui aluno e construí meu caráter. Agradeço à Universidade Federal de Sergipe, por fritar meu cérebro, fazer meu estômago doer e meus olhos arderem, mas ainda assim me tornar um engenheiro. Agradeço aos melhores presidentes que este país, hoje em caos, já teve, Luiz Inácio Lula da Silva e Dilma Vana Rousseff, pela oportunidade da graduação sanduíche no exterior, e por prezar pelo mantimento do ensino público. Agradeço imensamente ao meu companheiro de TCC, Hiêgor, por, ufa... estar junto comigo neste último desafio, e ao nosso orientador, tio Lud; quem me mostrou que perder uma disciplina não quer dizer que não posso aprendê-la e aprender a amá-la.

Fará sol? Choverá? Arlequinal?! Por fim, agradeço a mim mesmo, por ter esticado meus 1,68 m até onde pensei que minha mão não alcançaria; e alcancei.

RESUMO

O Brasil tem processo de urbanização relativamente recente, com maiores mudanças datando da década de 1970. Tal crescimento quando ocorre sem parâmetros, ou com parâmetros indevidos, leva a um desenvolvimento desordenado que não necessariamente traz consigo melhorias na qualidade de vida. Neste processo, a impermeabilização de áreas urbanas se mostra quase inevitável e gera consequências devido à alteração do ciclo hidrológico, incidindo em novas implicações, muitas vezes desastrosas. Uma das cidades que sente as consequências da falta da devida aplicação de políticas públicas voltadas ao planejamento urbano é Aracaju (capital do estado de Sergipe), onde está localizado o Canal Santa Maria, que divide os bairros Santa Maria e 17 de Março. Este canal sofreu alterações de uso e forma desde sua criação até os dias atuais. O presente estudo teve como objetivo principal a avaliação do desempenho do sistema de macrodrenagem no bairro, considerando a ocupação com grau de urbanização inicial e futura, adotando-se a máxima taxa de ocupação da região de acordo com o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) de Aracaju. Foi tomada em consideração a dragagem do canal em 2015 na geração de quatro cenários: Cenário 1 com urbanização inicial e canal natural; cenário 2 com urbanização inicial e canal dragado; cenário 3 com urbanização máxima consolidada e dragagem do canal e cenário 4 com urbanização máxima consolidada incluindo a impermeabilização da lagoa da região e dragagem do canal. O estudo foi desenvolvido no *software* SWMM em conjunto com SIG e teve o trecho do canal analisado subdividido em oito condutos. Na determinação da duração da chuva, elaboraram-se hietogramas de diferentes durações adotando período de retorno de 30 anos. Os resultados apontaram impermeabilização de 18,00% da região de estudo nos cenários de urbanização inicial, contra 52,21% para o cenário 3 e 57,02% para o cenário 4. As sub-bacias que apresentaram baixa impermeabilização nos cenários 1 e 2 apresentaram a maior variação de volume de ESD gerado. A SUB-10, por exemplo, que possuía 0,93% de área impermeável, gerou um volume de ESD aproximadamente 5,3 vezes maior após a impermeabilização máxima prevista por lei. A urbanização da região da lagoa também gerou um crescimento no ESD considerável. No cenário 2, a dragagem do canal mostrou-se efetiva, enquanto no cenário 3 verificou-se a insuficiência da dragagem do canal. Com a impermeabilização da região da lagoa, a situação tornou-se ainda mais grave, provocando o aumento da relação y/D máxima em todos os condutos e causando transbordamento nos condutos 5 e 6.

Palavras-chave: urbanização, dragagem, canal, Aracaju, modelagem SWMM.

ABSTRACT

Brazil has a relatively recent urbanization process with major changes dating from the 1970s. Such growth, when it occurs without parameters, or with improper parameters, leads to a disorderly development that does not necessarily bring improvements in the quality of life. Given this, the impermeabilization of new urban areas proves to be almost inevitable and it has consequences due to alterations on the hydrological cycle, bringing new effects; which are often disastrous. One of the cities that experiences those consequences due to the lack of proper public policies aimed at urban planning is Aracaju (capital of the state of Sergipe, Brazil), where the Santa Maria channel is located, dividing the neighborhoods Santa Maria and 17 de Março. This channel has undergone changes in its use and shape since its construction until the present day. The present study aimed at assessing the performance of the stormwater system in that neighborhood, considering the land occupation at initial and future urbanization stages, adopting the maximum occupancy rate in the region according to the current municipal laws. The dredging of the channel in 2015 was taken into account when sorting four scenarios: Scenario 1 for initial urbanization degree along with the natural channel; scenario 2 for initial urbanization degree along with the dredged channel; scenario 3 for the maximum consolidated urbanization degree along with the dredged channel, and, lastly, scenario 4 for the maximum consolidated urbanization degree including the impermeabilization of a lagoon nearby together with the dredged channel. The study was developed using the SWMM software as well as GIS and it had the analyzed length of the channel divided into eight conduits. When determining the rain duration, different types of hyetographs were elaborated adopting a 30-year return period. The results showed an impermeabilization rate of 18.00% of the studied region in the initial urbanization scenarios against 52.21% for scenario 3 and 57.02% for scenario 4. The sub-basins that had low impermeabilization rates in scenarios 1 and 2 showed the greatest variations of runoff. The sub-basin SUB-10, which had 0.93% of impermeable area in the initial urbanization, had a runoff increase of about 5.3 times after it had been impermeabilized at its maximum. The urbanization of the lagoon region also showed a greater runoff. For scenario 2, the dredging of the channel proved to be effective while for scenario 3, the insufficiency of the dredging of the channel was clearly verified. Having the lagoon region impermeable made the whole scenario response to the precipitation more severe since it showed an increase in the maximum y/D ratio in all conduits as well as overflow was observed in the conduits 5 and 6.

Keywords: urbanization, dredging, channel, Aracaju city, SWMM modelling.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa

EMURB – Empresa Municipal de Obras e Urbanização de Aracaju

EPA – *Environmental Protection Agency*

EPSCG – *European Petroleum Survey Group*

ESD – Escoamento Superficial Direto

GeoTIFF – *Geostationary Earth Orbit Tagged Image File Format*

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDE – Modelo Digital de Elevação

PDDU – Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano

QGIS – *Quantum Geographic Information System*

SCS – *Soil Conservation Service*

SIRGAS – Sistema de Referencia Geocêntrico para as Américas

SRC – Sistema de Referência de Coordenadas

SWMM – *Storm Water Management Model*

TIFF – *Tag Image File Format*

USGS – *United States Geological Survey*

USDA – *United States Department of Agriculture*

UTM – *Universal Transverse Mercator Coordinate System*

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Seções dos condutos pré-dragagem.....	69
Anexo B – Seções dos condutos pós-dragagem.....	71
Anexo C – Macrozoneamento de Aracaju.....	73

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Hietogramas.....	75
Apêndice B – Talvegues Cenários 1 e 2.....	78
Apêndice C – Talvegues Cenários 3 e 4.....	79
Apêndice D – Curvas de nível e talvegues.....	80
Apêndice E – Instantes de cheias nos cenários.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do leito maior e menor de um curso d'água	5
Figura 2 – Hidrograma hipotético de uma bacia natural e o resultante da urbanização.	6
Figura 3 – Hidrogramas em três diferentes cenários de ocupação do solo.....	7
Figura 4 - Campo térmico de Aracaju no período diurno em 15/01/2012.	8
Figura 5 – Curva de atendimento às demandas de drenagem urbana.....	11
Figura 6 – Área de trabalho do SWMM.....	13
Figura 7 - Localização da região de estudo	14
Figura 8 - Demarcação do bairro 17 de Março em imagem de satélite de 2011.	15
Figura 9 - Região dos bairros Santa Maria, 17 de março, Aeroporto e Zona de Expansão em diferentes anos.....	16
Figura 10 - Alagamento durante chuva no bairro Santa Maria	17
Figura 11 - Carta Corográfica de Sergipe Del Rey, 1844	18
Figura 12 - Dragagem do canal Santa Maria em outubro de 2015.....	19
Figura 13 - Situação atual do canal Santa Maria em dois diferentes trechos	20
Figura 14 - Imagem de satélite de da região de estudo em dezembro de 2003.....	21
Figura 15 – Área de trabalho do SWMM com imagem da bacia de estudo ao fundo.	25
Figura 16 – Ferramenta para inserção de seções irregulares no SWMM.....	32
Figura 17 - Divisão das sub-bacias projetada na imagem de satélite de 2003.....	36
Figura 18 - Uso e ocupação do solo nos cenários 1 e 2.....	37
Figura 19 - Uso e ocupação do solo no cenário 3.....	38
Figura 20 - Uso e ocupação do solo no cenário 4.....	39
Figura 21 - Impermeabilização das sub-bacias.....	40
Figura 22 - Impermeabilização do sistema por cenário	41

Figura 23 – Modelo com as sub-bacias em destaque no <i>software</i> SWMM.	42
Figura 24 – Modelo concentrado da bacia no <i>software</i> SWMM.....	44
Figura 25 – Modelo com os condutos em destaque no <i>software</i> SWMM.	46
Figura 26 – Situação do Canal Santa Maria em 2019 nas proximidades do conduto 1	48
Figura 27 - Situação do Canal Santa Maria para o conduto 3 em 2019 (esquerda) e durante das obras de dragagem (2015).....	48
Figura 28 - Situação do Canal Santa Maria para o conduto 5 em 2019	48
Figura 29 - Situação do Canal Santa Maria para o conduto 6 em 2019	49
Figura 30 - situação do Canal Santa Maria para os condutos 7 (esquerda) e 8 (direita), nas proximidades do exutório do trecho do canal em 2019.....	49
Figura 31 - Volume de pico de escoamento gerado nas sub-bacias	50
Figura 32 - Volume de pico de escoamento gerado pelo sistema nos diferentes cenários.....	51
Figura 33 - Vazão de pico unitária nos condutos para os diferentes cenários.....	52
Figura 34 - Sistema de drenagem existente na SUB-3.....	53
Figura 35 - Canais de drenagem existentes na SUB-6.....	54
Figura 36 – Canal de drenagem existem na SUB-5.....	54
Figura 37 - Relação y/D dos condutos do canal nos diferentes cenários	55
Figura 38 - Velocidade de pico nos condutos do canal em diferentes cenários	56
Figura 39 - Hidrograma no exutório do trecho analisado do Canal Santa Maria	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parcelamento e uso do solo aplicado aos cenários futuros.....	29
Quadro 2 - Grupos hidrológicos de solo.....	30
Quadro 3 - Valores adotados de CN para bacias urbanas e suburbanas.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos cenários de estudo do trabalho.....	24
Tabela 2 - Parâmetros das sub-bacias nos cenários 1 e 2.....	42
Tabela 3 - Parâmetros das sub-bacias no cenário 3.....	43
Tabela 4 - Parâmetros das sub-bacias no cenário 4.....	43
Tabela 5 – Variação das vazões de pico geradas por diferentes durações de chuva	45
Tabela 6 - Parâmetros dos condutos no cenário 1	46
Tabela 7 - Parâmetros dos condutos nos cenários 2, 3 e 4.....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Objetivos	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Urbanização e Manejo das Águas Urbanas	3
2.2 Impactos da urbanização	4
2.2.1 <i>Inundações</i>	4
2.2.2 <i>Alteração do ciclo hidrológico</i>	5
2.2.3 <i>Alteração no tempo de concentração</i>	7
2.2.4 <i>Aumento da Temperatura</i>	8
2.2.5 <i>Aumento de Sedimentos</i>	9
2.3 Técnicas compensatórias	9
2.4 Modelos Hidrodinâmicos	11
2.5 Storm Water Management Model (SWMM)	12
2.6 Região de Estudo	13
3 METODOLOGIA	21
3.1 Delimitação da área de estudo	21
3.2 Delimitação sub-bacias	22
3.3 Projetos	23
3.4 Cenários	24
3.5 Modelagem dos dados	24
3.5.1 <i>Modelagem das sub-bacias no SWMM</i>	25
3.5.2 <i>Condutos</i>	30
3.5.3 <i>Aproximação dos parâmetros do SWMM</i>	33
3.6 Estudo Hidrológico	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Cenários do uso e ocupação do solo	36
4.2 Caracterização hidrodinâmica das sub-bacias	41
4.2.1 <i>Modelo concentrado da bacia</i>	43

4.3 Caracterização dos condutos.....	45
4.4 Comparativos	49
4.4.1 <i>Volume de pico de ESD</i>	49
4.4.2 <i>Vazão de pico unitária.....</i>	51
4.4.3 <i>Relação y/D.....</i>	52
4.4.4 <i>Velocidade do escoamento.....</i>	55
4.4.5 <i>Hidrograma do exutório.....</i>	56
5 CONCLUSÃO	58
6 REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A expansão da urbanização no Brasil é relativamente recente, tendo seu início com um conjunto de mudanças na economia e na sociedade por volta da década de 1930. Como fruto da crescente urbanização, em 1970, o Brasil, pela primeira vez, apontou uma população urbana superior a rural. Assim como outros países em desenvolvimento, o Brasil tem como característica o acelerado processo de urbanização, aumentando em aproximadamente 7 vezes a sua população urbana na segunda metade do século XX (BRITO, HORTA e AMARAL, 2001).

Esse crescimento rápido e, principalmente, desordenado tem como consequência o desenvolvimento de cidades sem o planejamento necessário, que traz consigo uma série de implicações preocupantes na perspectiva ambiental e hidrológica. A ocupação desordenada, aliada à falta de planejamento do uso do solo, ocasiona cenários inconvenientes para o desenvolvimento, contribuindo para uma maior frequência de desastres hidrológicos, como enchentes, inundações e aumento da exposição a doenças de veiculação hídrica (TUCCI, 1995).

É comum encontrar consequências dessa falta de planejamento na grande maioria das cidades brasileiras de médio e grande porte. Após a ocupação do espaço, as soluções como canalizações, bombeamento, barragens e reservatórios se tornam cada vez mais caras e de difícil implementação (TUCCI, 1995).

Com a impermeabilização das áreas urbanas, as parcelas de infiltração, interceptação e escoamento são significativamente alteradas, afetando o ciclo hidrológico local. Com a diminuição da infiltração, o volume de água na superfície cresce, aumentando, conseqüentemente, o escoamento superficial, assim como as vazões máximas (TUCCI, 1997). Além da redução da infiltração, rebaixando o nível do lençol freático por diminuição da recarga, a urbanização também reduz a parcela de evapotranspiração, devido à menor retenção de água na superfície.

As medidas para controle de inundações podem ser do tipo estrutural e não-estrutural, e ambas podem ser realizadas na fonte, na microdrenagem ou na macrodrenagem. Visando ao controle no impacto do aumento do escoamento causado pela urbanização, a principal solução aplicada na macrodrenagem no cenário brasileiro é a canalização (TUCCI, 1997).

Uma das cidades que sente as consequências da falta de planejamento é Aracaju, onde está localizado o Bairro Santa Maria. A região começou a ser mais habitada por volta de 1932, quando houve a retificação do Canal do Santa Maria, viabilizando a navegação. Porém, o maior crescimento se deu na década de 1980, com a implantação de um “lixão” na região e a implementação de políticas urbanas de conjuntos habitacionais populares na área. Por se tratar de uma localidade que não era reconhecida como bairro até o ano 2000, a sua ocupação se deu de maneira desordenada e pouco planejada (VIEIRA, 2011).

O canal Santa Maria sofreu alterações de uso e forma desde sua criação até os dias atuais. A última obra que o canal recebeu data do ano de 2015, quando foi realizada uma dragagem, avaliada em 18 milhões de reais, para resolver problemas de alagamentos na região (ARACAJU, 2015b). Hoje, o canal apresenta trechos com seções assoreadas, não identificáveis como um conduto hidráulico e muitas outras cobertas por vegetação.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do sistema de macrodrenagem implantado no bairro Santa Maria, município de Aracaju, considerando a ocupação atual e a ocupação futura, baseando-se na taxa máxima de ocupação da região estabelecida pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) de Aracaju.

São objetivos específicos deste trabalho

- a) Avaliar o processo de urbanização da região do bairro Santa Maria, incluída na bacia de estudo;
- b) Realizar uma avaliação das bacias de contribuição do Canal Santa Maria, trecho norte;
- c) Simular as alterações no hidrograma de cheia do trecho norte do Canal Santa Maria a partir de cenários de uso do solo;
- d) Avaliar o comportamento do trecho norte do Canal Santa Maria para diferentes hidrogramas de cheia;
- e) Avaliar o impacto da urbanização da sub-bacia da lagoa do bairro 17 de Março.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Urbanização e Manejo das Águas Urbanas

Os cursos d'água foram imprescindíveis para a mudança comportamental da humanidade, do nomadismo para o sedentarismo, sendo o desenvolvimento das cidades em seu entorno um ponto em comum entre os povos que prosperaram ao longo da história. A proximidade de um corpo d'água favoreceu o crescimento das civilizações, visto que era utilizado para consumo, higiene e evacuação de dejetos, devido à falta de tecnologia e ferramentas para o transporte na época. Além disso, a água é essencial para agricultura e navegação comercial, fatores que foram determinantes no desenvolvimento das sociedades (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD, 2005).

Entretanto, a proximidade das cidades aos cursos d'água também desperta problemas causados pelo excesso de água em épocas de cheia, resultando em inundações frequentes nas regiões de margem dos corpos hídricos. Em função disso, os preceitos higienistas visam controlar os casos de doenças por veiculação hídrica através de canalizações dos corpos hídricos, alterando a relação entre o desenvolvimento urbano e o ambiente (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD, 2005).

A urbanização gera modificações no ecossistema da região, com a impermeabilização das superfícies e a alteração nos corpos hídricos através da retificação ou revestimento das margens, alterando os processos hidrológicos do local. A impermeabilização é a fonte das mudanças no comportamento do escoamento superficial, com a redução da infiltração e interceptação, gerando aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial. Já os cursos de água retificados ou revestidos possibilitam o escoamento mais rápido das águas, consequentemente aumentando o volume dos picos de cheia e antecipando a sua ocorrência. De maneira combinada, essas alterações no meio ambiente provocam inundações em áreas urbanas, que, por sua vez, geram perdas materiais e, por vezes, humanas (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD, 2005).

O impulsionamento da urbanização ocorreu com maior força no século XX, principalmente a partir da década de 50, quando a população urbana representava cerca de 25% da população mundial, com prospecção de o índice atingir mais de 60%

para o ano de 2025. (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD, 2005). No Brasil, a urbanização se sucedeu de forma ainda mais acentuada. Segundo o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população urbana em 1960 representava aproximadamente 45% da população do país, apresentando um crescimento vertiginoso, superando 84% no ano de 2010 (IBGE, 2010).

A urbanização brasileira tem se concentrado nas regiões metropolitanas e em cidades polos regionais, a exemplo de São Paulo, que apresenta características de urbanização de países desenvolvidos. Porém, a falta de planejamento urbano adequado para a crescente urbanização, traz diversos problemas para a população, como inundações e transporte de poluentes que afetam a qualidade dos corpos d'água (TUCCI, 2001a).

Segundo Tucci (2005a), há duas principais causas para os impactos devido à má drenagem urbana na maioria das cidades brasileiras: a ideia incorreta de que o melhor sistema de drenagem é o que retira o excesso de água com maior rapidez e a desconsideração da bacia como sistema de controle. Esse tipo de abordagem não objetiva a solução do problema, pois não atinge a causa, apenas transfere o problema para um ponto à jusante da bacia.

2.2 Impactos da urbanização

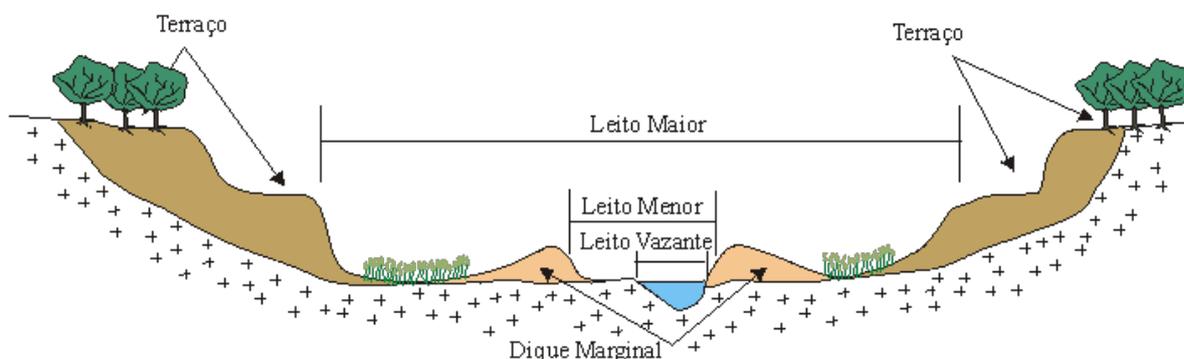
2.2.1 Inundações

Inundações em regiões urbanas podem ter origem em duas vertentes: devido a fatores fluviais ou a fatores pluviais. Ademais, inundações urbanas podem ocorrer pela combinação de fatores pluviais e fluviais. O escoamento superficial é gerado a partir da precipitação sobre uma bacia e imprime um quadro de inundação urbana, quando o volume gerado excede a capacidade do sistema de drenagem pela alta intensidade da precipitação na região naquele momento. Regiões costeiras podem receber inundações de forma mais acentuada, uma vez que usualmente estas áreas estão em baixas altitudes (VELDHUIS, 2010).

Com o crescente desenvolvimento urbano e a falta do controle do poder público quanto à ocupação de áreas de risco, as áreas de margem dos corpos hídricos são ocupadas, desrespeitando o processo natural em que o curso d'água ocupa o seu

leito maior a cada dois anos, em média (TUCCI, 2003). Os leitos de um curso de água estão ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Ilustração do leito maior e menor de um curso d'água



Fonte: Silva e Miranda (2015)

Ainda segundo Tucci (2003), essa ocupação inadequada do espaço urbano é resultado da falta de restrição do loteamento de áreas de risco no Plano Diretor Urbano da grande maioria das cidades, visto que uma sequência maior de anos sem enchentes dá a falsa segurança de que a área é habitável. Porém, em épocas de cheias, a ocupação dessas áreas em épocas de cheia pode gerar grande contaminação por doenças de veiculação hídrica, além de perdas materiais e humanas.

Além da ocupação irregular, o impacto da urbanização da região é um ponto fundamental no estudo das causas das inundações. Com as superfícies cada vez mais impermeáveis, as vazões máximas do escoamento tendem a aumentar significativamente, aumentando, assim, a frequência e a magnitude das enchentes. Esse tipo de inundação ocorre, principalmente, pela concepção dos projetos de drenagem urbana atuais, que priorizam o escoamento superficial em detrimento do subterrâneo (TUCCI, 2001a).

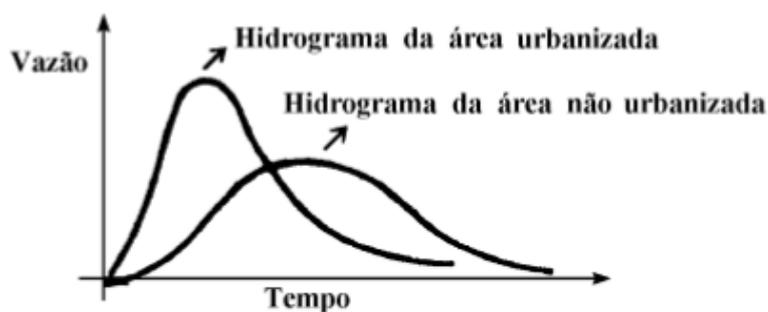
2.2.2 Alteração do ciclo hidrológico

A urbanização tem como principal efeito colateral a alteração da cobertura da bacia, modificando o uso do solo e desequilibrando o ciclo hidrológico natural da

região. Como resultado da impermeabilização da bacia, a infiltração no solo é reduzida, aumentando a quantidade e a velocidade do escoamento superficial, resultando em menor tempo de deslocamento do volume de água (TUCCI, 1997).

Além disso, o processo de dragagem é comum na realidade brasileira, 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 sua vez, 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). Por consequência, ocorre o aumento das vazões máximas e a antecipação dos picos de vazão no tempo, exigindo maiores seções para realizar o escoamento de maneira satisfatória (TUCCI, 1997). O impacto da urbanização no hidrograma de uma bacia é apresentado na Figura 2.

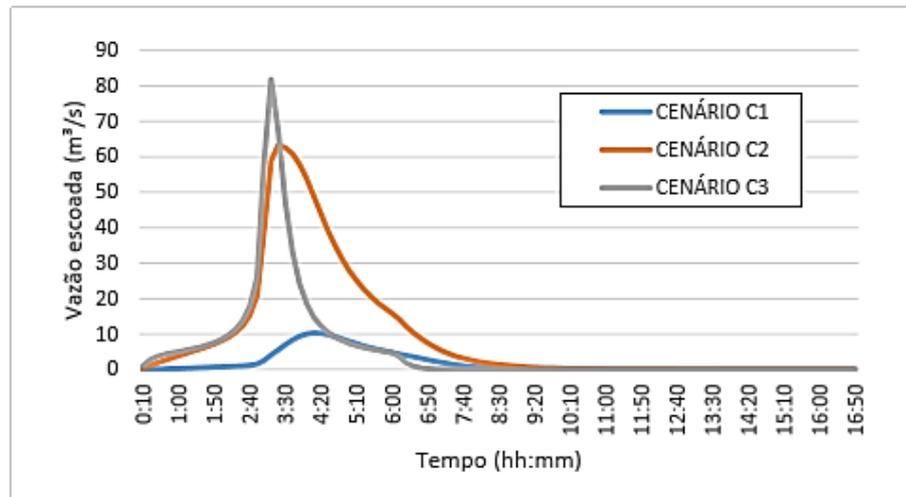
Figura 2 – Hidrograma hipotético de uma bacia natural e o resultante da urbanização.



Fonte: Tucci (1995)

Aracaju é uma das capitais brasileiras que atualmente passa pelo processo de urbanização em vários bairros, alguns em estágio mais avançado. Uma das bacias hidrográficas situadas no município nessa situação foi estudada por Fonseca (2016), que elaborou os hidrogramas ilustrados na Figura 3, onde é possível ver o mesmo processo através da simulação de 3 cenários: pré-urbanização (C1); região urbanizada, representando o período anterior à pavimentação asfáltica e canais de drenagem (C2); região intensamente urbanizada, representando as condições atuais (C3).

Figura 3 – Hidrogramas em três diferentes cenários de ocupação do solo.



Fonte: Fonseca (2016)

2.2.3 Alteração no tempo de concentração

O tempo de concentração (t_c) pode ser descrito como o tempo requerido para o deslocamento da água precipitada desde o ponto mais distante da bacia até o ponto ou seção de interesse (TUCCI, 2001d), que muitas vezes é o exutório, com contagem iniciada simultaneamente ao início da precipitação (CANHOLI, 2014).

O processo de urbanização tem impacto no tempo de concentração de uma bacia. A urbanização, especificamente a impermeabilização de uma região, aliada à implantação de infraestruturas do sistema de drenagem, tende a elevar a velocidade do escoamento natural da área. Tucci (1997) confirma que o aumento da velocidade do escoamento superficial em uma bacia reduz o tempo de concentração, que, por conseguinte eleva a vazão de escoamento da mesma região.

Equações empíricas são utilizadas para a determinação do tempo de concentração de uma bacia. Parâmetros como a área da bacia podem determinar a equação mais adequada para a estimativa desta característica. Para uma bacia com área inferior a $0,5\text{km}^2$, uma equação recomendada é de Kirpich, ilustrada na Equação 2.1.

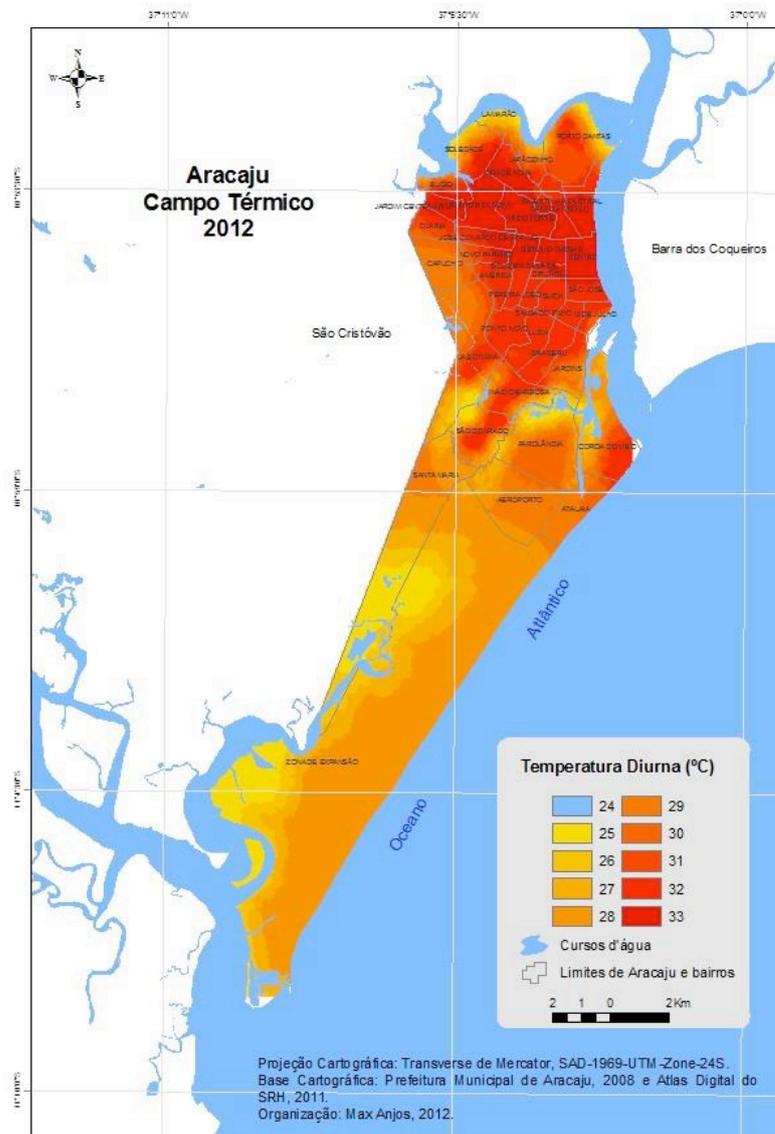
$$t_c = 0,0019 \times L^{0,77} \times S^{-0,385} \quad (2.1)$$

em que: t_c é o tempo de concentração da bacia (min); L é o comprimento do canal (m); S é a declividade média do canal/trecho do canal/bacia (m/m).

2.2.4 Aumento da Temperatura

Segundo Tucci (2005a), as superfícies impermeáveis, como concreto e asfalto, absorvem uma maior parcela da energia solar se comparado ao terreno natural, aumentando, assim, a temperatura local, o que gera as denominadas “ilhas de calor” nos centros urbanos. As variações da temperatura pelas regiões da cidade de Aracaju (Figura 4) apontam as altas temperaturas nas zonas mais densas, com menos vazios urbanos (ARACAJU, 2014) e maiores áreas impermeáveis.

Figura 4 - Campo térmico de Aracaju no período diurno em 15/01/2012.



Fonte: Anjos; Ganho; Araújo (2013)

O aumento da temperatura na superfície, por sua vez, gera movimentos ascendentes de ar que contribuem para o aumento da precipitação. Isso possibilita um aumento das chuvas se comparado com regiões mais afastadas da urbanização, contribuindo com o aumento das enchentes urbanas (TUCCI, 2005a).

2.2.5 Aumento de Sedimentos

Outro problema ocasionado pelo processo de urbanização é o aumento dos sedimentos produzidos por construções de empreendimentos, ruas e avenidas, além da limpeza de terrenos para futura construção. Esses sedimentos gerados, se não forem descartados da maneira adequada, podem assorear os canais de drenagem, além de afetar a qualidade da água, devido ao transporte de poluente agregado ao sedimento (TUCCI e BERTONI, 2003).

Após a consolidação da urbanização na bacia, o problema passa a ser a produção de lixo pela população que agora habita a região, obstruindo ainda mais as seções de dragagem e afetando mais gravemente a qualidade da água (TUCCI e BERTONI, 2003).

Segundo Tucci (1997), muitos alagamentos ocorrem devido ao assoreamento e obstrução dos condutos, que diminuem a sua capacidade hidráulica. Assim, é evidente a necessidade da implantação de um programa de manutenção, atuando de maneira preventiva com o intuito de manter o sistema de drenagem operando com a capacidade de projeto.

2.3 Técnicas compensatórias

Veldhuis (2010) afirma que os sistemas de drenagem urbana fornecem a proteção contra inundações e são frutos de projetos e regulamentações impostas por normas de múltiplos níveis de autarquias. Souza (2013) particulariza que grande parte dos manuais de drenagem no Brasil, e ainda os planos diretores das cidades, quando existentes – e quando bem abordam sobre drenagem urbana de águas pluviais, têm o foco na busca do conduto hidráulicamente mais eficiente. O “loop” conceitual de escoar a água para o mais longe possível da zona urbana afetada é aplicado de norte a sul em países como o Brasil, de dimensões continentais.

As técnicas compensatórias na drenagem urbana estão ligadas à infiltração e à retenção das águas pluviais, posto que interferem no escoamento superficial, alterando a vazão ao longo do tempo e, por vezes, diminuindo o seu volume. Assim, as técnicas objetivam a redução da ocorrência de acidentes hidrológicos, como a ocorrência de inundações nas zonas urbanas (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD, 2005).

De modo geral, as técnicas podem ser aplicadas para a resolução de problemas de diferentes magnitudes, de pequenas bacias a grandes sistemas de drenagem. Devido ao grande acervo de soluções, cada um com suas respectivas limitações e especificidades, a escolha da alternativa deve ser precedida de avaliações técnico-econômicas, possibilitando o levantamento das vantagens e desvantagens para análise da viabilidade de cada técnica estudada (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD, 2005).

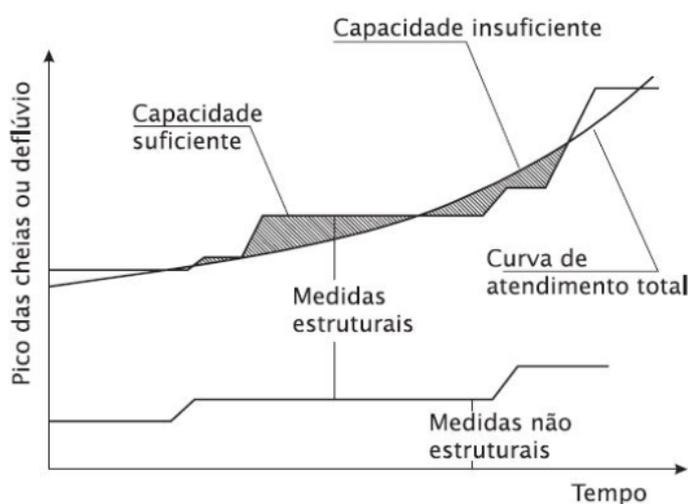
De acordo com a sua natureza, as medidas compensatórias são classificadas em não estruturais e estruturais. As técnicas não estruturais propõem-se a intervir no escoamento através da introdução de normas, programas de prevenção e conscientização ambiental da população. São exemplos de medidas não estruturais: regulamentação de ocupação e uso do solo; programas de manutenção periódica das redes de drenagem; ações de educação ambiental para sensibilização da comunidade. Tucci (2001b) ainda propõe regulamentação através da padronização de vazões máximas de saída dos lotes, volume de retenção necessário para cumprir o item anterior e áreas livres para a implantação de medidas de controle.

Em contrapartida, as medidas estruturais interferem no escoamento a partir da implantação de obras de engenharia, que podem ser integradas com o ambiente urbano. Devido a isso, as medidas estruturais são classificadas de acordo com o seu funcionamento, que atuam na infiltração ou na retenção do escoamento, podendo uma única estrutura atuar em ambos. Além disso, segundo Tucci (2001b), as medidas podem ser classificadas quanto à sua posição no sistema, atuando na fonte ou na saída do lote, ou em maiores parcelas do sistema. Para exemplificar, podem ser citados os reservatórios individuais, pavimentos permeáveis e bacias de retenção e retenção.

Para a potencialização dos resultados, é essencial que as diversas técnicas compensatórias sejam implantadas de maneira combinada, buscando a melhoria dos

sistemas de drenagem e, conseqüentemente, a melhoria da segurança e qualidade de vida da população (CANHOLI, 2014). O efeito da implantação harmoniosa de medidas estruturais e não estruturais é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Curva de atendimento às demandas de drenagem urbana.



Fonte: Canholi (2014)

2.4 Modelos Hidrodinâmicos

De acordo com Tucci (2005b), um modelo é a representação de um sistema, com a finalidade de entender e buscar respostas para problemas que possam ocorrer a partir de diferentes condições observadas. Por isso, o modelo é uma ferramenta para atingir um objetivo, seja ele uma análise atual ou futura, independente da sua complexidade.

Na área de recursos hídricos, os modelos mais comuns são os de otimização, planejamento e comportamento. O modelo de otimização visa encontrar as melhores soluções de um sistema específico. O de planejamento, por sua vez, leva em consideração um sistema maior, buscando soluções que extrapolam a hidráulica e a hidrologia, mas interferem no sistema, como o ambiente. Já o modelo de comportamento é utilizado para entender a resposta do sistema para diferentes entradas, possibilitando, assim, realizar prognósticos e investigar possíveis alternativas de aprimoramento do sistema (TUCCI, 2005b).

Um modelo pode ser classificado também como concentrado ou distribuído, de acordo com a variação do espaço e do tempo. Nos modelos concentrados, as variáveis levam em consideração apenas a variação no tempo, não fazendo distinção do evento de maneira espacial. Já nos modelos distribuídos, as variáveis dependem do espaço e do tempo, o que dá ao modelo melhor capacidade de representar a realidade. Na prática, porém, não existem modelos puramente distribuídos, sendo o mais comum a combinação das duas classificações: o modelo distribuído concentrado (TUCCI, 2005b).

Os modelos hidrológicos são ferramentas que objetivam representar e analisar o comportamento de bacias hidrográficas, ou sistemas mais complexos, e prever impactos causados por agentes externos antes que ocorram. Assim, os modelos se diferenciam entre si a partir da complexidade dos dados utilizados, da representação dos processos e, principalmente, da finalidade do modelo (TUCCI, 2005b).

Os modelos hidrodinâmicos, por sua vez, são mais completos que os hidrológicos, visto que utilizam métodos numéricos que são capazes de resolver equações diferenciais parciais sem simplificações (TUCCI, 2005b). Dentre os *softwares* que realizam a modelagem hidrodinâmica, o *Storm Water Management Model* (SWMM) se destaca pela sua interface gráfica simples e intuitiva, além de ser livre e de código aberto. Somado a essas vantagens, um manual completo de uso do *software* é disponibilizado pela desenvolvedora.

2.5 Storm Water Management Model (SWMM)

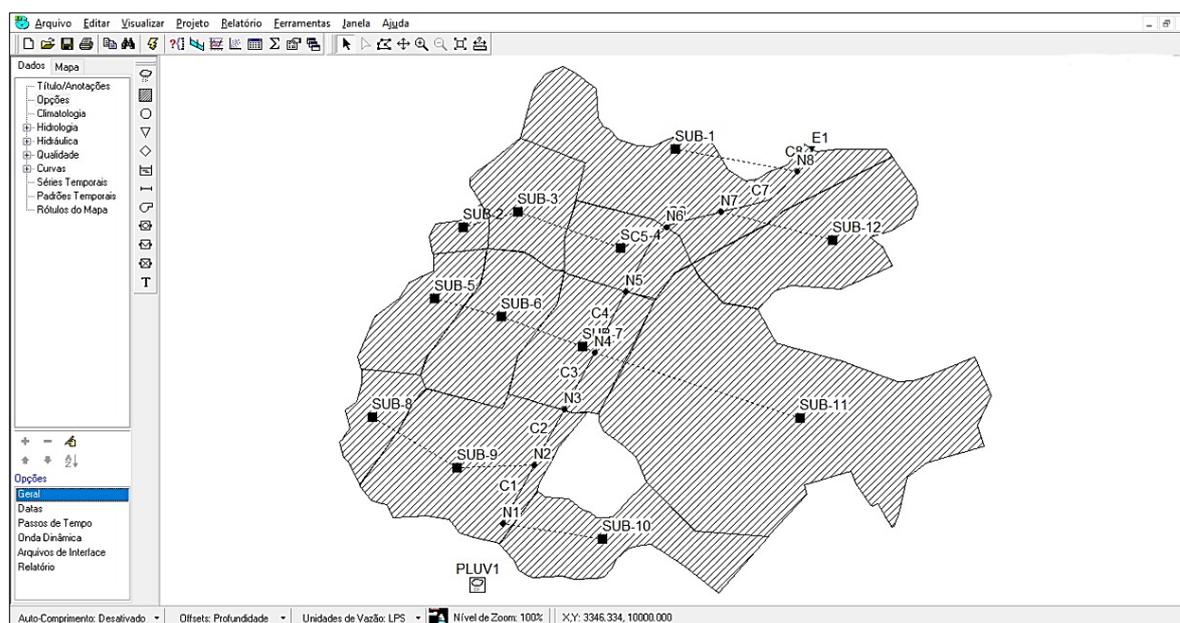
O SWMM, da *Environmental Protection Agency (EPA)*, é um *software* gratuito de modelagem dinâmica de chuva-vazão. O SWMM possui ferramentas que possibilitam simular a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, tendo maior enfoque em áreas urbanas. Em razão disso, o SWMM é utilizado na concepção de sistemas de drenagem urbana, auxiliando em diversas etapas, como análise, planejamento e projetos (ROSSMAN, 2015).

Pela sua capacidade de modelagem, o SWMM vem sendo usado academicamente em diversas simulações, hidrológicas e hidrodinâmicas. Como exemplo, o *software* pode ser utilizado para avaliar a rede de drenagem existente a

partir de uma precipitação de projeto (BELOTI, 2018), o impacto no escoamento numa bacia devido a alterações no uso e ocupação do solo (SILVA, 2016), a eficiência de métodos de controles de enchentes (SILVA, 2007), o planejamento urbano (ROCHA, 2013), entre outros.

O SWMM é constantemente atualizado desde a sua criação, tornando-o uma ferramenta confiável para estudos e análises de redes de drenagem. Entre as suas principais aplicações, destaca-se o dimensionamento de componentes da rede de drenagem e de estruturas de retenção e acessórios, visando o controle de inundações (ROSSMAN, 2015). A Figura 6 ilustra a área de trabalho do SWMM.

Figura 6 – Área de trabalho do SWMM



Fonte: Autores

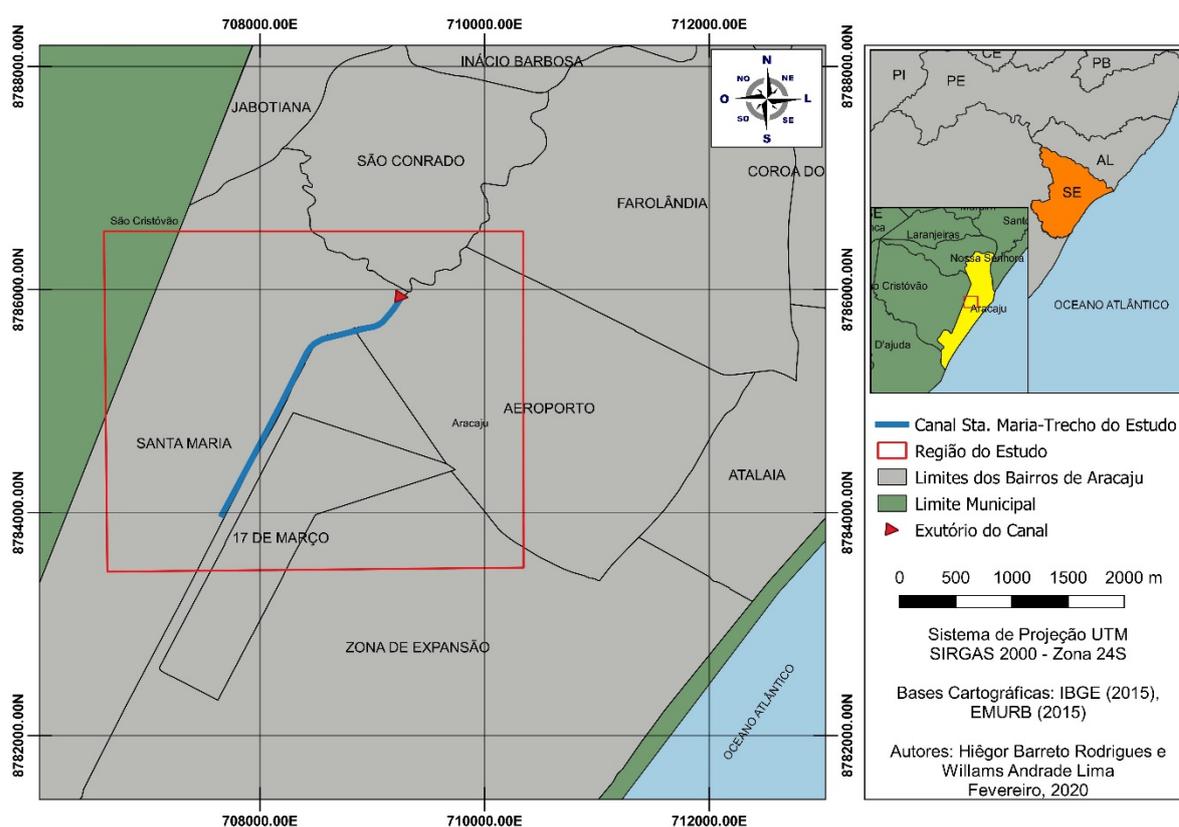
2.6 Região de Estudo

A região de estudo se localiza na cidade de Aracaju (Figura 7), capital de Sergipe. Abrangendo uma área de 182,163km², Aracaju possui uma população estimada de 657.013 habitantes (IBGE, 2018 e IBGE, 2019).

Na zona sul de Aracaju, divisa com o município de São Cristóvão encontram-se os bairros Santa Maria e 17 de Março, maiores áreas contribuintes deste estudo. O bairro Santa Maria foi iniciado a partir de uma comunidade conhecida como “Terra

Dura”, vindo ainda a se tornar “povoado Terra Dura” quando este pertencia ao domínio do município de São Cristóvão. No ano de 1999, o povoado Terra Dura, pela Emenda Constitucional N° 16/1999 (DOE N° 23.321 de 07 de julho de 1999), passou a fazer parte do município de Aracaju. Segundo Vieira (2011), a localidade não era reconhecida institucionalmente como bairro até o ano 2000. No entanto, a Lei Municipal n° 2811/2000 (ARACAJU, 2000b) denominou, então oficialmente, o bairro Santa Maria¹.

Figura 7 - Localização da região de estudo



Fonte: Autores.

O bairro 17 de Março não existia até o ano de 2010. Em 15 de abril de 2011, pela Lei Municipal N° 4024/2011 (ARACAJU, 2011), o bairro foi criado oficialmente, e seus limites podem ser vistos na Figura 8. A lei informa em seu corpo sobre a área original para a criação e o parcelamento e uso do solo:

¹ A delimitação do bairro Santa Maria, em caráter oficial, foi feita somente no ano seguinte, 2001, através da Lei Municipal n° 2979/2001 (ARACAJU, 2001).

Art. 1º Fica criado o Bairro 17 de Março, com área desmembrada do imóvel constituído por Terreno Nacional Interior, localizado no Bairro Santa Maria, cedida pela União, através da Portaria nº 347, de 21 de dezembro de 2004, do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, e seu respectivo contrato de Cessão sob regime de aforamento gratuito.

Parágrafo Único - O referido bairro destinar-se-á, preferencialmente, à execução de projeto de Habitação de Interesse Social visando ao atendimento de famílias carentes e de baixa renda.

Art. 2º Fica também aprovado o partido urbanístico que define o parcelamento e uso do solo da referida área, conforme memoriais descritivos do projeto e da área constantes nos anexos I e II, integrantes da presente lei. (ARACAJU. Lei Municipal Nº 4024/2011, art. 1º e 2º, 2011).

Figura 8 - Demarcação do bairro 17 de Março em imagem de satélite de 2011.



Fonte: Google Earth Pro 7.3.2 (2011).

A partir da década de 80, o crescimento na região ganhou novas propriedades. Isso ocorreu devido à mudança do “lixão” do bairro Soledade para o local, juntamente com o crescimento de políticas urbanas de conjuntos habitacionais populares, que deram traços de desenvolvimento urbano para a região (VIEIRA, 2011). A urbanização crescente na região chama atenção para a necessidade da reavaliação dos sistemas de infraestrutura. A região tem recebido diversas políticas de habitação como o Minha Casa Minha Vida e também investimentos de grandes empresas lançando empreendimentos habitacionais populares. Devido a isso, a urbanização dos últimos anos é muito mais acelerada se comparada ao século XX, como é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Região dos bairros Santa Maria, 17 de março, Aeroporto e Zona de Expansão em diferentes anos.



Fonte: Google Earth Pro 7.3.2 (1987); Google Earth Pro 7.3.2 (1991); Google Earth Pro 7.3.2 (2003); Google Earth Pro 7.3.2 (2019). Da esquerda para a direita, de cima para baixo: 1987, 1991, 2003, 2019.

De acordo com Aracaju² (2014), a população do bairro Santa Maria cresceu de 5.316 habitantes em 1991 para 33.475 em 2010. É estimada uma população de 49.174 habitantes para 2020. Em 2013, a área verde disponível no bairro Santa Maria era de 113.990,28m² enquanto a área verde mínima necessária³ para o bairro em 2020 é estimada em 983.478,69m². Ainda de acordo com o mesmo relatório, o bairro 17 de Março tinha uma população de 3.227 habitantes em 2010, com projeção de 8.491 habitantes para 2020. De forma geral, existe uma discrepância entre a área

² Dados do Relatório Final do Diagnóstico da Cidade de Aracaju lançado no ano de 2014 em conjunto com dados levantados pela Empresa Municipal de Obras e Urbanização (EMURB) em 2013, da própria prefeitura do município.

³ Para 20m²/habitante (ARACAJU, 2014).

verde necessária em 2020 e a área verde existente em 2013 em toda a cidade, chegando a uma diferença de mais de 12,7 km².

A grande modificação do uso do solo natural e urbanização sem planejamento descaracteriza o espaço natural da região, originando problemas hidrológicos, como inundações (TUCCI, 1995). Neste processo não fiscalizado, tanto áreas planas, quanto encostas são ocupadas de forma desordenada, culminando na desestruturação de algum plano existente para o crescimento urbano de uma cidade. Em Aracaju, as consequências das inundações são destaques em jornais e diversas mídias. Os infelizes resultados englobam desde problemas com o trânsito, até desabamentos (ARAÚJO, 2006).

O bairro Santa Maria foi o foco de muitas reportagens envolvendo as chuvas e as inundações na região (Figura 10). Em 2006 foi feito o replantio da vegetação do Morro do Avião como medida de contenção de deslizamentos (INSTITUTO MARCELO DEDA, 2006). Em 2011 e 2015, as chuvas provocaram alagamento nos loteamentos do bairro (MARTINS, 2011; ESTÁCIO e NOVAES, 2015). Em 2013, foi anunciado que o Santa Maria era um dos bairros que mais sofria com a época das chuvas na cidade e, na ocasião, o então presidente da EMURB informou que a solução seria a dragagem do canal principal da região, o canal Santa Maria, com orçamento em R\$18 milhões (SANTA MARIA, 2013).

Figura 10 - Alagamento durante chuva no bairro Santa Maria



Fonte: Adaptado de Estácio e Novaes (2015)

Aracaju (s.d.) informou em reportagem no seu canal de comunicação que desde 2013 a cidade, em especial as zonas de risco, o que inclui o bairro Santa Maria, recebe medidas estruturais e preventivas no que diz respeito aos transtornos causados pelas chuvas na região.

Na divisa entre os atuais bairros Santa Maria e 17 de Março, encontra-se o canal Santa Maria. Inicialmente construído para navegação e transporte de mercadorias através da comunicação do Rio Vaza Barris com o Rio Sergipe, rios principais de duas importantes bacias hidrográficas do estado, o canal Santa Maria foi essencial para o desenvolvimento da região. Vieira (2011) relata uma retificação do canal no ano de 1932, quando o povoamento local inicialmente se deu de maneira espontânea, com atividades agrícolas e de pesca, ocupando a Fazenda “Santa Maria”. Araújo (2006) menciona que o canal fora projetado ainda antes, em 1923. Surpreendentemente, a “*Carta corographica para a divisão das comarcas, termos e municípios da província de Sergipe DelRey*”, datada de 1844, já fazia não somente menção ao canal, como indicava sua futura localização, pela indicação do canal no local como “canal projetado” (Figura 11).

Figura 11 - Carta Corográfica de Sergipe Del Rey, 1844



Fonte: Bloem (1844)

Com a mudança das características de desenvolvimento da região, o Canal Santa Maria também sofreu alterações em seu uso. Com o passar do tempo, o canal foi perdendo a sua função de navegação e passou a ser utilizado para fins de drenagem. Todavia, nos órgãos responsáveis, não foram encontrados projetos que atestem que o canal foi qualificado para os novos fins, sinalizando que essa mudança pode ter sido feita de maneira não-planejada. No entanto, de acordo com Aracaju (2015b), em 2015 foi realizada a obra de dragagem do Canal Santa Maria (Figura 12), para o trecho entre o bairro 17 de Março e o Rio Pitanga, anunciada em 2013.

Figura 12 - Dragagem do canal Santa Maria em outubro de 2015



Fonte: Aracaju (2015a) e Aracaju (s.d.)

Após as obras de dragagem do canal, não foram notificados pontos de alagamento adjacentes ao Canal Santa Maria. No entanto, o crescimento populacional acelerado na região e as condições correntes do canal (Figura 13) motivam investigações acerca do atingimento da capacidade hidráulica com o desenvolvimento

da região. Mais especificamente, os efeitos que a impermeabilização do solo e consequente redução da área verde (área permeável) provocam na capacidade de drenagem do canal.

Figura 13 - Situação atual do canal Santa Maria em dois diferentes trechos



Fonte: Autores. Datação nas imagens.

3 METODOLOGIA

3.1 Delimitação da área de estudo

A área de estudo foi delimitada inicialmente por meio do *software* livre *Google Earth Pro*. O entorno da região de estudo, ou seja, a região ao redor do trecho norte do Canal Santa Maria⁴, foi delimitado por enquadramento da imagem de satélite disponível na plataforma. Utilizou-se a imagem da região de estudo com cenário condizente com a urbanização inicial; antes da pavimentação das ruas, principalmente. Selecionou-se a imagem de dezembro de 2003 (Figura 14), sendo esta salva na resolução máxima oferecida pelo *software*.

Através da localização da região do estudo no *Google Earth Pro*, fez-se a delimitação bruta para obtenção dos dados para as análises desse estudo.

Figura 14 - Imagem de satélite de da região de estudo em dezembro de 2003



Fonte: Google Earth Pro 7.3.2 (2003)

⁴ O trecho do Canal Santa Maria analisado tem coordenadas iniciais N8783982,9787m E707663,7456m e coordenadas finais (exutório) N8785934,5533m E709262,4557m – SIRGAS 2000 – UTM zona 24S.

Foi feito o georreferenciamento da imagem por demarcação de pontos, via *Google Earth Pro*, para obtenção de suas coordenadas. Uma nuvem de dez pontos foi marcada e as coordenadas obtidas. No *Quantum Geographic Information System* (QGIS), utilizou-se a opção *Raster>Georreferenciador* para georreferenciar a imagem, tomando como referencial as coordenadas dos pontos previamente demarcados e respeitando o padrão de exatidão cartográfica. A imagem foi, então, exportada como arquivo *Tagged Image File Format* (TIFF) (GeoTIFF georreferenciada para o *datum* SIRGAS 2000 com SRC: EPSG: 31984 – SIRGAS 2000 – UTM zone 24S).

3.2 Delimitação sub-bacias

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) foram adquiridos a partir do projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram obtidas duas quadrículas dos modelos digitais de elevação da própria plataforma do projeto, de resolução de 30m, sendo elas identificadas como 10S375ZN e 11S375ZN, de resolução de 30m. Os arquivos *Geostationary Earth Orbit Tagged Image File Format* (GeoTIFF) disponibilizados nessa plataforma são referenciados por coordenadas geográficas em graus decimais com *datum* WGS84 e sem projeção (VALERIANO, 2008), e este foi o *datum* selecionado na primeira inserção dessas folhas no QGIS. Gerou-se um mosaico modelado a partir das duas faixas para proporcionar homogeneidade da região de estudo. Foi utilizada a ferramenta para mesclar os modelos de elevação sob o menu *Raster>Miscelânea>Mesclar*.

O mosaico das folhas do MDE foi processado para que o mesmo *datum* fosse utilizado em todas as camadas/dados. O Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) oficial brasileiro é o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) 2000 dividido em zonas (IBGE, 2005), logo definiu-se o sistema de coordenadas do projeto como SIRGAS 2000 para a zona 24S, que contém a região de estudo. Inicialmente, projetou-se o mosaico do MDE em coordenadas geográficas para o SIRGAS 2000. Uma vez salvo, realizou-se uma segunda projeção do mosaico de faixas para UTM no *datum* SIRGAS 2000 para a zona 24S.

As curvas de nível foram extraídas do mosaico pelo menu *Raster>Extrair>Contorno*. Elas foram geradas para cada 1m, visando a análise de

configuração/delimitação e ajuste manual das sub-bacias pós processamento automático.

As análises primordiais para geração das divisões das sub-bacias foram realizadas de forma automática pela execução do algoritmo *r.watershed* do complemento GRASS, adquirido 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. O algoritmo *half-basins* foi selecionado e executado individualmente para cada resolução. Um arquivo *raster* foi gerado e em seguida vetorizado sob o menu *Raster>Conversão>Poligonizar (Raster para Vector)*. A sobreposição das camadas de vetor das sub-bacias com resolução de 1000 *pixels* e 250 *pixels* foi feita anteriormente ao ajuste fino manual das linhas de delimitação das bacias.

Geradas as sub-bacias automaticamente, elas foram ajustadas para as condições mais próximas da realidade. Utilizaram-se divisores físicos como parâmetros para o ajuste manual, via QGIS, em conjunto com as curvas de nível.

3.3 Projetos

A Empresa Municipal de Obras e Urbanização de Aracaju (EMURB) concedeu o projeto de dragagem do Canal Santa Maria (2006), ponto central deste estudo. O projeto engloba a batimetria da situação do canal pré-dragagem, que inclui as seções transversais em estacas específicas, localização, perfil geométrico longitudinal, memorial descritivo e situação do canal pós-dragagem, que inclui as seções transversais do canal com a dragagem executada. Todos os dados foram concedidos em formato digital.

Categorizou-se a divisão dos cenários pela existência de uma situação natural, pré-dragagem, e uma outra modificada, pós-dragagem. Em relação às seções transversais da situação natural do canal, optou-se pelo uso de seções de acordo com suas localizações e continuidade. Paralelamente, foram utilizadas 8 (oito) seções transversais para representação da situação modificada do canal (pós-dragagem). Em ambos os casos, adotaram-se as seções transversais incluídas no trecho em análise do canal. Tais seções estão nos Anexos A e B.

3.4 Cenários

A modelagem foi realizada para 4 (quatro) cenários. O primeiro considerou a região de estudo em seu estágio inicial de urbanização, com as seções antigas do canal. Já o segundo considerou a região ainda no estágio inicial da urbanização, porém com a dragagem do Canal Santa Maria concluída, apresentando as novas seções de projeto para o Canal Santa Maria.

O terceiro cenário considerou o Canal Santa Maria dragado e a simulação da máxima impermeabilização prevista na Lei complementar Nº 42 de 04 de outubro de 2000, do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Aracaju (ARACAJU, 2000a). Por fim, o quarto apresentou as mesmas características físicas do cenário anterior, porém com a região da lagoa do bairro 17 de Março também urbanizada, para investigar sua importância para o sistema de drenagem da região. O resumo dos cenários modelados está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo dos cenários de estudo do trabalho.

Cenário	Dragagem do Canal	Estágio de impermeabilização	Região da lagoa
1	Não realizada	Inicial (2003)	Preservada
2	Concluída	Inicial (2003)	Preservada
3	Concluída	Máximo permitido por Lei	Preservada
4	Concluída	Máximo permitido por Lei	Urbanizada

Fonte: Autores

Para que possa ser feita uma análise crítica das possíveis consequências das mudanças no canal e da ocupação na região de estudo, os cenários foram comparados entre si através das principais variáveis obtidas por meio da modelagem: volume de pico do escoamento superficial direto, vazão de pico unitária, relação y/D e velocidade de escoamento.

3.5 Modelagem dos dados

A modelagem hidrodinâmica do canal de estudo foi realizada no *software* livre SWMM. Para tal, utilizou-se o modelo de onda dinâmica e, para a infiltração, o modelo do *Soil Conservation Service* (SCS), realizando a análise a partir dos parâmetros de entrada necessários.

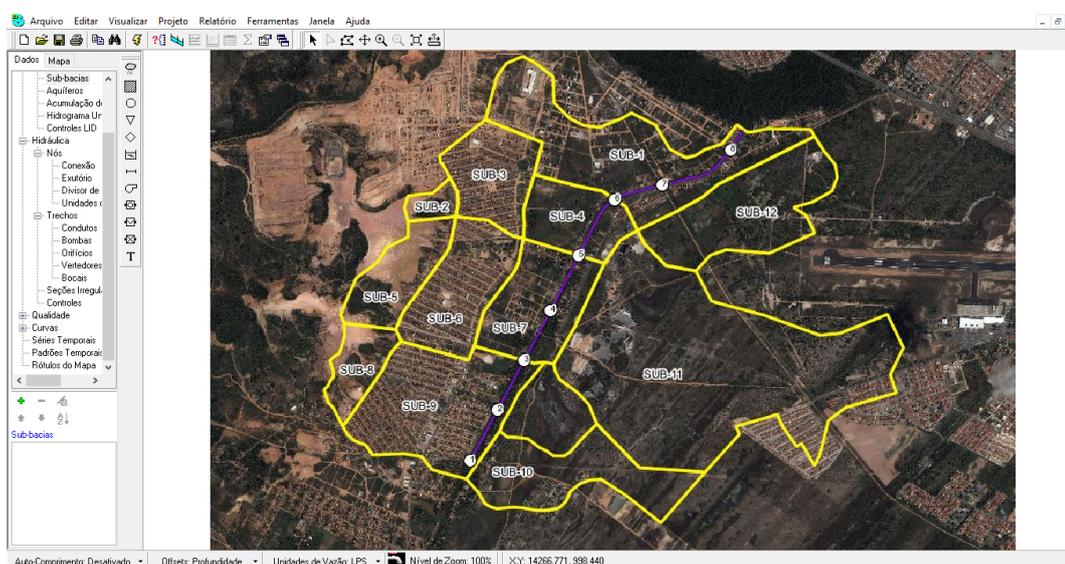
Para modelagem do Canal Santa Maria do presente trabalho, foram formuladas hipóteses a fim de simplificar o modelo. Contudo, essas hipóteses não originam mudanças determinantes nas simulações, sendo levadas em conta somente para possibilitar a elaboração do modelo. As hipóteses simplificadoras são:

- A chuva é uniforme em toda a bacia de estudo;
- O escoamento superficial se dá pela superfície da bacia, e não por elementos de drenagem urbana, como bocas de lobo e galerias;
- O volume escoado pelo canal se refere apenas às águas pluviais, não sendo consideradas contribuições irregulares de esgoto.
- A declividade média das sub-bacias é uniforme;
- O canal possui homogeneidade no material de revestimento;
- Não foi considerado o acúmulo de sedimentos na seção do canal.

3.5.1 Modelagem das sub-bacias no SWMM

A partir da delimitação das sub-bacias no QGIS, a imagem trabalhada foi levada para o SWMM de modo a facilitar o desenho dos elementos no *software*, representando o contorno real das sub-bacias. Para isso, utilizou-se a ferramenta de inserção sob o menu Visualizar>Imagem de fundo>Abrir>Arquivo de imagem de fundo. O resultado é ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Área de trabalho do SWMM com imagem da bacia de estudo ao fundo.



Fonte: Autores.

Com a imagem de fundo, as bacias foram inseridas manualmente⁵, através da ferramenta Sub-bacia. Segundo Rossman (2015), os parâmetros das sub-bacias necessários para a modelagem hidrodinâmica dos modelos são:

- Pluviômetro associado à sub-bacia;
- Exutório do escoamento da sub-bacia;
- Área da sub-bacia (ha);
- Largura característica do escoamento superficial (m);
- Declividade média da sub-bacia (%);
- Área superficial impermeável (%);
- Rugosidade da sub-bacia;
- Profundidade do armazenamento em depressão (mm);
- *Curve-Number* (CN) da sub-bacia.

Para os cenários 1 e 2, simulados para o ano de 2003, os exutórios das sub-bacias foram alocados no ponto mais baixo de cada uma delas, de acordo com a disposição das curvas de nível. Para os cenários 3 e 4, representantes da ocupação futura e que levam em consideração as mudanças ocorridas até a data deste estudo, também foi levada em consideração a implantação dos canais de drenagem pluvial na região. Para todos os cenários, a alocação dos exutórios das sub-bacias foi realizada via *software* QGIS. As áreas das sub-bacias foram obtidas da delimitação da região no QGIS. Atributos de área e perímetro foram calculados para cada feição criada.

Segundo Rossman (2015), a largura característica da sub-bacia é dada pela divisão da área da sub-bacia pela média dos comprimentos máximos de escoamento. A relação está disposta na equação 3.1.

$$L = \frac{A}{l_m} \quad (3.1)$$

em que: L é a largura característica da sub-bacia (m); A é a área da sub-bacia (m²); l_m é a média dos comprimentos máximos de escoamento (m).

⁵ É importante salientar que o contorno inserido no SWMM representa a área apenas de modo ilustrativo, sendo necessário inserir as propriedades de cada sub-bacia individualmente.

Para obter o parâmetro necessário na Equação 3.1, foi realizado o cálculo do retângulo equivalente da bacia, considerando que o seu lado maior representa a média dos comprimentos máximos de escoamento. O cálculo da largura do retângulo equivalente é dado pela equação 3.2 (VILLELA e MATTOS, 1975).

$$l_m = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (3.2)$$

em que: l_m é a largura do retângulo equivalente em XX; A é a área da sub-bacia (m²); K_c é o índice de compacidade da bacia (adimensional).

O índice de compacidade da bacia, por sua vez, é a relação entre o perímetro da sub-bacia e a circunferência de um círculo de mesma área. Assim, quanto mais próximo de 1, mais o formato da sub-bacia se aproxima de um círculo, tendendo a originar enchentes mais intensas, cujos efeitos são percebidos mais rapidamente no exutório. O índice de compacidade é dado pela equação 3.3.

$$K_c = \frac{0,28 \times P}{\sqrt{A}} \quad (3.3)$$

em que: K_c é o índice de compacidade (adimensional); P é o perímetro da sub-bacia (km); A é a área da sub-bacia (km²).

O canal Santa Maria separa duas regiões de relevo distinto: a oeste do canal, é encontrada uma região de morro, com picos de até 60m; a leste, o relevo é plano (Apêndice D). Recorreu-se à declividade do talvegue principal de cada sub-bacia para a determinação da declividade da mesma. Estipularam-se, *a priori*, os caminhos preferenciais para o escoamento de cada sub-bacia. Esses caminhos, denominados de talvegues, foram determinados a partir das curvas de nível.

Com o progresso da urbanização, mudanças na disposição geográfica ocorreram. Assim, para os cenários futuros, CEN-3 e CEN-4, foi considerada a implantação dos canais de drenagem pluvial na região no direcionamento dos talvegues. Os dados foram processados através do *software* QGIS. O traçado dos talvegues para CEN-1 e CEN-2 encontra-se no apêndice B e para CEN-3 e CEN-4, no apêndice C.

Obteve-se o tempo de concentração individual de cada sub-bacia a partir da equação de Kirpich (Equação 2.1). Verificou-se o tempo de concentração total, considerando todo o percurso da água, ou seja, o percurso dentro da sub-bacia e o percurso do trecho do canal (equação 3.4).

$$t_c = t_{sb} + t_{can} \quad (3.4)$$

em que: t_c é o tempo de concentração (min); t_{sb} é o tempo de escoamento dentro da sub-bacia, seja na superfície ou em um canal auxiliar também dentro da sub-bacia (min); t_{can} é o tempo de escoamento no trecho do canal até o seu exutório (min).

Adotou-se o tempo de concentração final como o maior tempo de concentração do percurso da água de uma sub-bacia “n” até o exutório do Canal Santa Maria.

Uma vez que o comprimento do talvegue principal foi determinado, utilizou-se a amplitude altimétrica do segmento para a determinação da declividade média das sub-bacias. A urbanização já implantada na região até data de produção deste estudo foi considerada para a determinação da declividade das sub-bacias para os cenários futuros: CEN-3 e CEN-4. Canais de drenagem pluvial são uma realidade na data deste estudo, e o caminho do talvegue principal de algumas sub-bacias foi alterado; esse novo percurso foi tomado em consideração.

Para os cenários CEN-1 e CEN-2, no ano de 2003, a ocupação do solo foi demarcada em duas categorias: permeável e impermeável; a primeira englobou toda e qualquer região não ocupada para habitação, uso industrial ou outros fins e, para a segunda, toda e qualquer região que transformou o solo, impermeabilizando-o (vias pavimentadas com asfalto⁶, residências, indústrias e afins). A delimitação da ocupação do solo foi feita individualmente para cada sub-bacia através da ferramenta Adicionar Polígono e foram criadas tabelas de atributos; *shapefiles* foram gerados e dados de área e perímetros foram extraídos.

Para os cenários futuros, CEN-3 e CEN-4, considerou-se a ocupação do solo em toda a área ocupável da região em estudo, situada na zona ZAB-2 (Anexo C), de acordo com o PDDU de Aracaju. Assim, a área pertencente à Aeronáutica, região do Aeroporto Internacional Santa Maria, foi considerada como uma região não passível

⁶ O asfalto é o único pavimento impermeável utilizado na região de estudo.

de ocupação, mesmo para os cenários futuros. As áreas ocupáveis foram parceladas de acordo com a Lei complementar Nº 42 de 04 de outubro de 2000, que institui o Plano Diretor Urbano de Aracaju (ARACAJU, 2000a). O Quadro 1 traz o parcelamento aplicado a todas as áreas de cenário futuro para áreas ocupáveis.

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

ÁREA TOTAL (100%)	Doação ao Poder Público Municipal ⁷		Fração Impermeável (%)	Fração Permeável (%)	
		Área verde	15%	-	15
		Ruas, passeios e urbanização	20%	20	-
		Área de lotes			
	65%	Taxa de permeabilidade mínima obrigatória do lote	5% ⁸	-	3,25
		Área impermeável máxima do lote	95%	61,75	-
	FRAÇÃO TOTAL			81,75	18,25

Fonte: Aracaju (2000a)

Os parâmetros de rugosidade da sub-bacia e de profundidade do armazenamento em depressão são itens que exigem um estudo investigativo mais cauteloso da região, por serem dados complexos. Por isso, esses parâmetros foram obtidos pela calibração do modelo hidrodinâmico, realizando a simulação de uma chuva ocorrida em 2015, que causou acidentes hidrológicos na região de estudo (ESTÁCIO; NOVAES, 2015).

Uma das características das sub-bacias é o Número de Curvas, originalmente em inglês “*Curve Number*”, CN. Este método classificatório foi criado pelo *United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service* (USDA-SCS) e tem vasta aplicação até os dias atuais em muitos países. Esse é um método fácil e com baixo número de parâmetros, tornando-o rápido. As características da bacia formam uma relação direta com o *Curve Number* (CN) (TUCCI, 1998 *apud* SANTOS; LOLLO,

7 Do Capítulo IV, Seção II do PDDU (2000): “Art. 191 Somente serão aprovados os Loteamentos acima de 40.000,00m² que reservarem para doação ao Poder Público Municipal, 35% (trinta por cento) no mínimo, da área total a ser parcelada, dos quais 15% (quinze por cento) serão destinados a áreas verdes e destes 1/3 (um terço) poderão ser utilizados para equipamentos comunitários de uso público, e os 20% (vinte por cento) restantes, destinados à ruas, passeios e urbanização.”

8 Do Capítulo II do PDDU (2000): “Art. 169 - Será obrigatória a manutenção de uma taxa mínima de permeabilidade do lote igual a 5% (cinco por cento) de sua área, à exceção da ZAP-1 onde é isenta.”

2016). O método é adaptado para os solos de São Paulo, Brasil, mas ainda assim é aplicável aos demais estados do território brasileiro. Os solos são divididos em quatro grupos hidrológicos como mostra o Quadro 2 (SANTOS; LOLLO, 2016).

Por análise visual no local de estudo e dados da Carta de Solos de Aracaju (ARACAJU, 2004a), agrupou-se os solos nos grupos A, B e C de acordo com Quadro 2, e utilizou-se os valores de CN do Quadro 3 para os tipos de uso do solo. Para regiões impermeáveis, adotaram-se áreas residenciais com lotes < 500m² com área impermeável de 65%⁹.

Quadro 2 - Grupos hidrológicos de solo

Grupo	Tipos de solo
A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. São Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.
B	Solos menos permeáveis do que o grupo A. São solos arenosos menos profundos do que os do grupo A e com permeabilidade superior à média.
C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo porcentagem considerável de argila e pouco profundo.
D	Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração. São solos que geram a maior proporção de escoamento superficial.

Fonte: Tucci (2001c)

Quadro 3 - Valores adotados de CN para bacias urbanas e suburbanas

	Descrição do uso do solo	Tipo do solo		
		A	B	C
Área Permeável	Espaços abertos:			
	matos ou 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 (lotes residenciais)	Lotes residenciais com área <500m ² e taxa de impermeabilização de 65%	77	85	90

Fonte: Tucci (1998) *apud* Santos; Lollo (2016) e Tucci (2001c)

3.5.2 Condutos

Para a modelagem do Canal Santa Maria, o mesmo foi dividido em uma série de condutos. Essa divisão foi realizada para que pudessem ser simuladas diferentes seções em cada um deles, buscando representar a realidade de forma mais fidedigna.

⁹ Foi adotado o valor mais próximo do tamanho médio dos lotes residenciais da localidade. A área impermeável de 65% para este tamanho de lote é a maior disponibilizada nestes dados.

Ainda com a imagem ao fundo os condutos foram inseridos manualmente através da ferramenta Condutos, onde se conectam uns aos outros através dos nós. Vale ressaltar que, analogamente às sub-bacias, o desenho é meramente ilustrativo.

Segundo Rossman (2015), os parâmetros dos condutos necessários para a modelagem hidrodinâmica dos modelos são:

- Nós de entrada e de saída do conduto;
- Propriedades geométricas da seção transversal;
- Comprimento (m);
- Rugosidade do conduto.

Os nós de entrada e de saída são necessários para a modelagem dos condutos, pois a ferramenta de inserção de um conduto no SWMM exige que ele se inicie e termine em nós. Assim, eles são utilizados para localizar o conduto no modelo e indicar as cotas do conduto.

As propriedades geométricas da seção transversal de cada conduto foram obtidas das coordenadas de cada ponto da seção através do projeto (item 3.2) e inseridas no SWMM através da ferramenta Seções Irregulares. A ferramenta possibilita inserir as coordenadas da seção e o valor do coeficiente de rugosidade de Manning, como demonstrado a Figura 16.

O comprimento dos condutos foi obtido através da ferramenta Identificar Feições no *software* QGIS, sendo tal comprimento a distância entre os pontos de entrada e saída do conduto. Juntamente com as cotas dos nós de entrada e de saída, o SWMM realiza automaticamente o cálculo da declividade do conduto.

Figura 16 – Ferramenta para inserção de seções irregulares no SWMM.

Editor de Seção Transversal Irregular

Nome da Seção Irregular:

Descrição:

	X (m)	Y (m)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Propriedades	Valor
Rugosidade:	
Margem à esquerda	0.01
Margem à direita	0.01
Canal	0.01
Coord. Margens:	
Esquerda	0.0
Direita	0.0
Modificadores:	
Coordenada X	0.0
Coordenada Y	0.0
Meandro	0.0

Visualizar... OK Cancelar Ajuda

Fonte: Autores

Esses parâmetros são necessários para a modelagem no SWMM, pois o *software* utiliza a Equação de Manning para relacionar os fatores anteriormente mencionados com a vazão que escoar pelo conduto. Essa relação é dada pela Equação 3.5.

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{2/3} \times \sqrt{S} \quad (3.5)$$

em que: Q é a vazão que escoar no conduto (m^3/s); n é o coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional); A é a área 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).

3.5.3 Aproximação dos parâmetros do SWMM

Os parâmetros de interesse, rugosidade da bacia e profundidade de armazenamento em depressão, foram obtidos através da modelagem da região de estudo no ano de 2015 de maneira semelhante aos cenários já descritos.

A chuva escolhida para tal foi a ocorrida no dia 24 de maio de 2015, que causou alagamentos na região de projeto. De acordo com os dados do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, a precipitação do dia foi de 101,5 mm (INMET, 2020). Assim, foi elaborado um hietograma de uma chuva de precipitação acumulada semelhante para analisar o comportamento do canal para a precipitação ocorrida.

Para realizar a aproximação, foi observado o parâmetro de armazenamento em depressão, por ser de difícil obtenção. O parâmetro foi ajustado de modo que o canal não fosse suficiente para escoar a precipitação excedente, reproduzindo, assim, o transbordamento registrado no canal em 24 de maio de 2015.

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 a faixa de 2,54 a 7,62 mm para superfícies permeáveis. Assim, para o evento chuvoso de 24 de maio de 2015, chegou-se ao transbordamento do canal para valores de 1,91 mm (superfícies impermeáveis) e 5,08 mm (superfícies permeáveis), próximos à média das respectivas faixas de valores.

3.6 Estudo Hidrológico

O estudo hidrológico da região foi desenvolvido a partir da análise das precipitações máximas na bacia, que são representadas de maneira pontual pelas curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF). As curvas IDF são elaboradas a partir de observações suficientemente longas de eventos de chuvas intensas na região (BERTONI E TUCCI, 2001).

Com os dados calculados através das curvas IDF, uma das maneiras de obter a distribuição temporal da chuva é através da utilização do método dos Blocos Alternados. O método consiste em distribuir a chuva em intervalos iguais de tempo compreendidos na duração total da chuva. Após a aplicação do método, o resultado

é um hietograma que no intervalo central da chuva está o bloco de maior intensidade, enquanto os blocos são arranjados de maneira decrescente e alternada em torno do bloco central (SÃO PAULO, 2012a).

Para a concepção dos hietogramas da região de estudo, foi utilizada a equação da Curva IDF de Aracaju elaborada por Aragão *et al.* (2013), exposta na Equação 3.6.

$$i = \frac{1092,22 \times T^{0,196}}{(t + 9,32)^{0,736}} \quad (3.6)$$

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

Para a escolha do período de retorno da chuva de projeto deve ser levada em consideração a natureza do sistema de drenagem e o risco relacionado ao seu não funcionamento, como a segurança da população. Em obras de macrodrenagem, o risco deve ser diminuído, posto que uma falha de um sistema dessa natureza acarreta prejuízos significativos. Assim, recomenda-se a utilização de um período de retorno entre 25 e 50 anos (SÃO PAULO, 2012a).

De acordo com São Paulo (2012b), nos projetos de bacias urbanas são utilizadas com mais frequência chuvas com duração entre 2 e 3 horas e distribuição de acordo com o método dos Blocos Alternados. A distribuição temporal da chuva tem grande peso no escoamento superficial gerado por ela, originando maiores volumes de escoamento quanto maior a duração da chuva (CANHOLI, 2014).

São Paulo (2012b) ainda recomenda que a distribuição temporal da chuva leve em consideração a série de eventos críticos que já ocorreram na região de estudo. Porém, não há dados de eventos críticos na área disponíveis para análise. Além disso, recomenda-se que a duração da chuva seja igual ou maior ao tempo de concentração, para que toda a bacia possa contribuir no escoamento. Porém, segundo Zahed Filho e Marcellini (1995), essa hipótese apenas é válida quando é admitido que o escoamento superficial contribuí com um regime permanente para a seção de saída.

Para determinação da duração da chuva, foi avaliada a variação da vazão de pico da bacia através da construção de um modelo concentrado dela no *software*

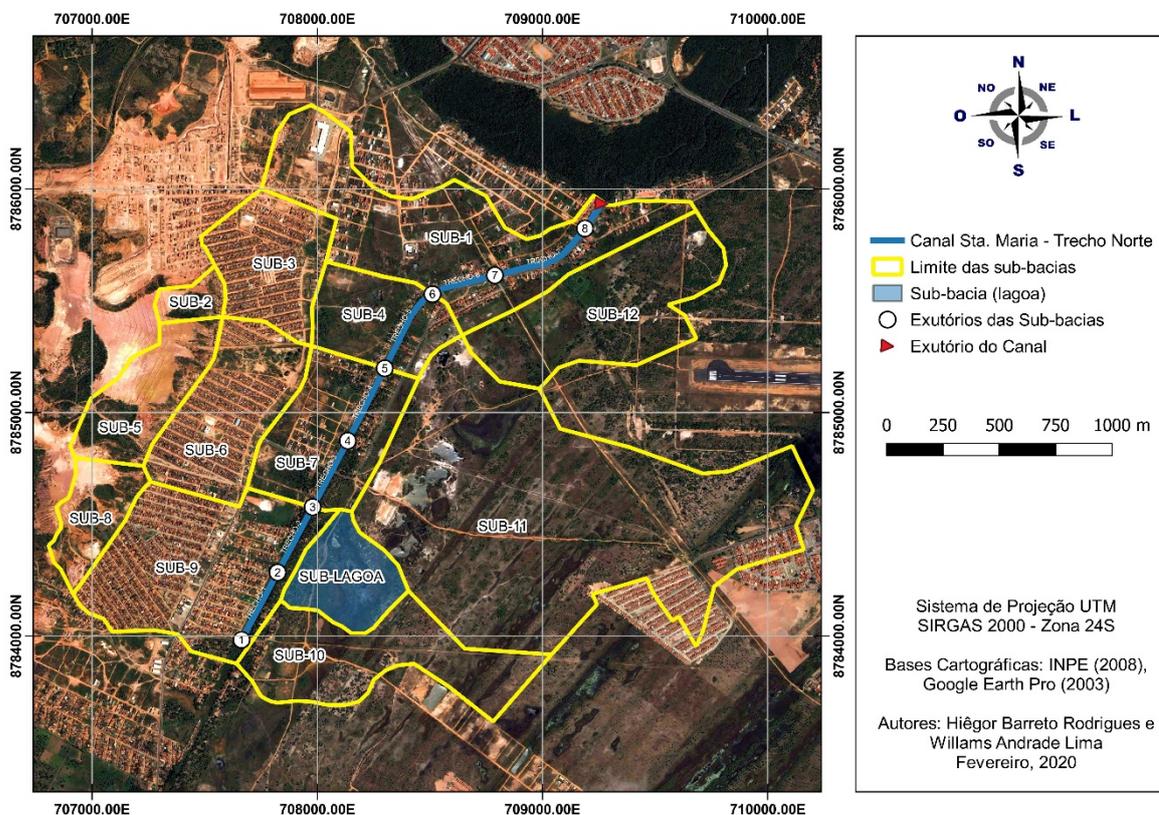
SWMM. Nesse modelo, o escoamento superficial é realizado diretamente para o exutório da bacia, desconsiderando a existência do canal. Assim, a duração da chuva de projeto é definida no instante de tempo em que a variação da vazão de pico for inferior à precisão dos equipamentos de medição de vazão em campo. (ZAHED FILHO e MARCELLINI, 1995). Para o presente trabalho, adotou-se a chuva que apresentou uma variação da vazão de pico menor que 1,0% para o aumento da duração da chuva.

Por fim, Colischonn e Dornelles (2015) recomendam que o passo de tempo Δt deve ser de 5 a 10 vezes menor que o tempo de concentração da bacia e também um submúltiplo deste mesmo valor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A região de estudo do presente trabalho foi dividida de acordo com o item 3.2, para os cenários 1, 2 e 3 em 12 (doze) sub-bacias (Figura 17), onde no cenário 1 adotou-se um cenário de urbanização inicial com o canal em seções naturais; o cenário 2 para a mesma condição de urbanização do cenário 1, porém com o canal dragado. No cenário 3, adotou-se uma condição de urbanização avançada para 30 (trinta) anos à frente do ano deste estudo com o canal também na condição dragada. Para o cenário 4, gerou-se um total de 13 (treze) sub-bacias - a área da sub-bacia da lagoa também foi contabilizada - tendo sido adotada a condição de urbanização do cenário 3 somada à urbanização (impermeabilização) da sub-bacia da lagoa.

Figura 17 - Divisão das sub-bacias projetada na imagem de satélite de 2003.



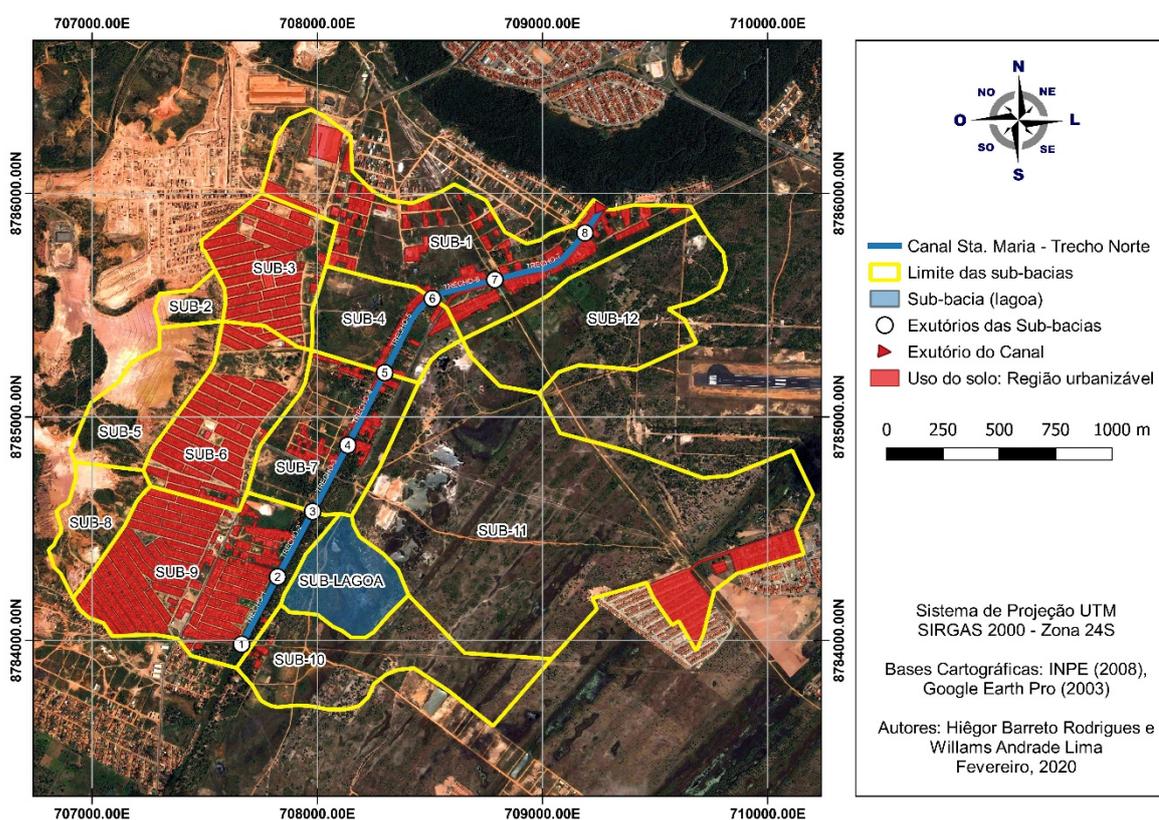
Fonte: Autores

4.1 Cenários do uso e ocupação do solo

Avaliou-se a ocupação no cenário 1 – similar ao cenário 2 – para o uso do solo. No ano de 2003, a região se encontrava em processo inicial de urbanização: os

loteamentos estavam em fase inicial de edificação de residências, conjuntos habitacionais ainda apresentavam as características de quando foram inicialmente construídos e as áreas de vazio urbano eram significativamente presentes. Identificaram-se bacias completamente não ocupadas, como a SUB-2, SUB-5 e SUB-8, que de acordo Aracaju (2004a) são áreas não recomendadas para ocupação, e a SUB-12, que é uma área dentro do perímetro do Aeroporto Santa Maria. A Figura 18 traz a ocupação do solo para os cenários 1 e 2.

Figura 18 - Uso e ocupação do solo nos cenários 1 e 2



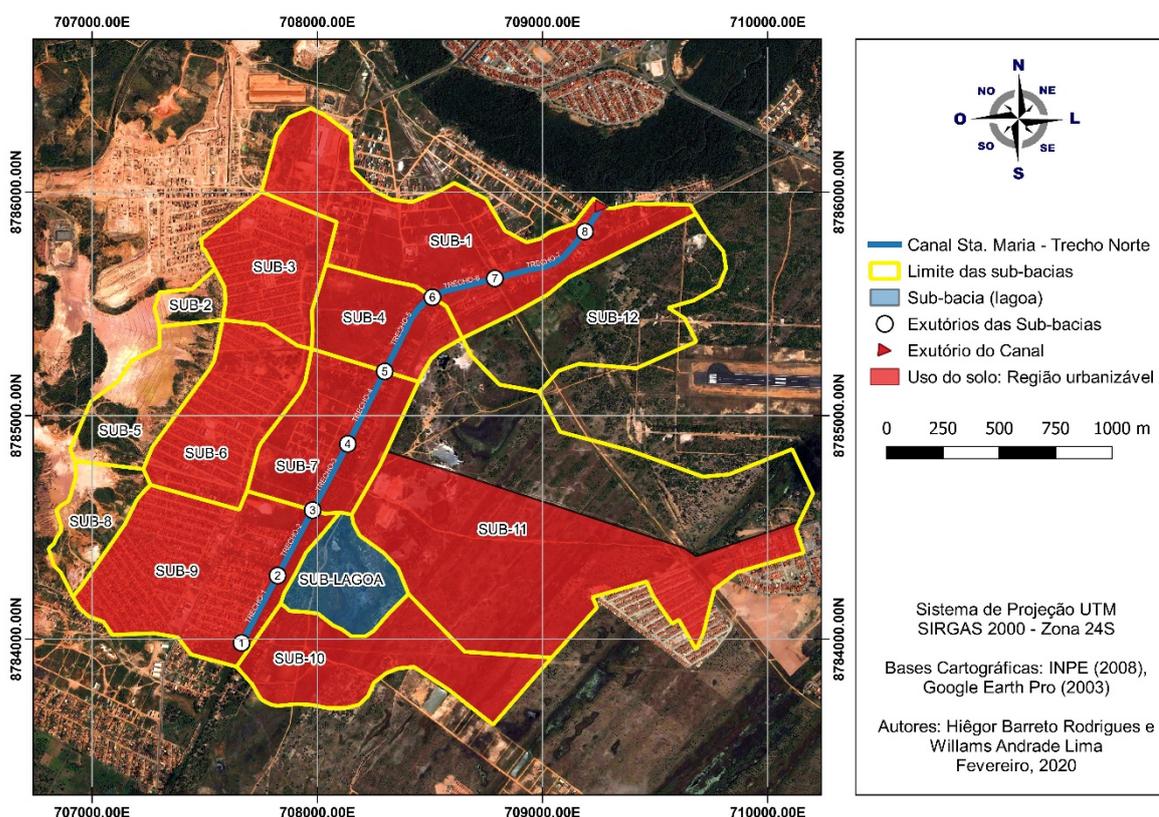
Fonte: Autores

Verificou-se que as sub-bacias SUB-4, SUB-10 e SUB-11 apresentaram baixíssimas taxas de ocupação (Figura 21), embora a SUB-4 e SUB-10 estejam majoritariamente na região de ocupação recomendada, que contém pequenas áreas com restrição (ARACAJU, 2004a). A SUB-11 apresentou-se também como uma sub-bacia de extensa área de vazio urbano, ou seja, não ocupada. No entanto, essa sub-

bacia tem áreas com restrição para a ocupação (ARACAJU, 2004a), e, de modo similar à SUB-12, essa sub-bacia se encontra na região do Aeroporto Santa Maria.

Observou-se no cenário 3 (Figura 19) a ocupação máxima permitida pelo PDDU (ARACAJU, 2000a) e ainda consideraram-se as mudanças ocorridas na região, visto que são uma realidade na data de produção deste estudo, como pavimentação asfáltica de ruas e avenidas. Uma vez que a região das sub-bacias SUB-2, SUB-5 e SUB-8 continua sem ocupação atualmente (Figura 21), e principalmente por ser uma área de ocupação não recomendada (ARACAJU, 2004a), definiu-se que as mesmas manter-se-iam sem ocupação.

Figura 19 - Uso e ocupação do solo no cenário 3



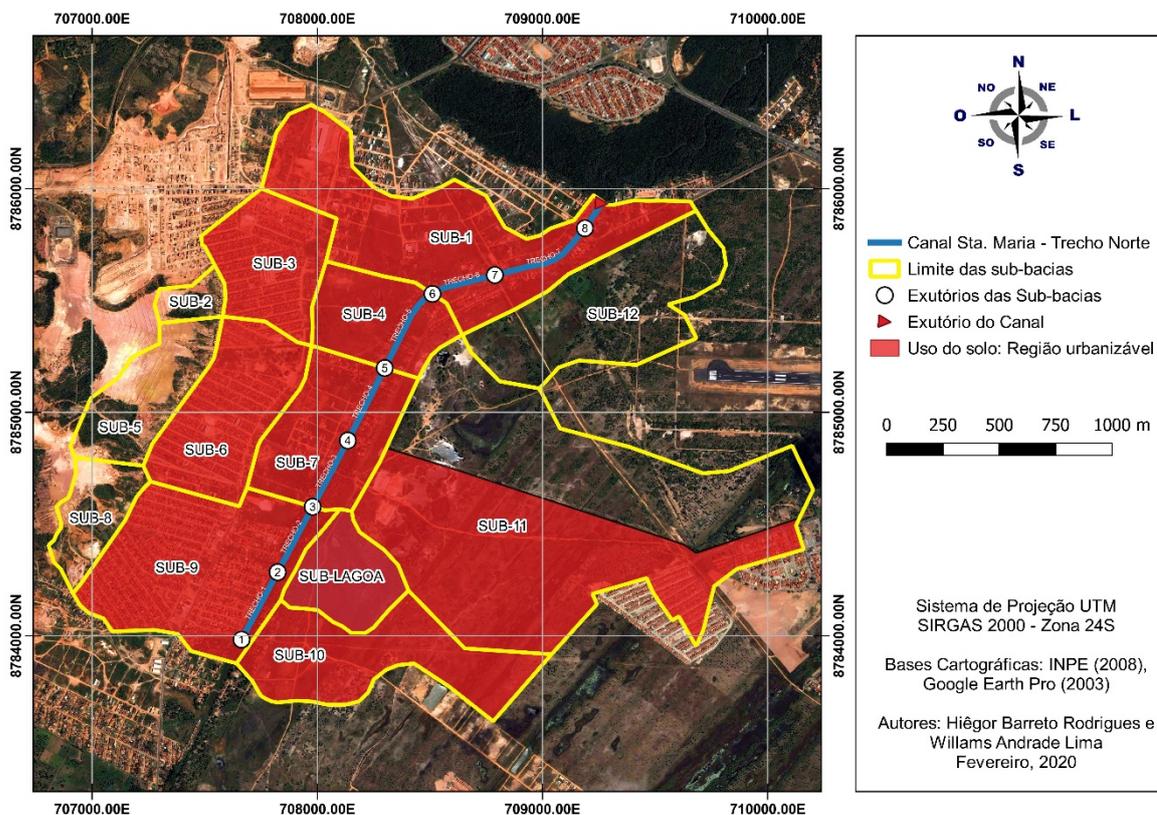
Fonte: Autores

Definiu-se que, devido à região ser pertencente ao Aeroporto Santa Maria, a área integral da SUB-12 foi mantida sem ocupação, bem como parte da SUB-11. Para esta última, realizou-se sobreposição com imagem de satélite mais atual (*Google Earth Pro 7.3.2, 2019*) georreferenciada para UTM SIRGAS 2000 ZONA 24S via QGIS

para delimitação da região do aeroporto. Dada a configuração, delimitou-se a região de ocupação e a região não ocupável. Instituiu-se que as demais sub-bacias foram ocupadas ao máximo permitido em lei (ARACAJU, 2000a).

No cenário 4 (Figura 20), verificou-se uma região em avançado processo de urbanização, uma vez que a região da lagoa do bairro 17 de Março (sub-bacia SUB-LAGOA) também fora ocupada (Figura 21). Ressalta-se que a região inteira considerada para este cenário contempla uma maior região de estudo, uma vez que a área da sub-bacia SUB-LAGOA foi contabilizada. De modo similar ao cenário 3 de uso e ocupação do solo, evidenciou-se uma ocupação em caráter total nas sub-bacias SUB-1, SUB-3, SUB-4, SUB-6, SUB-7, SUB-9 e SUB-10. Enfatiza-se que as sub-bacias SUB-2, SUB-5, SUB-8, SUB-12 e parte da SUB-11 não receberam ocupação na data projetada.

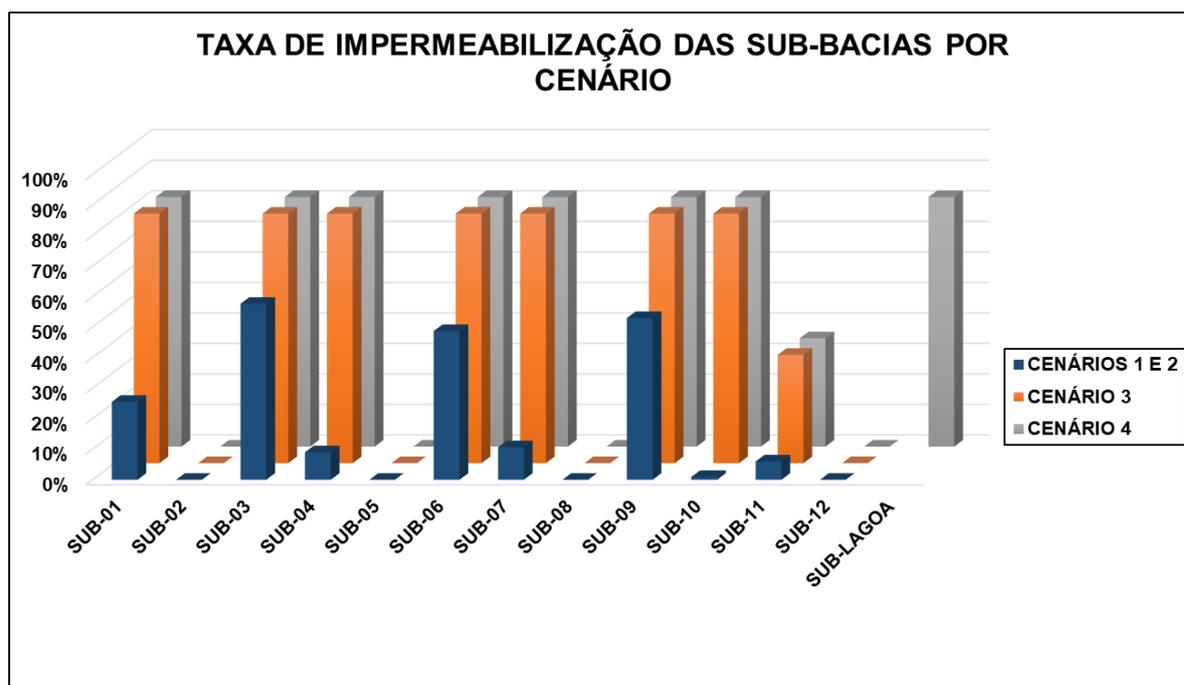
Figura 20 - Uso e ocupação do solo no cenário 4



Fonte: Autores

Para Garotti e Barbassa (2010), um parâmetro de elevada importância para o desenvolvimento urbano, como também para a previsão de enchentes, é a taxa de impermeabilização. Trazendo a ocupação do solo em função dos cenários, verificaram-se mudanças significativas nas taxas de impermeabilização (%IMP) do solo das sub-bacias. A Figura 21 traz a variação na impermeabilização do solo nas mudanças dos cenários. Apontam-se altos valores de taxa de impermeabilização máxima (81,75%) para os cenários de urbanização consolidada (cenários 3 e 4). Tal número deve-se principalmente à mínima taxa de permeabilidade admitida nos lotes da região analisada, permitido em lei pelo PDDU do município de Aracaju, que é de 5% (Quadro 1). A cidade de São Paulo, pela Lei N° 16.402, de 22 de março de 2006, de parcelamento e uso do solo na capital paulista, determinou a manutenção de uma taxa de permeabilidade média de 20% do lote, e ainda assim a cidade de São Paulo enfrenta problemas relacionados a políticas públicas para a drenagem urbana.

Figura 21 - Impermeabilização das sub-bacias

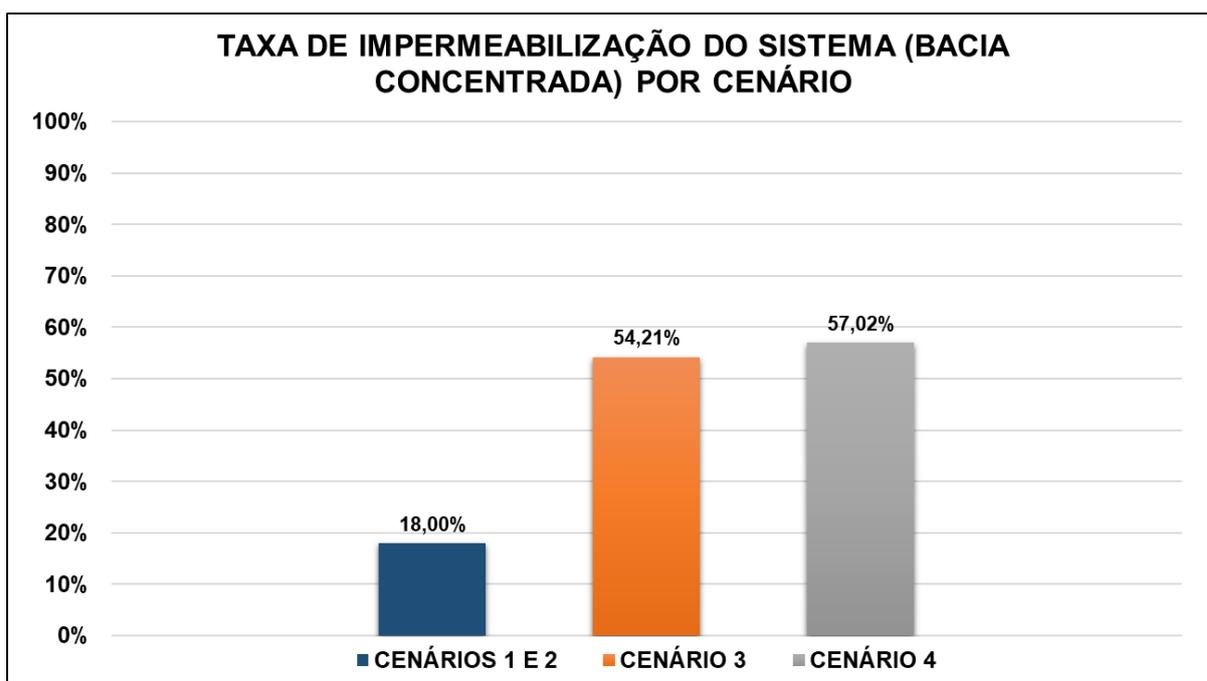


Fonte: Autores

A taxa de impermeabilização média do solo para ambos os cenários 1 e 2 foi de 18,00% (Figura 22) e saltou mais de 3 (três) vezes (201,17%) para a ocupação projetada para o ano de 2050, chegando a uma taxa de impermeabilização de 54,21%

(Figura 22). O cenário 4 mostrou-se ainda mais impermeabilizado, com uma taxa de impermeabilização do solo de 57,02% de sua área total. SANTOS (2014) *et al. apud* SANTOS; RUFINO; BARROS FILHO, (2017) verificaram taxa de impermeabilização do solo de 57% no ano de 2014 para bairros de urbanização consolidada com problemas de inundações em Campina Grande, PB.

Figura 22 - Impermeabilização do sistema por cenário

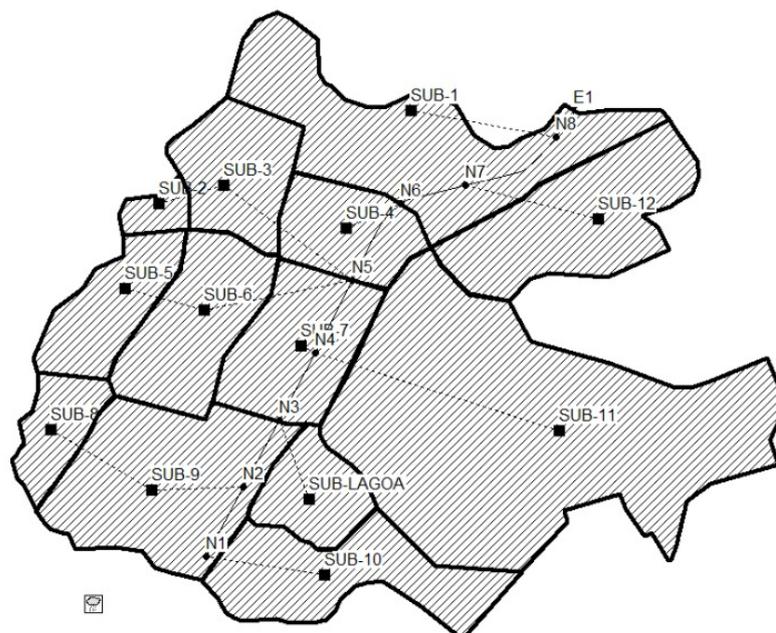


Fonte: Autores

4.2 Caracterização hidrodinâmica das sub-bacias

Como abordado em seções anteriores, o desenho das sub-bacias no SWMM apenas tem a finalidade ilustrativa, sendo assim dispensável o contorno primoroso das sub-bacias. A modelagem delas no SWMM está ilustrada na Figura 23. Para este *software* processá-las, foram inseridas manualmente as propriedades.

Figura 23 – Modelo com as sub-bacias em destaque no software SWMM.



Fonte: Autores

Com o avanço da urbanização, devido à nova ocupação do solo, as sub-bacias possuem diferentes propriedades para cada cenário estudado. A Tabela 2, a Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os valores dos parâmetros das sub-bacias para cada cenário estudado.

Tabela 2 - Parâmetros das sub-bacias nos cenários 1 e 2

Cenários 1 e 2						
Ident	Exutório	Área (ha)	W (m)	Declividade	% IMP	CN médio
SUB-01	N8	66,88	2265,81	1,47%	25,53%	67
SUB-02	SUB-3	5,12	322,96	8,14%	0,00%	87
SUB-03	SUB-4	26,29	639,41	4,90%	57,65%	85
SUB-04	N6	22,77	495,00	0,76%	9,00%	63
SUB-05	SUB-6	22,41	779,96	8,79%	0,00%	87
SUB-06	SUB-7	33,92	833,58	5,78%	48,71%	84
SUB-07	N4	33,48	696,23	0,40%	10,68%	64
SUB-08	SUB-9	14,19	607,24	10,91%	0,00%	87
SUB-09	N2	56,21	1100,27	2,27%	52,98%	85
SUB-10	N1	38,55	1528,31	0,08%	0,93%	39
SUB-11	N4	156,85	2403,47	0,18%	6,01%	41
SUB-12	N7	45,34	1245,57	0,71%	0,00%	39

Fonte: Autores

Tabela 3 - Parâmetros das sub-bacias no cenário 3

Cenário 3						
Ident	Exutório	Área (ha)	W (m)	Declividade	% IMP	CN médio
SUB-01	N8	66,88	2265,81	1,47%	81,75%	81
SUB-02	SUB-3	5,12	322,96	14,72%	0,00%	87
SUB-03	N5	26,29	639,41	1,59%	81,75%	88
SUB-04	N6	22,77	495,00	0,76%	81,76%	81
SUB-05	SUB-6	22,41	779,96	13,99%	0,00%	87
SUB-06	N5	33,92	833,58	1,55%	81,76%	88
SUB-07	N4	33,48	696,23	0,40%	81,75%	81
SUB-08	SB-9	14,19	607,24	10,91%	0,00%	87
SUB-09	N2	56,21	1100,27	2,27%	81,74%	88
SUB-10	N1	38,55	1528,31	0,08%	81,75%	70
SUB-11	N4	156,85	2403,47	0,18%	35,48%	52
SUB-12	N7	45,34	1245,57	0,71%	0,00%	39

Fonte: Autores

Tabela 4 - Parâmetros das sub-bacias no cenário 4

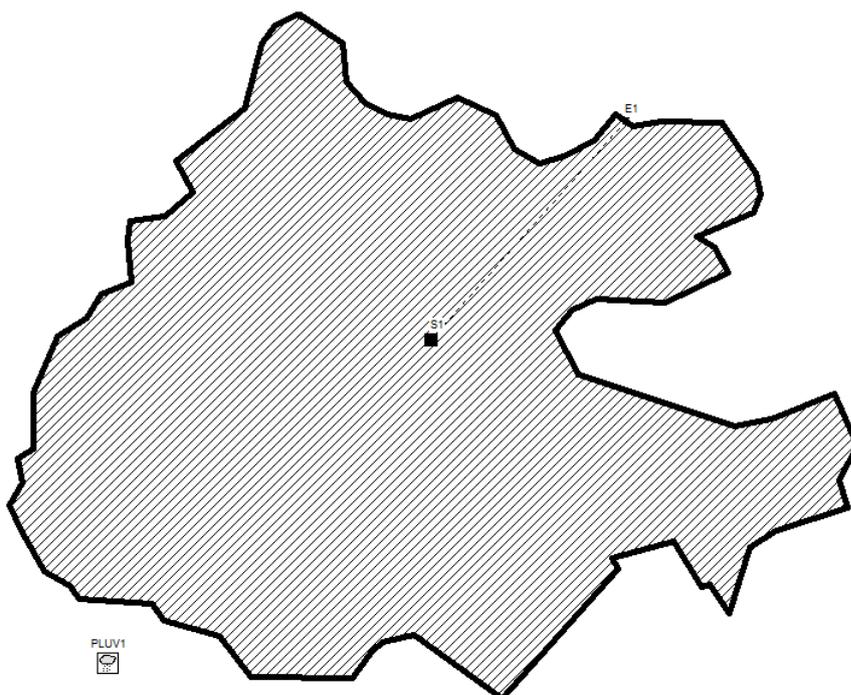
Cenário 4						
Ident	Exutório	Área (ha)	W (m)	Declividade	% IMP	CN médio
SUB-01	N8	66,88	2265,81	1,47%	81,75%	81
SUB-02	SUB-3	5,12	322,96	14,72%	0,00%	87
SUB-03	N5	26,29	639,41	1,59%	81,75%	88
SUB-04	N6	22,77	495,00	0,76%	81,76%	81
SUB-05	SUB-6	22,41	779,96	13,99%	0,00%	87
SUB-06	N5	33,92	833,58	1,55%	81,76%	88
SUB-07	N4	33,48	696,23	0,40%	81,75%	81
SUB-08	SB-9	14,19	607,24	10,91%	0,00%	87
SUB-09	N2	56,21	1100,27	2,27%	81,74%	88
SUB-10	N1	38,55	1528,31	0,08%	81,75%	70
SUB-11	N4	156,85	2403,47	0,18%	35,48%	52
SUB-12	N7	45,34	1245,57	0,71%	0,00%	39
SUB-LAGOA	N3	17,91	464,05	0,17%	81,73%	70

Fonte: Autores

4.2.1 Modelo concentrado da bacia

As características do modelo concentrado da bacia foram obtidas através da análise de todas as sub-bacias, ponderando as características de cada uma para se obter os parâmetros necessários para a modelagem. A Figura 24 ilustra a modelagem no SWMM.

Figura 24 – Modelo concentrado da bacia no software SWMM.



Fonte: Autores

A bacia concentrada possui as seguintes características: área de 539,02 ha; largura média de 5397,11 metros; declividade média de 1,78%; 55,13% de área impermeável; CN médio de 70. Os outros parâmetros são iguais aos escolhidos na modelagem das sub-bacias.

Para o tempo de concentração da bacia adotou-se o maior dos tempos de concentração das sub-bacias que formam o modelo, com duração de aproximadamente 180 minutos. Assim, adotou-se um passo de tempo de 20 minutos para a chuva de projeto, atendendo às recomendações de Colischonn e Dornelles (2015).

Para a determinação da duração da chuva, foram elaborados hietogramas de diferentes durações e com período de retorno de 30 anos, atendendo à recomendação feita por São Paulo (2012a). Os hietogramas elaborados para as chuvas estão retratados no Apêndice A. Posteriormente, as chuvas foram inseridas no modelo para análise da variação das vazões de pico geradas. Os resultados estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Variação das vazões de pico geradas por diferentes durações de chuva

Chuva (min)	Vazão de pico (m ³ /s)	Variação
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: Autores

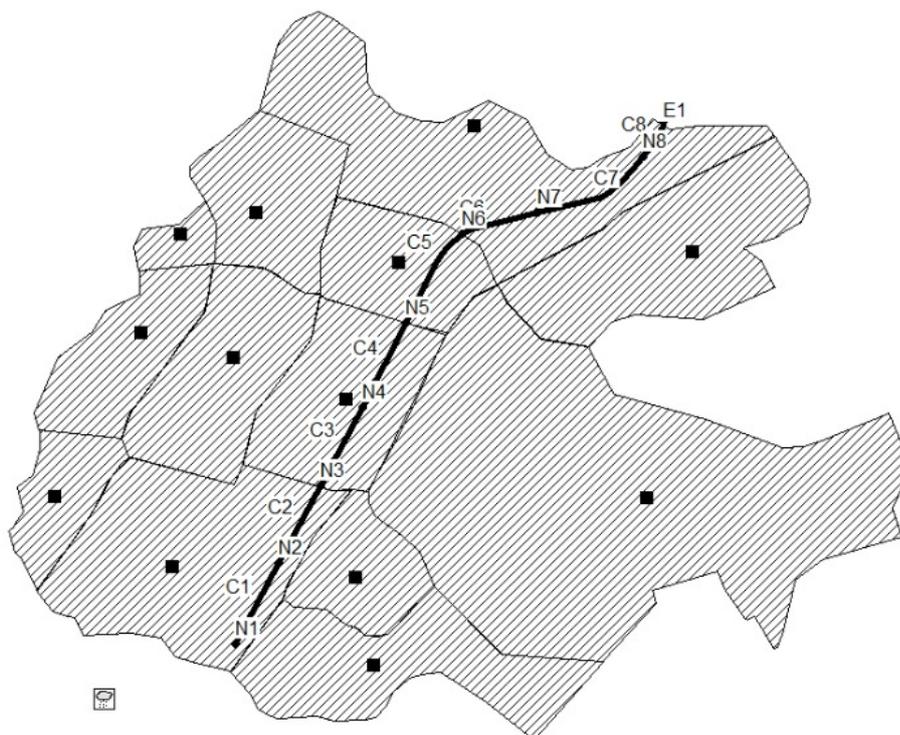
Nota-se a diminuição da variação percentual com o aumento da duração da chuva, fazendo com que essa variação comece gradativamente a perder significância. A partir de 360 minutos de duração de chuva, a variação passou a ser menor que 1,0%, atendendo ao critério abordado no item 3.6 - Estudo Hidrológico.

4.3 Caracterização dos condutos

Dividiu-se o trecho de estudo do Canal Santa Maria em 8 condutos a partir dos exutórios das sub-bacias, como descrito no item 3.5.2. A modelagem dos condutos no SWMM está ilustrada na Figura 25.

Assim como as sub-bacias, o desenho dos condutos no SWMM é apenas ilustrativo. Para o processamento, as propriedades dos condutos no SWMM foram inseridas manualmente.

Figura 25 – Modelo com os condutos em destaque no software SWMM.



Fonte: Autores

Com a realização da dragagem do canal, os condutos passaram a apresentar diferentes propriedades para cada cenário estudado. A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam os valores dos parâmetros dos condutos para cada cenário estudado, antes e após a dragagem.

Tabela 6 - Parâmetros dos condutos no cenário 1

Cenário 1							
Ident	Comp. (m)	Nó montante	Nó jusante	Cota NM	Cota NJ	Declividade	Rugosidade
C1	341,32	N1	N2	3,69	3,24	0,13%	0,035
C2	331,33	N2	N3	3,24	2,81	0,13%	0,035
C3	334,93	N3	N4	2,81	2,58	0,07%	0,035
C4	363,64	N4	N5	2,58	2,64	-0,02%	0,035
C5	399,52	N5	N6	2,64	1,21	0,36%	0,035
C6	291,18	N6	N7	1,21	0,48	0,25%	0,035
C7	470,56	N7	N8	0,48	-0,30	0,17%	0,035
C8	133,49	N8	E1	-0,30	-0,89	0,44%	0,035

Fonte: Autores

Tabela 7 - Parâmetros dos condutos nos cenários 2, 3 e 4

Cenário 2, 3 e 4							
Ident	Comp. (m)	Nó montante	Nó Jusante	Cota NM	Cota NJ	Declividade	Rugosidade
C1	341,32	N1	N2	-0,35	-0,83	0,14%	0,025
C2	331,33	N2	N3	-0,83	-1,30	0,14%	0,025
C3	334,93	N3	N4	-1,30	-1,62	0,09%	0,025
C4	363,64	N4	N5	-1,62	-1,93	0,09%	0,025
C5	399,52	N5	N6	-1,93	-2,07	0,04%	0,025
C6	291,18	N6	N7	-2,07	-2,21	0,05%	0,025
C7	470,56	N7	N8	-2,21	-2,55	0,07%	0,025
C8	133,49	N8	E1	-2,55	-2,65	0,07%	0,025

Fonte: Autores.

É notável a mudança no índice de rugosidade, antes e depois da dragagem. Nos anos anteriores à obra do canal, ele, além de ter forma irregular por muitos trechos, apresentava-se coberto de vegetação e com lixo. Já nos cenários pós-dragagem, foi considerado que o canal seria limpo, tendo como revestimento solo em boas condições. Assim, os coeficientes utilizados foram de 0,035 e 0,025, respectivamente, como recomendado por Azevedo Netto e Alvarez (1982). A Figura 26 mostra a situação em 2019 da região inicial do trecho estudado do Canal Santa Maria, enquanto a Figura 27 faz um comparativo da situação da região do conduto 3 em 2019 e quando a obra de dragagem foi realizada, em 2015.

Embora a situação mais recente do canal seja dissemelhante ao apresentado nos projetos de dragagem da EMURB, modelou-se o canal para os cenários 2, 3 e 4 de acordo com as condições informadas em projeto, ou seja, em um dos melhores cenários de uso. A Figura 28 mostra a condição em 2019 na região inicial do conduto 5 e a Figura 29 traz a condição do conduto 6 do trecho analisado do canal para diferentes meses em 2019; quando se fez a limpeza em maio de 2019 e a situação em dezembro do mesmo ano. Por fim, a Figura 30 mostra a situação em 2019 dos trechos finais do canal, condições grandemente diferentes das condições de projeto.

Figura 26 – Situação do Canal Santa Maria em 2019 nas proximidades do conduto 1



Fonte: Autores

Figura 27 - Situação do Canal Santa Maria para o conduto 3 em 2019 (esquerda) e durante das obras de dragagem (2015)



Fonte: Esquerda – Autores; Direita – Aracaju (2015a)

Figura 28 - Situação do Canal Santa Maria para o conduto 5 em 2019



Fonte: Autores

Figura 29 - Situação do Canal Santa Maria para o conduto 6 em 2019



Fonte: Esquerda – Aracaju (2019); Direita – Autores

Figura 30 - situação do Canal Santa Maria para os condutos 7 (esquerda) e 8 (direita), nas proximidades do exutório do trecho do canal em 2019



Fonte: Autores

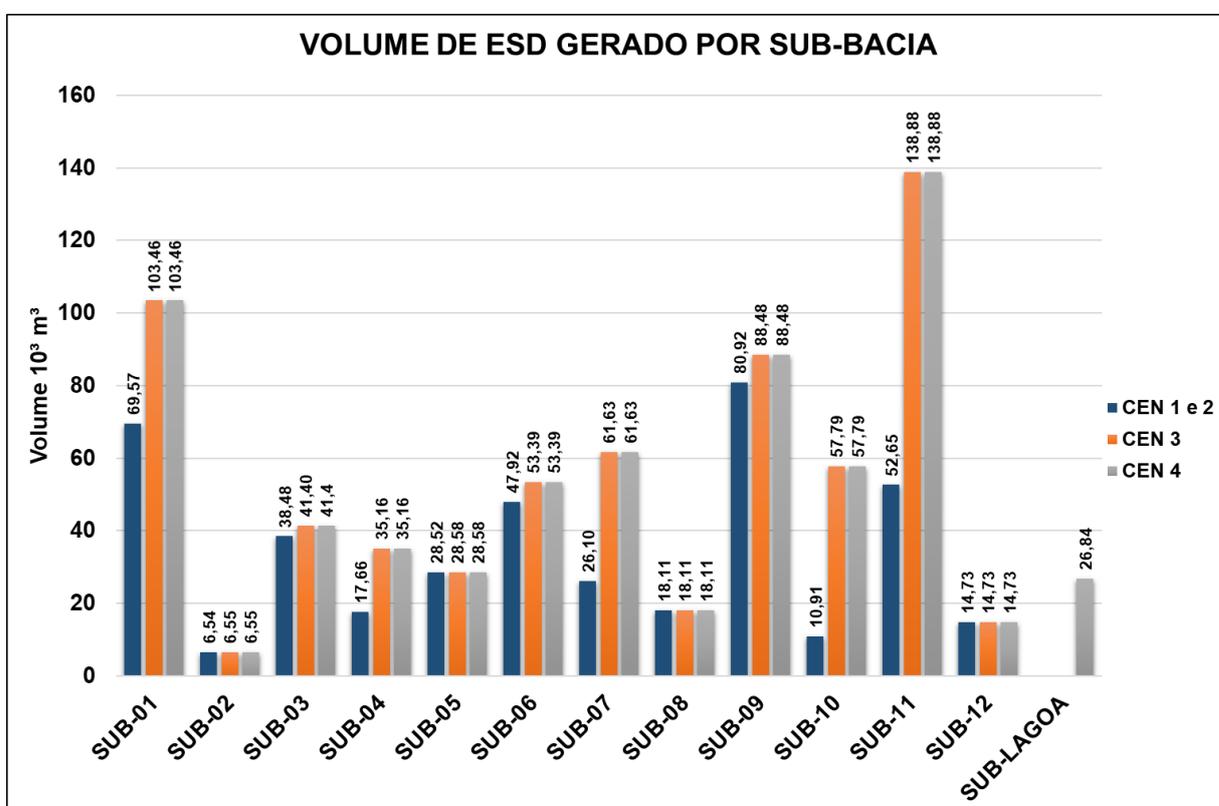
4.4 Comparativos

4.4.1 Volume de pico de ESD

É possível notar que todas as bacias que foram urbanizadas apresentaram aumento do escoamento superficial direto (Figura 31). As sub-bacias que apresentavam baixa impermeabilização nos cenários 1 e 2 são as que apresentaram a maior variação de volume de ESD gerado. A SUB-10, por exemplo, que possuía 0,93% de área impermeável, gerou um volume de ESD 5,3 vezes maior após a impermeabilização máxima prevista por lei. A SUB-03, por sua vez, já possuía 57,65% de área impermeável nos cenários 1 e 2, apresentando, assim, um crescimento menor do volume de ESD gerado após a impermeabilização máxima.

As sub-bacias SUB-02, SUB-08 e SUB-12 não apresentaram aumento do volume de ESD, pois são áreas que não podem ser urbanizadas. A sub-bacia da lagoa apresentou ESD apenas no cenário 4, dado que foi preservada nos demais cenários.

Figura 31 - Volume de pico de escoamento gerado nas sub-bacias



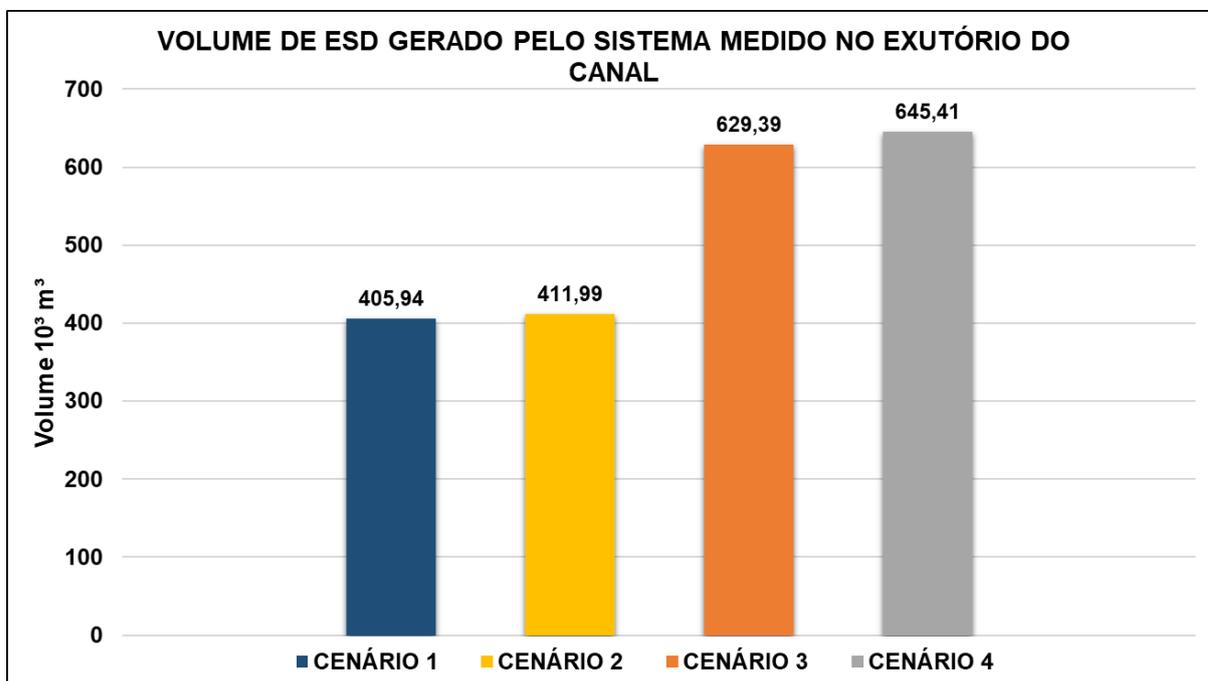
Fonte: Autores

O volume de ESD escoado pelo sistema apresentou um pequeno crescimento do cenário 1 para o cenário 2, apesar de os dois cenários possuírem a mesma impermeabilização das sub-bacias. Isso se deve ao fato de que o canal do cenário 1 possui um conduto com declividade negativa (conduto 4), represando parte do volume de escoamento gerado pelo sistema. Já no cenário 2, o canal dragado possui todos os trechos com a declividade positiva, possibilitando o escoamento de todo o volume gerado.

Após a máxima impermeabilização prevista por lei, o volume de ESD escoado pelo sistema apresentou um crescimento maior que 50% quando comparado o cenário 3 com o cenário 2, demonstrando o impacto da urbanização da região no escoamento. Além disso, a impermeabilização da região da lagoa também gerou um crescimento

no ESD considerável, evidenciado na comparação do cenário 4 com o cenário 3 na Figura 32.

Figura 32 - Volume de pico de escoamento gerado pelo sistema nos diferentes cenários



Fonte: Autores

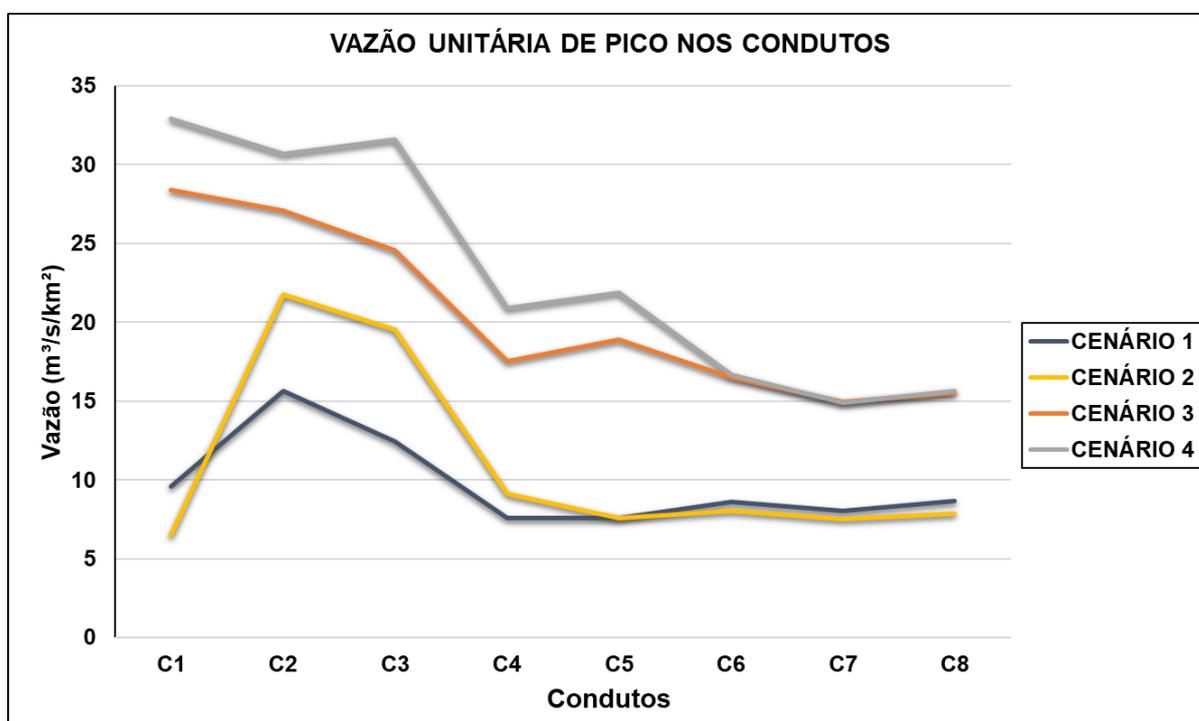
4.4.2 Vazão de pico unitária

Para a vazão de pico unitária, consideraram-se as sub-bacias contribuintes na vazão de acordo com os talwegues para cada cenário (Apêndices B e C). No cenário 1, a vazão de pico unitária foi máxima no conduto 2, uma vez que ele recebe a contribuição de uma sub-bacia de expressiva taxa de impermeabilização, a SUB-9. Após o conduto 4, a vazão unitária no cenário 1 tendeu a se tornar constante até o fim do escoamento no canal. O cenário 2 mostrou comportamento semelhante ao cenário 1, porém com vazão unitária de pico aproximadamente 40% maior no conduto 2 e 57% maior no conduto 3; a vazão de pico no conduto 2 foi 17,04 m³/s no cenário 1 e 23,71 m³/s no cenário 2 para as mesmas sub-bacias de contribuição. Este comportamento é justificado pela superior capacidade hidráulica do canal no cenário 2, apresentando seções transversais maiores, 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.

Os cenários com urbanização consolidada, 3 e 4, também se mostraram semelhantes. Em ambos, a vazão de pico unitária foi decrescente, ou seja, conforme a área de contribuição aumentou, a vazão unitária foi decrescida. No cenário 4, notou-se um aumento na vazão unitária de pico no conduto 3. Tal fenômeno se deve ao fato de que a contribuição da sub-bacia da lagoa, no cenário 4, ocorre no conduto 3. A partir do conduto 6, as vazões unitárias de pico dos cenários 3 e 4 tendem a se equiparar, perfazendo valores de $15,51 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ no conduto 8 do cenário 3 e $15,66 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ no mesmo conduto do cenário 4. A Figura 33 traz as variações nas vazões de pico dos condutos nos diferentes cenários.

Figura 33 - Vazão de pico unitária nos condutos para os diferentes cenários



Fonte: Autores

4.4.3 Relação y/D

No cenário 1, os condutos manifestaram falta de capacidade hidráulica para o escoamento necessário do volume gerado pelo sistema. Essa incapacidade é evidenciada nos condutos 2, 3, 6 e 7. Os condutos 2 e 6 apresentaram y/D máximo

superior a 0,9, descumprindo a recomendação de São Paulo (2012a), onde aconselha-se que deve ser garantida uma borda livre de 0,1 a 0,2y, a fim de garantir segurança adicional ao transbordamento, absorção de ondas e imprecisões nos parâmetros de projeto. Nos condutos 3 e 7 verificou-se uma situação ainda mais grave, onde a lâmina de água supera a capacidade do conduto, ocorrendo transbordamento do canal. A situação apresentada no cenário 1 corroborou com a necessidade da realização da dragagem no canal, que foi simulada nos cenários seguintes.

No cenário 2, a dragagem do canal mostrou efetividade. Todos os condutos apontaram capacidade hidráulica para o escoamento do volume gerado, com y/D máximo de 0,61 no conduto 6, respeitando a recomendação de São Paulo (2012a).

Já no cenário 3, percebe-se a insuficiência da dragagem do canal. A partir do conduto 5, todos os condutos ultrapassaram a recomendação de borda livre de São Paulo (2012a), com o conduto 6 apresentando transbordamento. Esse efeito é causado pela impermeabilização da área e, somado a isso, a concentração de chegada de escoamento no nó N5, causada pela construção de canais que drenam as sub-bacias, SUB-3 (Figura 34), SUB-5 (Figura 35) e SUB-6 (Figura 36) e concentram os seus escoamentos no início do conduto 5, sobrecarregando-o e os demais à jusante.

Figura 34 - Sistema de drenagem existente na SUB-3



Fonte: Autores

Figura 35 - Canais de drenagem existentes na SUB-6



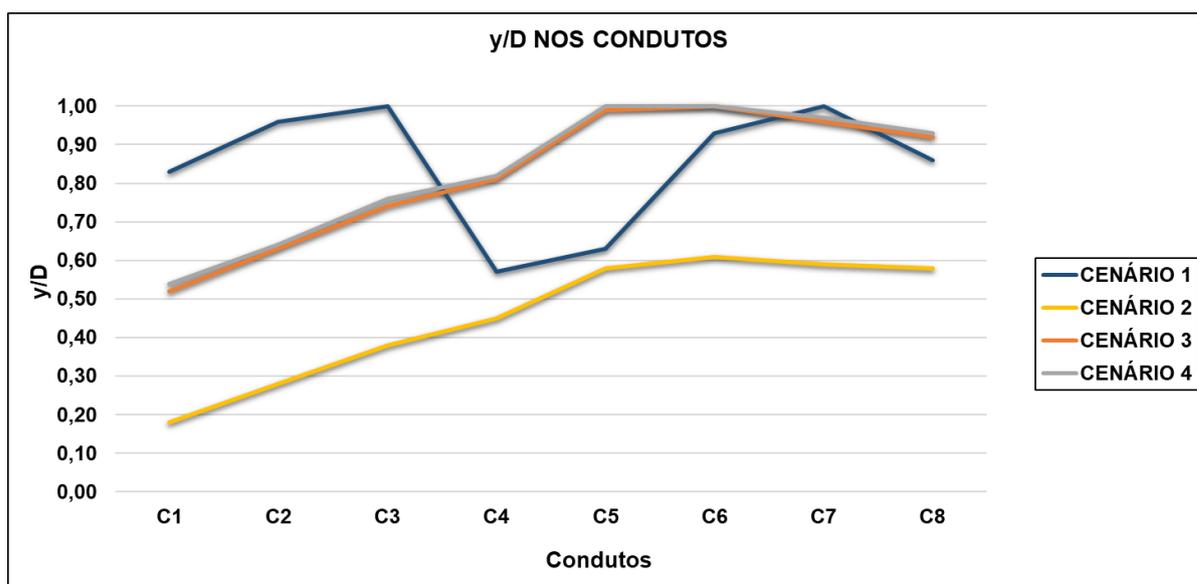
Fonte: Autores

Figura 36 – Canal de drenagem existem na SUB-5



Fonte: Autores

Com a impermeabilização da região da lagoa, a situação torna-se ainda mais grave, com o aumento da relação y/D máxima em todos os condutos e causando transbordamento nos condutos 5 e 6. A Figura 37 traz a visualização da variação da relação y/D ao longo dos condutos nos diferentes cenários.

Figura 37 - Relação y/D dos condutos do canal nos diferentes cenários

Fonte: Autores. C – Conduto

As modelagens do canal nos instantes de cheia em cada cenário estão ilustradas no Apêndice E.

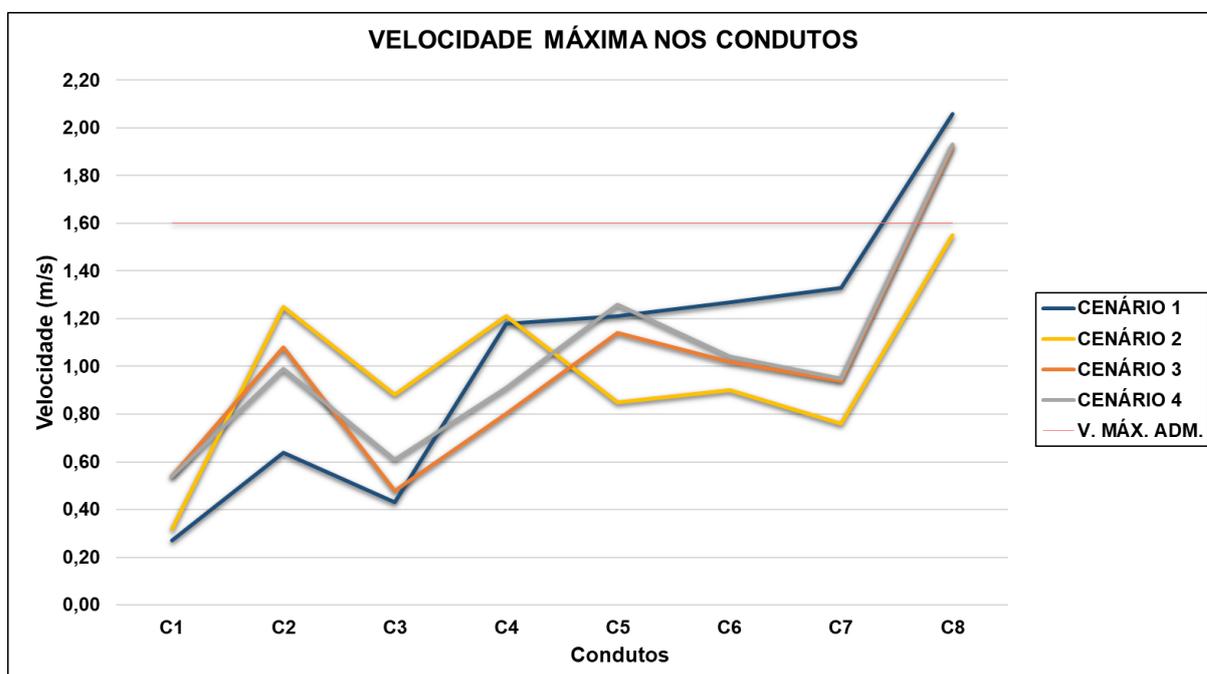
4.4.4 Velocidade do escoamento

Para a mesma taxa de impermeabilização (cenário 1 e 2), a velocidade do escoamento nos condutos apresentou variação de acordo, principalmente, com o coeficiente de rugosidade e a declividade. Do início até o conduto 4, os condutos pré e pós-dragagem possuem declividades similares, assim o coeficiente de rugosidade é o principal diferencial (Tabela 6 e Tabela 7). Devido a isso, os condutos 1, 2 e 3 apresentaram maiores velocidades no cenário 2 por possuírem um menor coeficiente de rugosidade, facilitando o escoamento. A partir do conduto 4, porém, identificou-se que a declividade possui maior influência na velocidade, pois os condutos no cenário 1 possuem declividade muito mais acentuada que no cenário 2. Assim, mesmo com maior coeficiente de rugosidade, os condutos 5, 6, 7 e 8 apresentaram maior velocidade no cenário 1, devido à maior declividade dos condutos quando comparados ao cenário 2.

Com a urbanização da sub-bacia da lagoa, ela contribuiu com o seu ESD no conduto 3, e, assim, notou-se uma diminuição da velocidade à montante e aumento, à jusante (Figura 38). Esse efeito é causado pelo aumento da lâmina de água no ponto

de contribuição, que desacelera o escoamento que chega no ponto, ao mesmo tempo em que aumenta a velocidade a partir dele.

Figura 38 - Velocidade de pico nos condutos do canal em diferentes cenários



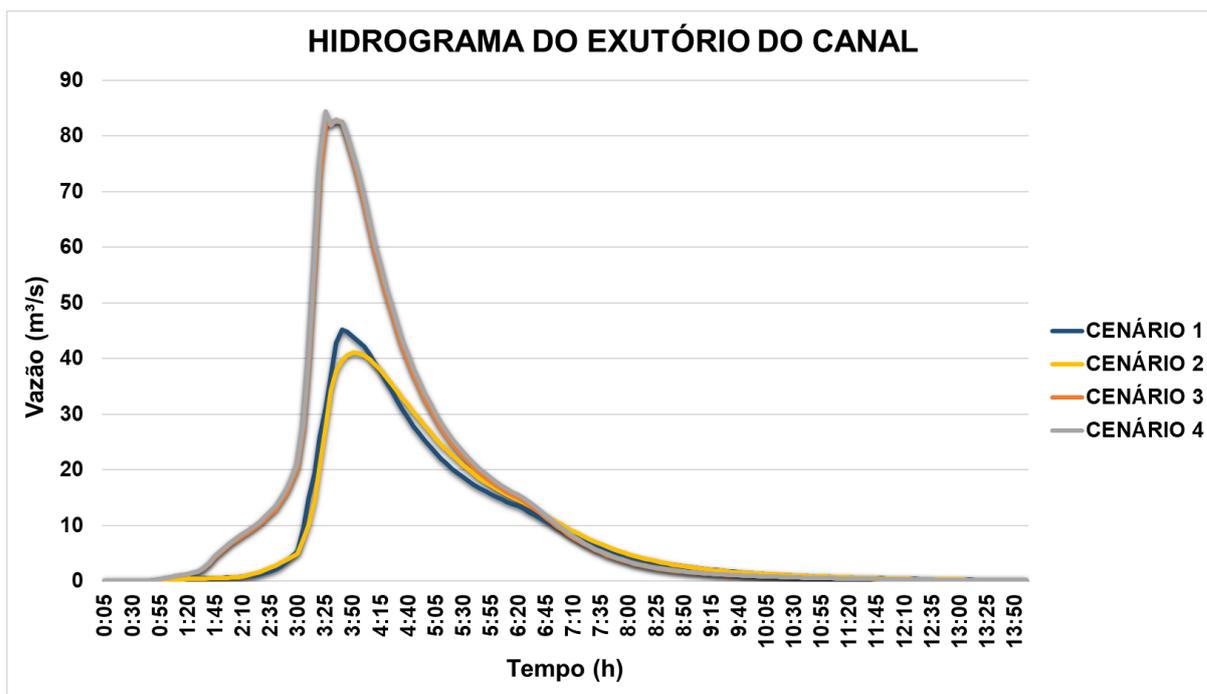
Fonte: Autores. C – Conduto

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 o conduto 8 ultrapassa esse limite nos cenários 1, 3 e 4. A extrapolação desse limite põe em risco a integridade dos taludes do canal, podendo causar erosão da superfície, diminuindo a capacidade hidráulica do conduto.

4.4.5 Hidrograma do exutório

Para os cenários 1 e 2, que possuem a mesma taxa de impermeabilização, o hidrograma apresenta uma pequena diferença em seu pico (Figura 39). Essa dissemelhança é ocasionada pela diferença de velocidade entre os dois cenários – como visto no item 4.4.4 – causada pela dragagem do canal. Assim, como o cenário CEN-1 apresenta uma maior velocidade no exutório, a sua vazão de pico alcança maiores valores quando comparado com o mesmo ponto no cenário CEN-2: 45,22 m³/s e 41,12 m³/s, respectivamente.

Figura 39 - Hidrograma no exutório do trecho analisado do Canal Santa Maria



Fonte: Autores.

Quando são comparados os cenários CEN-1 e CEN-2 com os cenários CEN-3 e CEN-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 CEN-2 com os cenários CEN-3 e CEN-4.

Por fim, os cenários CEN-3 e CEN-4 apresentaram sensível variação em sua vazão de pico. O cenário CEN-3 apresentou vazão de pico de 82,62 m³/s no exutório, enquanto o cenário CEN-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

Este trabalho compreende a modelagem hidrológica da região de estudo e a modelagem hidrodinâmica de um trecho do Canal Santa Maria no *software* SWMM, através das quais foram obtidos resultados fundamentais para a análise dos impactos do processo de urbanização.

As sub-bacias da região de estudo demonstraram heterogeneidade na porcentagem de área impermeável no estágio inicial de urbanização, indicando que a ocupação da região não se deu de maneira uniforme ao longo do tempo. Como resultado, as bacias mais ocupadas no estágio inicial de urbanização apresentaram maiores parcelas impermeáveis, gerando maiores volumes de escoamento superficial e maiores participações no escoamento gerado no sistema.

Observou-se também o crescimento significativo de volume de escoamento superficial direto gerado pelas sub-bacias após a consolidação da urbanização. Esse efeito mostrou-se ainda mais intenso nas sub-bacias que apresentaram pouca urbanização no estágio inicial, onde os volumes gerados aumentaram expressivamente, chegando a aumentar mais de 5 vezes em uma das sub-bacias analisadas.

Verificou-se que, na situação corrente, o trecho de estudo do Canal Santa Maria necessita da realização de uma nova dragagem para atender ao seu propósito de maneira eficiente e satisfatória. O projeto de dragagem aprovado, porém, demonstrou-se insuficiente para atender à população a longo prazo, pois foi verificado que o canal, mesmo dragado, não suporta o escoamento gerado pelas sub-bacias com a urbanização consolidada. Com a realização do projeto aprovado, faz-se necessária a implantação de medidas compensatórias, estruturais e não-estruturais, visando amortecer a onda de cheia do canal.

Foi evidenciado o impacto significativo da lagoa do Bairro 17 de Março na drenagem da região de estudo, atuando na retenção da chuva que cai em sua sub-bacia. No caso de não preservação da lagoa, bem como de sua região circundante e urbanização da sua área de contribuição, o sistema de macrodrenagem manifestará falhas ainda mais críticas, podendo causar perdas materiais e até mesmo humanas. Recomenda-se ainda que sejam realizados outros estudos na região, simulando a lagoa como uma medida compensatória estrutural – como uma bacia de retenção –

avaliando mais profundamente o seu impacto no sistema de drenagem e, conseqüentemente, a importância da sua preservação.

Foram vislumbradas *in loco* práticas danosas para o correto funcionamento do sistema de drenagem. Verificou-se que existem lotes em que a porcentagem de área impermeável excede o limite máximo permitido por lei, chegando a aproximadamente 95% de área impermeável e, em casos extremos, a 100%. Essas práticas reforçam a importância de políticas públicas no uso consciente do solo, como o aumento da taxa de permeabilidade imposta pelo PDDU, aumento de áreas verdes nos bairros e maior atenção dos órgãos fiscalizadores, a fim de evitar tais extrapolações.

Além disso, existem trechos do canal com lançamentos irregulares de esgoto e resíduos sólidos pela população, reduzindo a capacidade hidráulica do canal. Nesse âmbito, recomenda-se também a conscientização da população para melhores práticas de convivência homem-meio.

Diante dos resultados obtidos neste estudo, sugere-se o monitoramento climático da região, a medição da vazão dos canais e ainda o estudo acerca do remanso causado pela elevação da maré, objetivando o melhor entendimento do comportamento e reposta hidrológica da região. Além disso, os dados obtidos podem ser utilizados para a calibração de modelos de futuros estudos, visando modelar a região com um maior nível de discretização, assemelhando-se cada vez mais à realidade.

6 REFERÊNCIAS

ANJOS, M. W. B.; GANHO, N.; ARAÚJO, H. M.. Uma análise dos contrastes topoclimáticos no espaço urbano e periurbano de Aracaju/SE: Os campos térmicos e higrométricos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, n. 9, p. 298-318, 2013.

ARACAJU. **Ações de limpeza no Santa Maria geram satisfação entre moradores**. 24 mai 2019. Disponível em <https://www.aracaju.se.gov.br/noticias/81489>. Acesso em 18 jan. 2020.

ARACAJU. **Avança novo trecho da dragagem do Canal do Santa Maria**. Sem data. Disponível em <https://www.aracaju.se.gov.br/index.php?act=leitura&codigo=68758>. Acesso em 18 jan. 2020.

ARACAJU. **Lei Complementar Nº 42 de 04 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, 2000a.

ARACAJU. **Lei Municipal Nº 2811 de 08 de maio de 2000**. Denomina bairros e dá outras providências. Aracaju, 2000b.

ARACAJU. **Lei Municipal Nº 2979 de 28 de dezembro de 2001**. Estabelece a delimitação do bairro Santa Maria e dá providências correlatas. Aracaju, 2001.

ARACAJU. **Lei Municipal Nº 4024 de 15 de abril de 2011**. Cria no município de Aracaju o bairro 17 De Março, com área desmembrada do imóvel constituído por terreno nacional interior, localizado no bairro Santa Maria, cedida pela união, através da portaria nº 347, de 21 de dezembro de 2004, do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, aprova o partido urbanístico da área, autoriza a transferência de área através da concessão de direito real de uso oneroso ou não, bem como adota medidas para a sua implantação. Aracaju, 2011.

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. Prefeitura Municipal de Aracaju. **Relatório Final do Diagnóstico da Cidade de Aracaju**. Aracaju, 2014.

ARACAJU. Secretaria de Planejamento. **Mapa geoambiental de Aracaju – Carta de avaliação da ocupação em função da recomendação do uso do solo**. Aracaju, 2004a.

ARACAJU. Secretaria de Planejamento. **Mapa geoambiental de Aracaju – Carta solos**. Aracaju, 2004b.

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.

ARAÚJO, H. M.. Elementos Componentes do Sistema Ambiental Físico de Aracaju. In: ARAUJO, HÉLIO Mário. VILAR, J.W.C. WANDERLEY, L. L. Souza, Rosemeri Melo. **O Ambiente Urbano** (Orgs). Visões Geográficas de Aracaju. São Cristóvão: Editora da UFS, 2006. Cap 1. p. 15-44

AZEVEDO NETTO, J. M. de; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 7. ed. rev. e ampl. Sao Paulo: E. Blucher, 1982. 2v. il.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S.. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2005. 266P

BELOTI, C. F.. **Estudo de drenagem urbana da Avenida Professora Minervina Cândida de Oliveira em Uberlândia-MG com uso do programa SWMM**. 111 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/23515>. Acesso em 18 fev. 2020.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M.. Precipitação. In: TUCCI, Carlos E. M.. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001. Cap. 5. p. 177-242. Coleção ABRH de recursos hídricos: v.4.

BLOEM, J.. **Carta corographica para a divisão das comarcas, termos e municípios da provincia de Sergipe DelRey [Cartográfico] : organizada pelas informações exames e de várias cartas as mais exactas que existem até hoje / pelo Tenente Coronel do Imperial Corpo de Engenheiros João Bloem**. Rio de Janeiro, RJ : Lith. do Archivo militar, 1844. Disponível em http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart529823/cart529823.jpg. Acesso em 16 nov. 2019

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.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

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

ESTÁCIO, V.; NOVAES, Í. **Chuvas provocam alagamentos em loteamento do Santa Maria.** Portal Infonet. 23 mai. 2015 Disponível em <https://infonet.com.br/noticias/cidade/chuvas-provocam-alagamentos-em-loteamento-do-santa-maria/>. Acesso em 18 jan. 2020.

FONSECA, L. M.. **Análise das Alterações no Escoamento Superficial na Área de Contribuição da Avenida Dr. Airton Teles em Aracaju-SE.** 2016. 126 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

GAROTTI, L. M.; BARBASSA, A. P.. Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. L.], v. 15, n. 1, p.19-28, mar. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n1/v15n1a03.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

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: 30 dez 1987.

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: 30 dez 1991.

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.

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: 28 set 2011.

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: 22 abr 2015.

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: 06 dez 2019.

GOVERNO DO ESTADO DE SERGIPE. **EMENDA CONSTITUCIONAL Nº 16/99.** Publicado no DOE Nº 23.321. 07 de jul. de 1999. Disponível em <https://al.se.leg.br/wp-content/uploads/2019/09/constitui%C3%A7%C3%A3o-site.pdf>. Acesso em 18 jan 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Área territorial brasileira.** Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/se/aracaju.html>. Acesso em 17 fev. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Sinopse do censo demográfico 2010.** IBGE, 2010. Disponível em <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8>. Acesso em 22 fev. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2019.** Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/se/aracaju.html>. Acesso em 17 fev. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Resolução do Presidente do IBGE Nº 1/2005 - R.PR – 1/2005:** Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro.

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.

INSTITUTO MARCELO DEDA. **Replanteio de vegetação no Morro do Avião vai conter impacto das chuvas no Santa Maria.** 5 jun. 2006. Disponível em <http://www.institutomarcelodeda.com.br/replanteio-de-vegetacao-no-morro-do-aviao-vai-conter-impacto-das-chuvas-no-santa-maria/>. Acesso em 18 jan. 2020.

MARTINS, A.. **Bairro Santa Maria sofre com as chuvas.** Portal Infonet. 24 mar. 2011. Disponível em <https://infonet.com.br/noticias/cidade/bairro-santa-maria-sofre-com-as-chuvas/>. Acesso em 18 jan. 2020.

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

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.

ROCHA, N.. **Planejamento urbano da bacia do córrego Samambaia (Goiânia-GO) utilizando o SWMM - Storm Water Management Model**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente (EEC)) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/2927>. Acesso em 19 fev. 2020.

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

SANTA MARIA é um dos bairros que mais sofre com a temporada de chuvas em Aracaju. Reportagem: Cleverton Macedo. Entrevistado: Luiz Durval, presidente da EMURB. Aracaju: SE TC 1ª Edição, Globo Comunicação e Participações S.A., 2013. 2 min. Disponível em <https://globoplay.globo.com/v/2884829/>. Acesso em 18 jan. 2020.

SANTOS, F. M.; LOLLO, J. A.. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 4, p.663-675, 27 out. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016130053>.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; B. F., MACÊDO, M. N. M.. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande - PB. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 22, n. 5, p.943-952, 6 jul. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016146661>.

SÃO PAULO (Cidade). **Lei Nº 16.402 de 22 de março de 2016**. Disciplina o parcelamento, o uso e a ocupação do solo no Município de São Paulo, de acordo com a Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014 – Plano Diretor Estratégico (PDE). São Paulo, 2016.

SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais, volume II**. Aspectos tecnológicos: fundamentos. São Paulo, 2012a.

SÃO PAULO (Cidade). **Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais, volume III**. Aspectos tecnológicos: diretrizes para projetos. São Paulo, 2012b.

SILVA, E. C. B.. **Avanço da urbanização em Vicente Pires – DF, análise da rede de drenagem associada a medidas compensatórias utilizando o modelo SWMM e ABC**. 82 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental)—Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <http://bdm.unb.br/handle/10483/16938>. Acesso em 19 fev. 2020.

SILVA, K. A.. **Analysis of the efficiency of flood control methods for the attenuation of peak flow using the SWMM - Storm water management model**. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiania, 2007. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/645>. Acesso em 18 fev. 2020.

SILVA, R.; MIRANDA, T. As bacias hidrográficas como situação de risco geomorfológico. 2015. Disponível em: <https://www.emaze.com/@AOQTQTWQ/Trabalho-de-Biologia>. Acesso em 9 mar 2020.

SOUZA, V. C. B. **Gestão da drenagem urbana no Brasil: desafios para sustentabilidade**. GESTA – Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, Porto Alegre, v. 1, n.1, p. 52-56, 2013.

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/aguanomeio%20urbano.pdf. Acesso em 20 jan. 2019.

TUCCI, C. E. M. Aspectos institucionais do controle das inundações urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. M. (orgs.). **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2001a. Cap. 5.1. p. 405-420. v.2.

TUCCI, C. E. M.. Elementos para o controle da drenagem urbana. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; MARQUES, David Manuel Lélinho da Motta (org.). **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2001b. Cap. 5.2. p. 421-438. v.2.

TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. In: TUCCI, Carlos e M. (org.) **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001c. Cap. 11. p. 391-442. Coleção ABRH de recursos hídricos: v.4.

TUCCI, C. E. M.. Gerenciamento da drenagem urbana. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; MARQUES, David Manuel Lélinho da Motta (org.). **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2001d. Cap. 5.3. p. 439-478. v.2.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades – Global Water Partnership – World Bank .Unesco, 2005a.

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. Cap. 1. p. 15-36.

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

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. 1.ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. Disponível em: <https://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23335/inbr02803.pdf>. Acesso em 21 fev. 2020

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos, SP: INPE: Ministério da Ciência e Tecnologia (INPE-15318-RPQ/818). 72p., 2008.

VELDHUIS, J. A. E. T.. **Quantitative risk analysis of urban flooding in lowland areas**. 256 f. Tese (Doutorado em Civil Engineering and Geosciences) – Water Management, Technische Universiteit Delft, Delft, 2010. Disponível em: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:ef311869-db7b-408c-95ec-69d8fb7b68d2>. Acesso em: 15 fev. 2020.

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

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Mcgraw Hill, 1975.

ZAHED FILHO, K.; MARCELLINI, S. S. Precipitações Máximas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS M. T. (Orgs.) **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH / Editora da UFRGS, 1995. Cap. 2. p. 37-76.

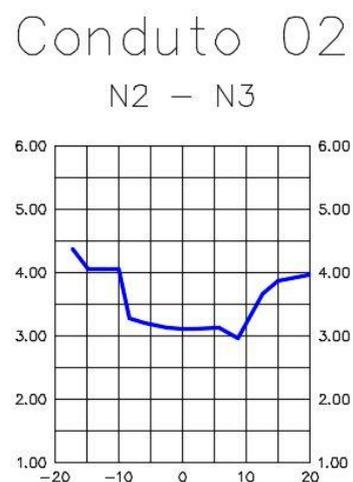
ANEXOS

ANEXO A – SEÇÕES DOS CONDUTOS PRÉ-DRAGAGEM

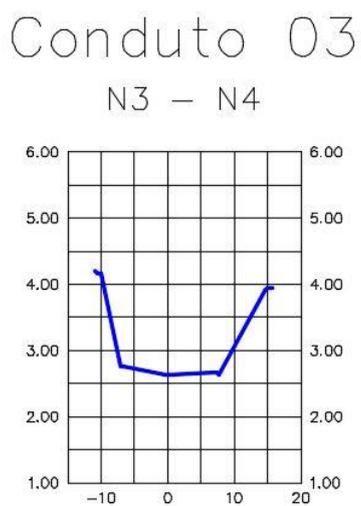
a) Seção transversal do conduto 01



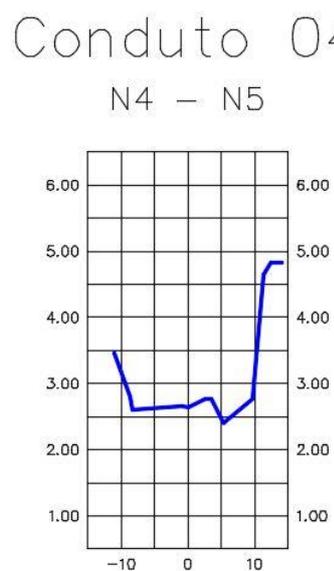
b) Seção transversal do conduto 02



c) Seção transversal do conduto 03



d) Seção transversal do conduto 04



a) Seção transversal do conduto 05

Conduto 05

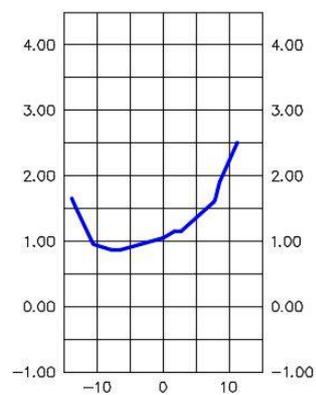
N5 - N6



b) Seção transversal do conduto 06

Conduto 06

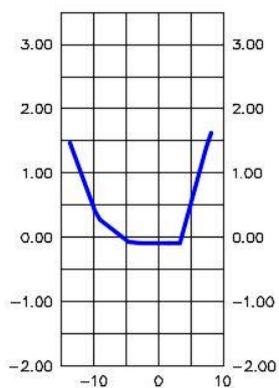
N6 - N7



c) Seção transversal do conduto 07

Conduto 07

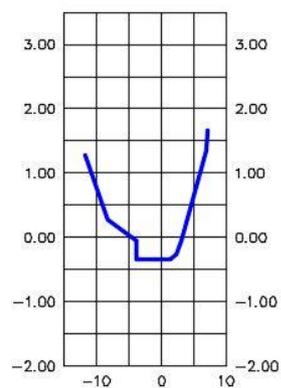
N7 - N8



d) Seção transversal do conduto 08

Conduto 08

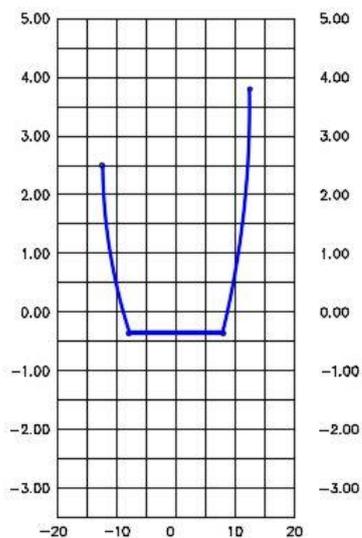
N8 - E1



ANEXO B – SEÇÕES DOS CONDUTOS PÓS-DRAGAGEM

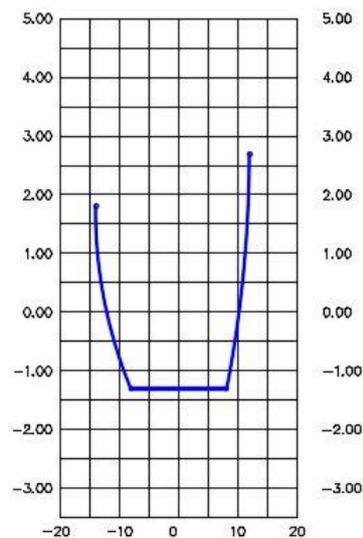
- a) Seção transversal dos condutos 1 e 2

Seção 4
Condutos 1 e 2



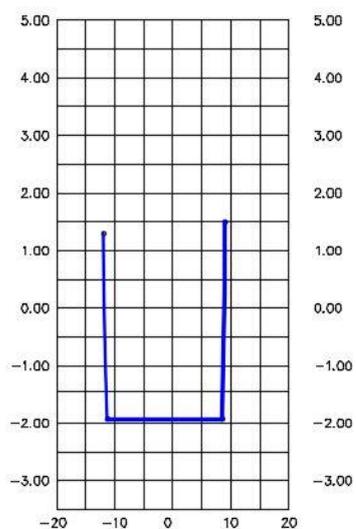
- b) Seção transversal dos condutos 3 e 4

Seção 5
Condutos 3 e 4



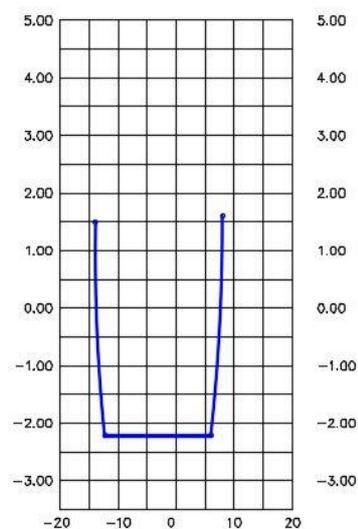
- c) Seção transversal dos condutos 5 e 6

Seção 6
Condutos 5 e 6



- d) Seção transversal do conduto 7

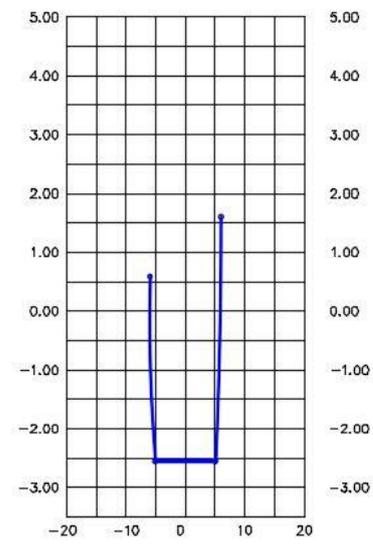
Seção 7
Conduto 7



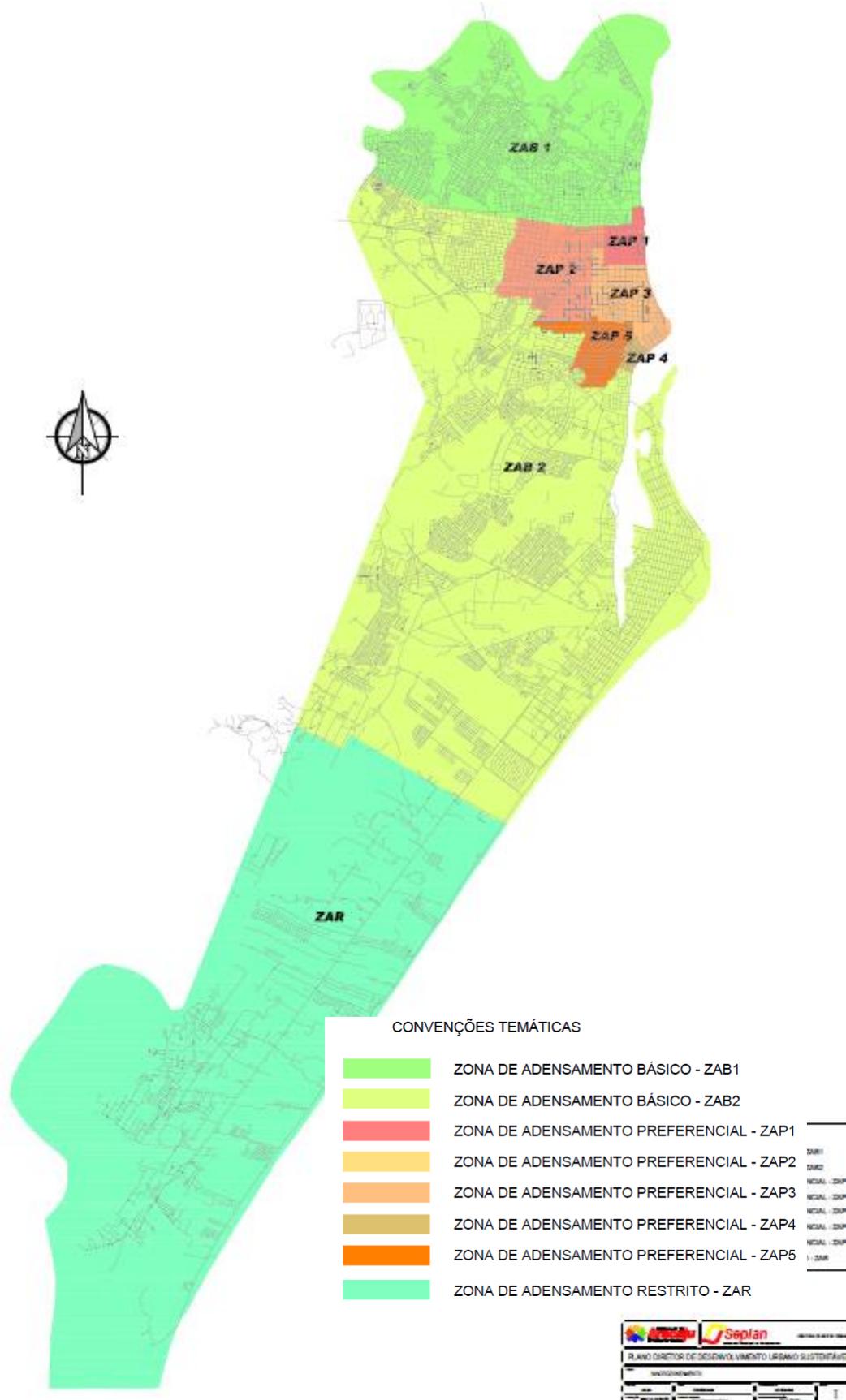
a) Seção transversal do conduto 8

Seção 8

Conduto 8

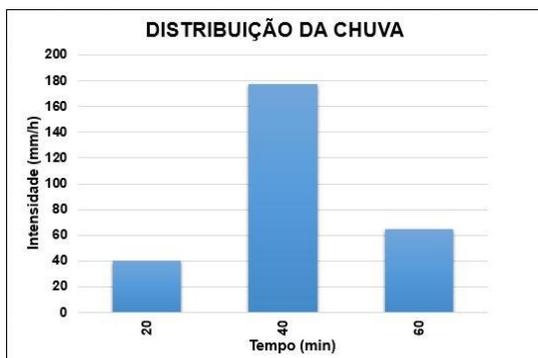


ANEXO C – MACROZONEAMENTO DE ARACAJU



APÊNDICES

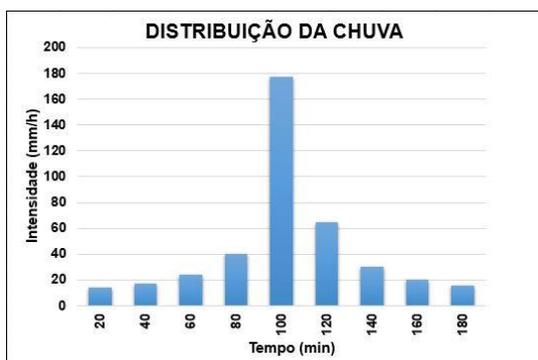
a) Chuva de 60 minutos de duração



b) Chuva de 120 minutos de duração



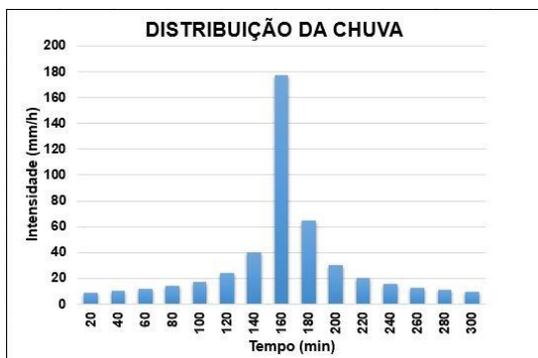
c) Chuva de 180 minutos de duração



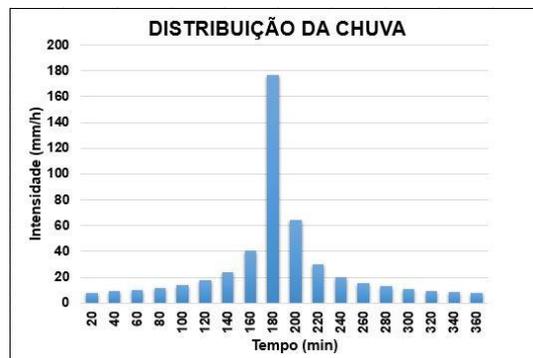
d) Chuva de 240 minutos de duração



e) Chuva de 300 minutos de duração



f) Chuva de 360 minutos de duração



g) Chuva de 420 minutos de duração



h) Chuva de 480 minutos de duração



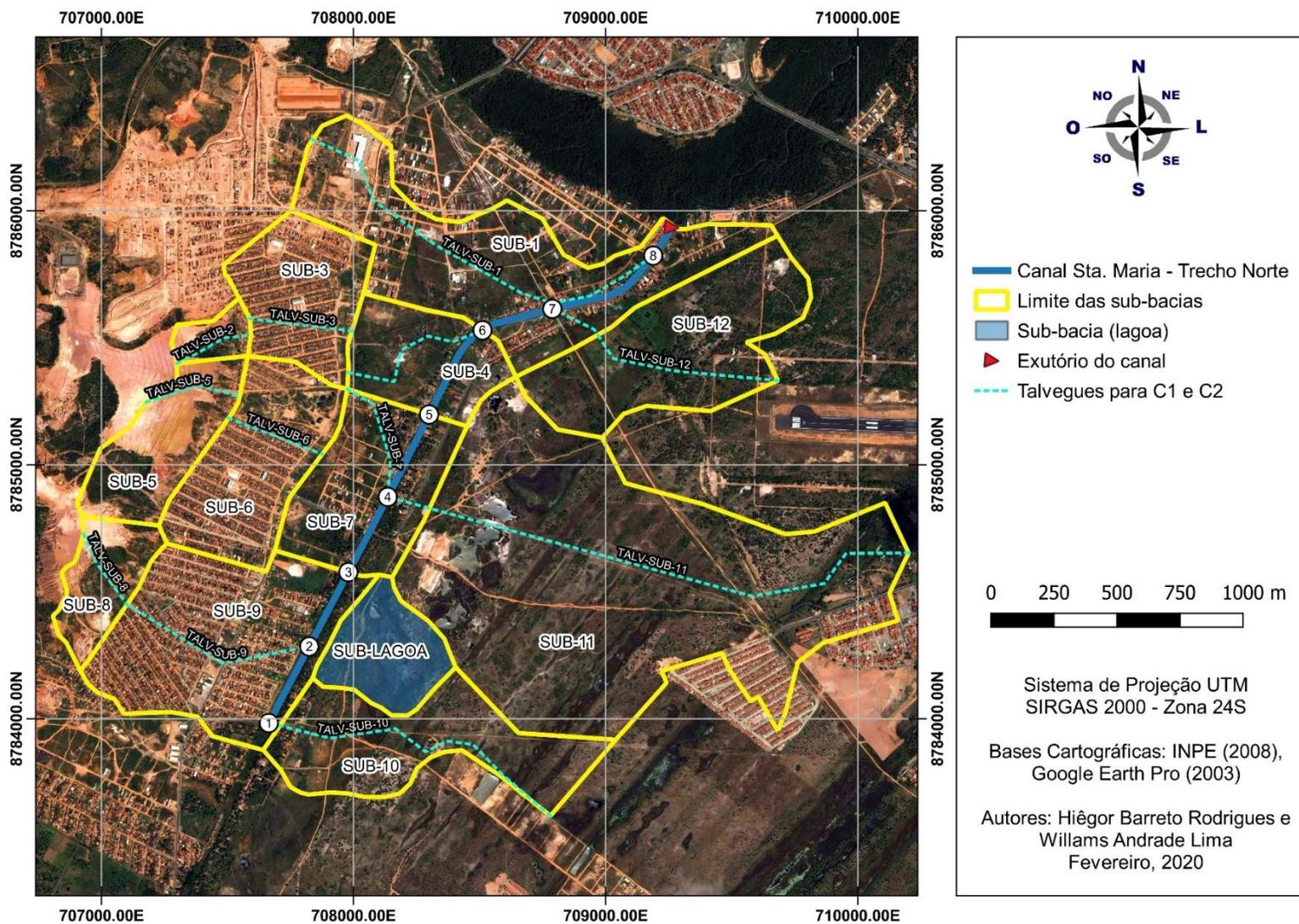
i) Chuva de 540 minutos de duração



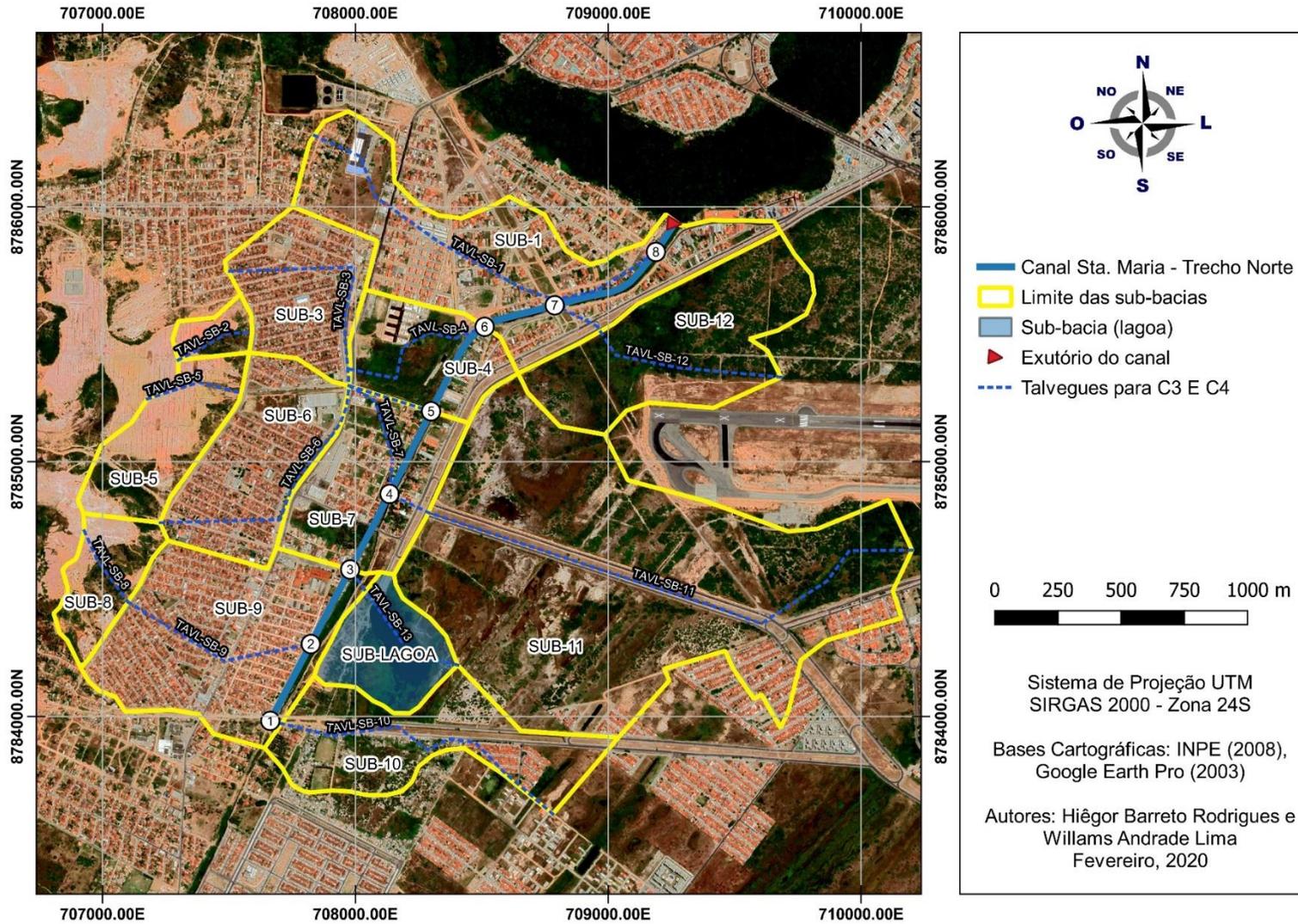
j) Chuva de 600 minutos de duração



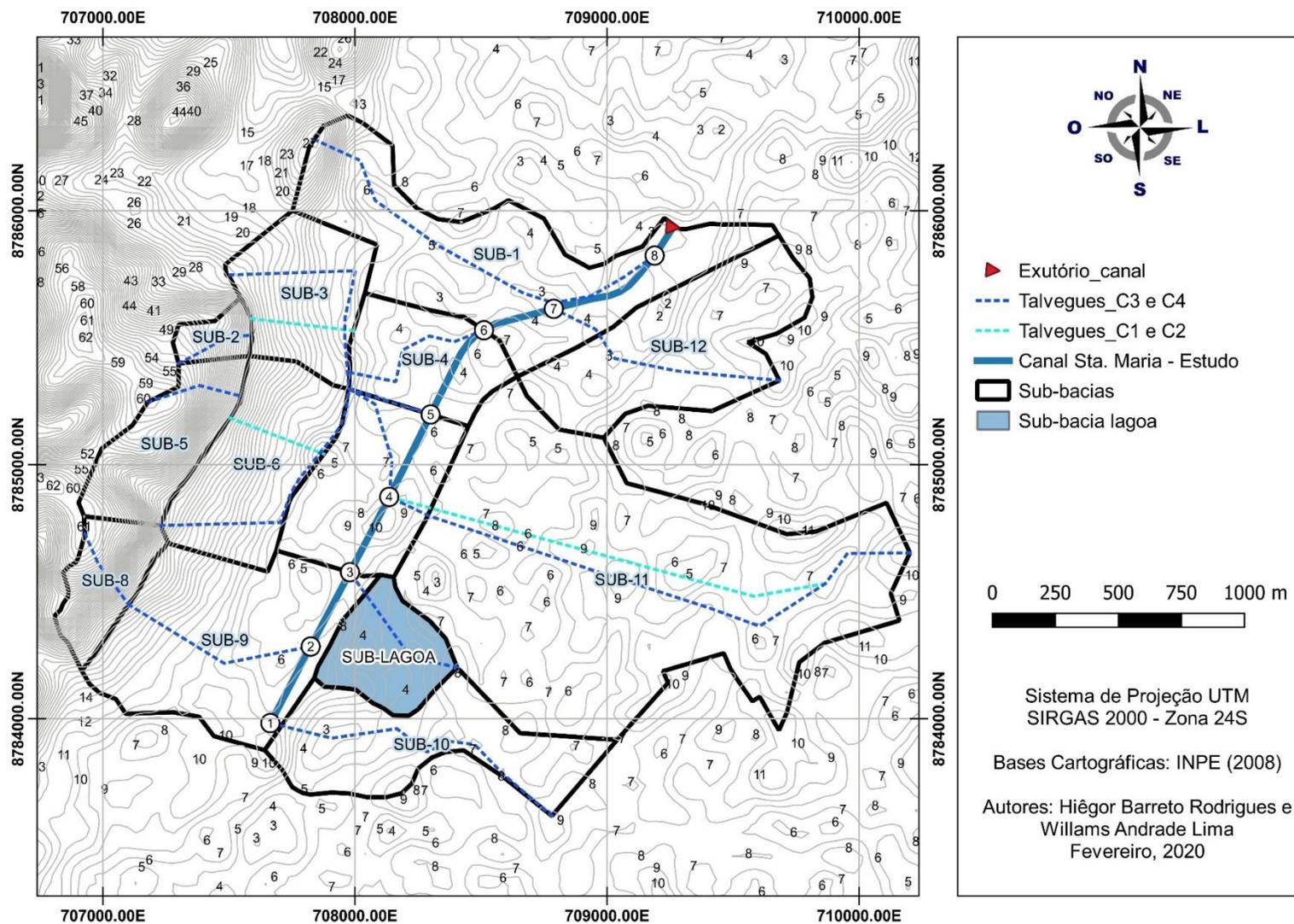
APÊNDICE B – TALVEGUES CENÁRIOS 1 E 2



APÊNDICE C – TALVEGUES CENÁRIOS 3 E 4

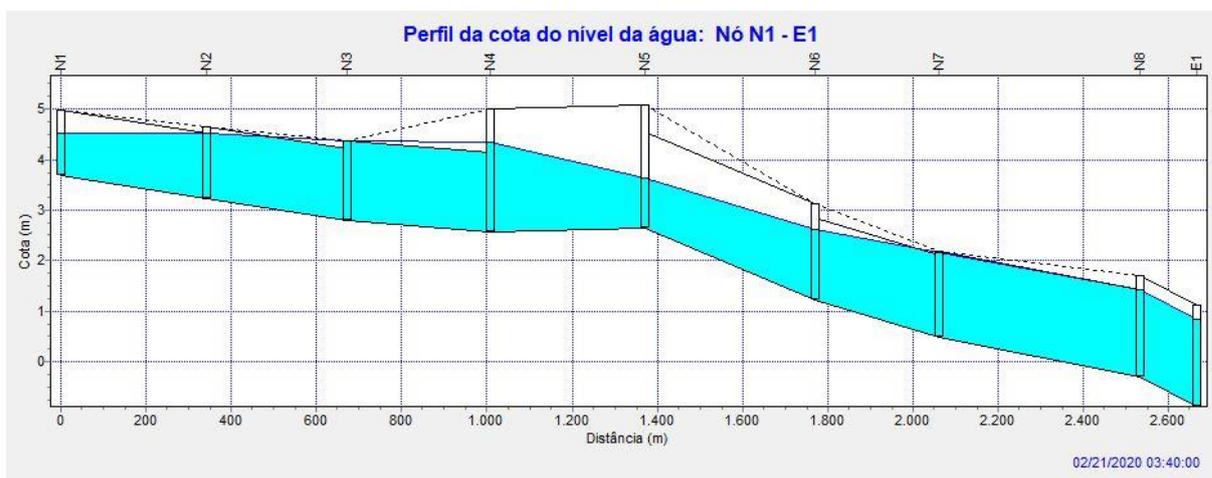


APÊNDICE D – CURVAS DE NÍVEL E TALVEGUES

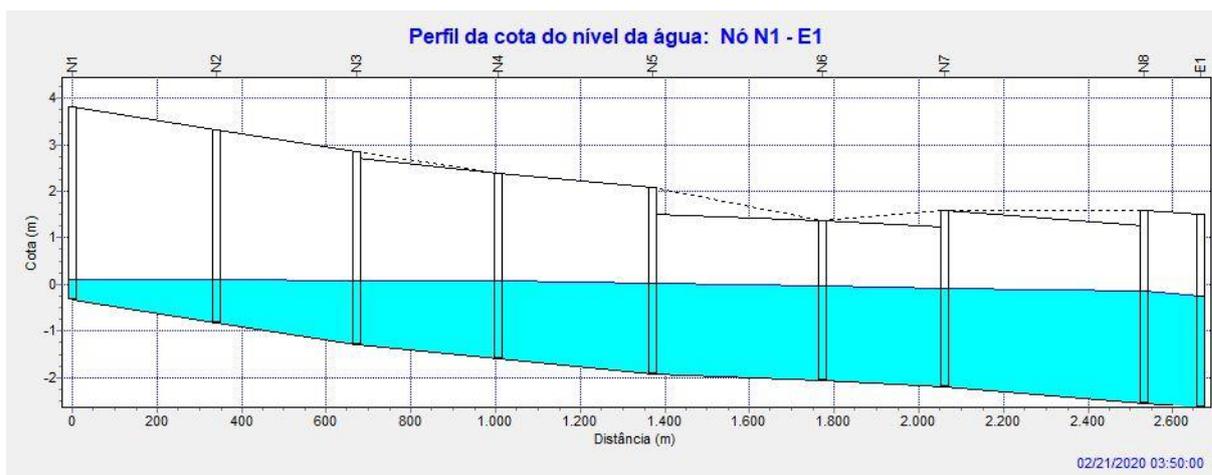


APÊNDICE E – INSTANTES DE CHEIA NOS CENÁRIOS

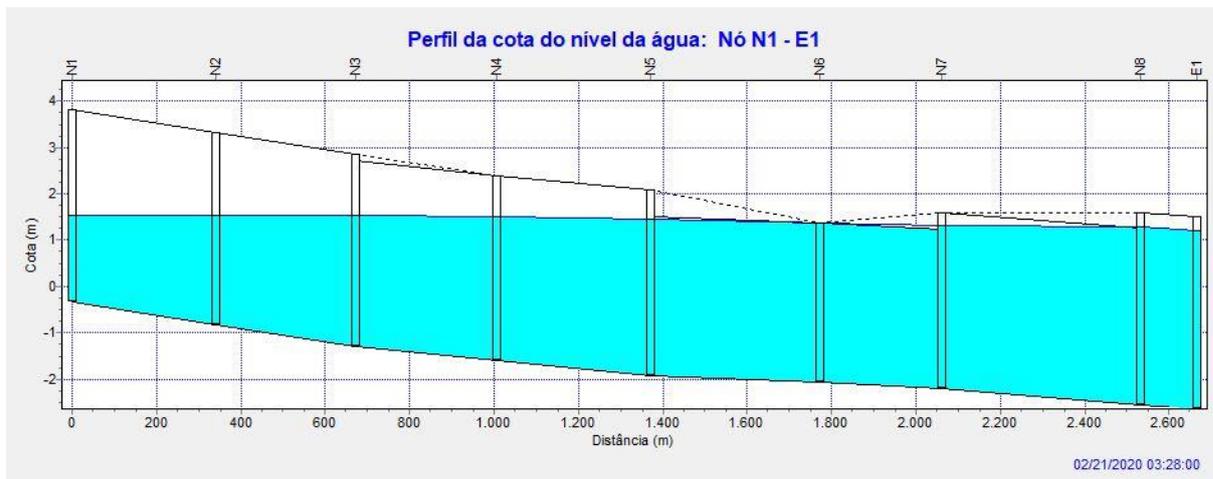
a) Instante de cheia no cenário 1



b) Instante de cheia no cenário 2



c) Instante de cheia no cenário 3



d) Instante de cheia no cenário 4

