



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDREW SAULO DE LIMA CORDEIRO

**UTILIZAÇÃO DO SWMM-STORM WATER MANAGEMENT
MODEL COMO FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO DE
DRENAGEM URBANA**

Caruaru

2019

ANDREW SAULO DE LIMA CORDEIRO

UTILIZAÇÃO DO SWMM-STORM WATER MANAGEMENT MODEL COMO FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO DE DRENAGEM URBANA

Trabalho de conclusão de curso realizado
como requisito obrigatório na obtenção do
título de bacharel em engenharia civil, na
Universidade Federal de Pernambuco.

Área de concentração: Recursos hídricos

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

C794u Cordeiro, Andrew Saulo de Lima.
Utilização do swmm-storm water management model como ferramenta de planejamento de drenagem urbana. / Andrew Saulo de Lima Cordeiro. – 2019.
75 f. : 30 cm.

Orientador: José Almir Cirilo.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Drenagem urbana. 2. Geoprocessamento. 3. Reservatório. 4. Infiltração. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-

010)

ANDREW SAULO DE LIMA CORDEIRO

UTILIZAÇÃO DO SWMM-STORM WATER MANAGEMENT MODEL COMO FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO DE DRENAGEM URBANA

Trabalho de conclusão de curso realizado
como requisito obrigatório na obtenção do
título de bacharel em engenharia civil, na
Universidade Federal de Pernambuco.

Área de concentração: Recursos Hídricos

A banca composta pelos professores abaixo, considera O ALUNO ANDREW
SAULO DE LIMA CORDEIRO APROVADO COM NOTA 8,87.

Caruaru, 14 de Janeiro de 2019.

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Almir Cirilo _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Eng. Msc. Fellipe Henrique Borba Alves _____
Companhia Pernambucana de Saneamento (Avaliador)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

Dedicatória

Dedico ao meu pai Ailson Cordeiro, que me ensinou a ser honesto e íntegro e por estar sempre ao meu lado. À minha mãe Adriana Paula por todo amor, carinho e cuidado. À minha irmã Ana Hortência por todo o companheirismo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda sua graça imerecida em minha vida.

À minha família, por todo carinho e amor que depositam em mim.

Ao meu pai Ailson Cordeiro, pela sua cumplicidade, por me ensinar através de seus ensinamentos e de seu exemplo de vida, como ser um homem íntegro e honesto.

À minha mãe Adriana Paula, por todo amor, carinho e afeto que aumentam dia após a dia.

À minha irmã Ana Hortência, por todo o companheirismo.

A todos os meus amigos de Custódia-PE e Caruaru-PE que torcem e contribuem para o meu sucesso.

A todos os professores da Escola Nossa Senhora Auxiliadora e da Escola de Referência José Pereira Burgos, por todos os ensinamentos e por toda contribuição na minha formação.

A meus companheiros de curso que perseveraram junto a mim na busca da conclusão deste curso, compartilhando adversidades e sucessos.

Ao professor Dr. José Almir Cirilo, pela paciência, pela ajuda e aconselhamento ao longo do curso e no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e demais colaboradores da UFPE - Centro Acadêmico do Agreste, por toda contribuição e pela dedicação.

RESUMO

Com o crescimento da população intensificou-se a urbanização e a impermeabilização do solo, expandindo o escoamento superficial e a ocorrência de inundações. Diante desta problemática surgem diversas técnicas, contribuindo para o restabelecimento do ciclo hidrológico. Este trabalho teve como objetivo principal, dimensionar a rede de drenagem de uma sub-bacia localizada no município de Custódia-PE, através do SWMM, concomitantemente com imagens aéreas e modelo numérico do terreno de alta resolução associados com ferramentas de geoprocessamento. No ambiente QGIS, foi delimitada a área de contribuição para o ponto crítico de alagamento na Rua Mariano José de Rezende, Custódia-PE, o levantamento da topologia e do uso e ocupação do solo da região. Com a sub-bacia da área de estudo delimitada, realizou-se o traçado e o dimensionamento da rede de drenagem pluvial pelo Método Racional. A partir do dimensionamento dos condutos utilizando o Método Racional e das informações obtidas no QGIS foi possível gerar os dados para a simulação da rede no SWMM. Inicialmente o sistema de drenagem foi modelado sem um uso de dispositivo de controle, em seguida a rede de drenagem foi simulada considerando o uso de trincheiras de infiltração na proporção de 2% em relação a área total de cada subárea, bem como com a construção de um reservatório com capacidade de reservação de 3200 m³. Para um evento chuvoso, com 61.46 mm de precipitação em 1 hora, o uso de trincheiras de infiltração e a construção do reservatório obtiveram uma redução do pico máximo de razão de, respectivamente, 3,25 % e 45,41 %. O SWMM mostra-se como ferramenta importante de planejamento de drenagem urbana.

Palavras-chave: Drenagem Urbana. Geoprocessamento. Reservatório. SWMM. Trincheiras de infiltração

ABSTRACT

With the population growth, urbanization and soil sealing intensified, increasing the surface runoff and the occurrence of floods. In the face of this problem arise several techniques, contributing to the reestablishment of the hydrological cycle. The main objective of this work was to size the drainage network of a sub-basin located in the municipality of Custódia-PE, through the SWMM, concomitantly with aerial images and numerical model of the high resolution terrain associated with geoprocessing tools. In the QGIS environment, the area of contribution to the critical point of flooding in Mariano José de Rezende Street, Custódia-PE, was delimited the survey of the topology and use and occupation of the soil of the region. With the sub-basin of the study area delimited, the drainage and the dimensioning of the drainage network was carried out by the Rational Method. From the sizing of the conduits using the Rational Method and the information obtained in the QGIS it was possible to generate the data for the simulation of the network in SWMM. Initially the drainage system was modeled without a control device, then the drainage network was simulated considering the use of infiltration trenches in the proportion of 2% in relation to the total area of each subarea, as well as the construction of a reservoir with reservation capacity of 3200 m³. For a rainy event, with 61.46 mm of precipitation in 1 hour, the use of infiltration trenches and the construction of the reservoir obtained a reduction of the maximum ratio peak of respectively 3.25% and 45.41%. The SWMM is an important tool for urban drainage planning.

Key-words: Urban Drainage. Geoprocessing. Reservoir. SWMM. Infiltration trenches

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localização de Custódia em Pernambuco	24
Figura 2 - Inundação na área de estudo ¹	25
Figura 3 - Inundação na área de estudo ²	26
Figura 4 - Área de estudo	27
Figura 5 - Modelo Digital de Elevação	28
Figura 6 - Modelo digital de elevação em 3D.....	29
Figura 7 - Segmentos de fluxo	30
Figura 8 - Direção de drenagem	31
Figura 9 - Divisão das micro-bacias.....	32
Figura 10 - Vetorização das micro-bacias.....	33
Figura 11 - Exutório da sub-bacia.....	34
Figura 12 - Exutório (imagem do local).....	35
Figura 13 - Sub-bacia em estudo.....	36
Figura 14 - Área de contribuição.....	37
Figura 15 - Delimitação das quadras	38
Figura 16 - Pontos utilizados no SWMM.....	39
Figura 17 - Pontos utilizados no Método Racional.....	41
Figura 18 - Vias utilizadas no Método Racional	43
Figura 19 - Vias utilizadas no SWMM.....	45
Figura 20 - Classificação do uso e ocupação do solo.....	47
Figura 21 - Valores de C propostos pelo Colorado Highway Department.....	48
Figura 22 - Detalhe típico de uma trincheira de infiltração.....	59
Figura 23 - Traçado da rede de drenagem utilizando o Método Racional	61
Figura 24 - Trechos críticos	62
Figura 25 - Mensagem de erro da simulação sem dispositivos de controle....	64
Figura 26 - Vazão no exutório sem o uso de dispositivos de controle	65
Figura 27 - Traçado da rede de drenagem utilizando o SWMM	66
Figura 28 - Mensagem de erro da simulação com trincheiras de infiltração ...	67
Figura 29 - Vazão com uso de trincheiras de infiltração	67
Figura 30 - Local de implementação do reservatório	68
Figura 31 - Mensagem de erro da simulação com reservatório.....	69

Figura 32 - Vazão com uso de reservatório	69
---	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Área das quadras	38
Tabela 2 - Cotas dos pontos utilizados no SWMM	40
Tabela 3 - Cotas dos pontos utilizados no Método Racional	42
Tabela 4 - Comprimento das vias utilizadas no Método Racional	44
Tabela 5 - Comprimento das vias utilizadas no SWMM.....	46
Tabela 6 - Valores de C para as quadras	49
Tabela 7 - Valores do coeficiente de retardamento	51
Tabela 8 - Valores típicos de armazenamento em depressões	54
Tabela 9 - Coeficiente n de Manning – escoamento à superfície livre.	55
Tabela 10 - Valores do coeficiente de Manning para as áreas permeáveis....	56
Tabela 11 - Valores de CN para bacias com ocupação urbana.....	57
Tabela 12 - Hietograma de trabalho	63
Tabela 13 - Dimensionamento utilizando o Método Racional	74
Tabela 14 - Dimensionamento das galerias subterrâneas.....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	15
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Impactos causados pelo processo de urbanização	17
2.2	Drenagem urbana	17
2.2.1	Elementos da microdrenagem.....	18
2.3	Sistema de Informações Geográficas (SIG).....	19
2.4	Uso do SWMM em redes de drenagem	19
2.5	Programa Pernambuco Tridimensional	20
2.6	Classificação de imagens	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Área de estudo	24
3.1.1	<i>Geração da sub-bacia com saída no exutório de estudo.....</i>	27
3.1.2	<i>Determinação das propriedades geométricas dos elementos</i>	37
3.1.3	<i>Classificação do uso do solo.....</i>	46
3.2	Avaliação da drenagem utilizando o Método Racional.....	49
3.2.1	<i>Coeficiente de escoamento superficial</i>	50
3.2.2	<i>Intensidade da chuva</i>	50
3.2.3	<i>Tempo de concentração</i>	50
3.2.4	<i>Escoamento superficial</i>	52
3.2.5	<i>Instalação das bocas de lobo.....</i>	52
3.3	Parâmetros da modelagem no SWMM	53

3.3.1	<i>Parâmetros físicos das Subáreas</i>	53
3.3.2	<i>Nós e trechos</i>	56
3.3.3	<i>Infiltração</i>	57
3.4	<i>Técnicas de atenuação de vazão</i>	58
3.4.1	<i>Trincheiras de infiltração</i>	58
3.4.2	<i>Construção de reservatórios</i>	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	<i>Avaliação da drenagem utilizando o Método Racional</i>	61
4.1.1	<i>Determinação dos trechos críticos</i>	62
4.2	<i>Dimensionamento utilizando o SWMM</i>	63
4.2.1	<i>Séries temporais</i>	63
4.2.2	<i>Simulação sem o uso de dispositivos de atenuação de vazão</i>	64
4.2.3	<i>Simulação com o uso de trincheiras de infiltração</i>	66
4.2.4	<i>Simulação com o uso de reservatório</i>	68
5	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A – Estudo utilizando o Método Racional	74

1 INTRODUÇÃO

No Brasil o processo de urbanização acelerada aconteceu após a década de 1960, devido às mudanças das relações de trabalho no campo e na cidade, que tiveram como resultado o êxodo rural e o crescimento das cidades brasileiras. Todavia, o aumento da população urbana e a ampliação das cidades não foram acompanhados do crescimento adequado de toda a infraestrutura urbana, de modo a proporcionar aos habitantes um sistema de saneamento adequado.

Segundo Fontes (2003) o processo de urbanização traz profundas alterações no uso do solo, que consequentemente provocam marcas permanentes nas respostas hidrológicas das áreas urbanizadas, exibindo os efeitos mais notáveis no aumento do escoamento superficial e na diminuição da infiltração, o que tem como consequência direta a ocorrência de inundações urbanas.

De acordo com Tucci (2008), o escoamento pluvial pode produzir inundações e impactos nas áreas urbanas em razão de dois processos, que ocorrem isoladamente ou combinados:

Inundações em razão da urbanização. Processos que ocorrem na drenagem urbana por causa do efeito da impermeabilização do solo, canalização do escoamento ou obstruções.

Inundações de áreas ribeirinhas. Processos naturais que ocorrem no leito maior dos rios por causa da variabilidade temporal e espacial da precipitação e do escoamento na bacia hidrográfica.

O primeiro processo tratado, inundações em razão da urbanização, é o de maior relevância para esse trabalho e acontece devido à excessiva impermeabilização do solo através de ruas, de pátios calçados, de telhados, entre outros, pois a água que em um cenário anterior à urbanização se infiltrava no solo, recarregava o lençol freático ou percolava até encontrar um corpo hídrico receptor, não mais o faz. Ainda, aquele escoamento superficial lento, que ficava retido pelas plantas, devido à urbanização, passa a escoar através de canais artificiais, condutos, sarjetas, entre outros.

Este processo possui problemas ainda maiores atrelados à forma desorganizada como a infraestrutura urbana é implantada, podendo-se citar: (a) deposição e obstrução de rios, canais e condutos por lixo e sedimentos; (b) pontes e

taludes de estradas que obstruem o escoamento; (c) redução de seção do escoamento por aterros de pontes e para construções em geral; (d) projetos e obras de drenagem inadequadas.

Todos esses problemas estão vinculados à falta de planejamento das autoridades gestoras, com diversas falhas nos planos diretores municipais, bem como à falta de profissionais qualificados no mercado de trabalho para lidar com essa situação.

Em vista disso, é fundamental estudar técnicas de drenagem urbana que minimizem o impacto ambiental e que sejam eficientes quanto ao controle do escoamento superficial. No escopo dessa ideia surgiram técnicas conhecidas como que visam o controle do escoamento superficial junto à fonte geradora de escoamento, diminuindo volumes e vazões a valores próximos daqueles antes da urbanização do local, ou, se necessário, a valores próximos a zero.

Neste contexto, em 1971 foi desenvolvido um software de grande relevância, o *Storm Water Management Model – SWMM* (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - SWMM), da EPA (Agência para Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos) tendo sofrido, desde então, diversas atualizações. É amplamente utilizado em várias partes do mundo para o planejamento, análises e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais em áreas urbanas, sistemas coletores de águas residuárias (sejam eles separados, unitários ou mistos), com muitas aplicações, também, em áreas não urbanas.

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo de caso com o dimensionamento de uma rede de drenagem de uma zona urbana, utilizando o SWMM, concomitantemente com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento e planilhas de cálculo.

Para verificação da aplicabilidade destas técnicas, foi realizado o dimensionamento e simulação de um sistema de drenagem pluvial para um loteamento na cidade de Custódia-PE.

1.1 Justificativa

Para desenvolvimento de um projeto de drenagem muitos fatores precisam ser analisados na busca da melhor solução. Assim este trabalho é justificado pela necessidade de adotar uma simulação através do software SWMM como uma alternativa no dimensionamento de uma rede de drenagem para que o projetista, a partir da construção de modelos, tenha condições de avaliar quais são as soluções mais apropriadas para o projeto, assegurando ao empreendedor e construtor um dimensionamento econômico, seguro e eficaz.

É importante ressaltar que para aprimorar os resultados encontrados pelo SWMM, este trabalho utiliza também outros softwares para determinação mais precisa de alguns parâmetros de entrada.

No que tange à determinação de valores geométricos e hidrológicos, o QGIS 2.18 apresenta-se como ferramenta fundamental na obtenção destes dados com eficiência e precisão.

Em relação aos parâmetros de uso e ocupação de solo, a classificação de imagens aéreas ou de satélite foi feita por meio de ferramentas de geoprocessamento. Surge como ferramenta que gera resultados tão mais precisos quanto seja a resolução dessas imagens com um grau de precisão elevado.

O local escolhido como área de estudo apresenta inundações frequentes, o que enfatiza a necessidade da busca de uma solução.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

Avaliar processo de dimensionamento de rede de drenagem da sub-bacia urbana utilizando o SWMM, concomitantemente com imagens aéreas e modelo numérico do terreno de alta resolução associados com ferramentas de geoprocessamento.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Comparar os resultados obtidos com o SWMM com a técnica tradicional do Método Racional;
- Avaliar a potencialidade de uso da base de dados espaciais de alta resolução para projeto de drenagem;
- Desenvolver concepção de drenagem para redução/eliminação dos alagamentos na área de estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Impactos causados pelo processo de urbanização

As enchentes urbanas apresentam-se como grandes causadoras de danos para a sociedade, decorrente da ausência de planejamento urbano em relação ao uso do solo e da água.

Segundo Braga (1994), a maioria dos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, experimentou nas últimas décadas uma expansão urbana com precária infraestrutura de drenagem, advindo os problemas de inundação principalmente da rápida expansão da população urbana, do baixo nível de conscientização do problema, da inexistência de planos de longo prazo, da utilização precária de medidas não estruturais e da manutenção inadequada dos sistemas de controle de cheias.

As obras e o controle público da drenagem têm sido realizados por uma visão local e setorializada dos problemas, gerando mais impactos do que os pré-existentes e desperdiçando os poucos recursos existentes nas cidades. A defasagem técnica dos profissionais e a falta de regulamentação da transferência de impactos dentro das cidades, o limitado conhecimento dos decisores sobre o assunto são as principais causas dessas perdas.

Tucci e Genz (1995), evidenciam que o controle das enchentes urbanas deve ser compreendido como uma atividade na qual a sociedade deve atuar de forma contínua objetivando à redução do custo social e econômico dos impactos das inundações. Deste modo, tornam-se importantes os métodos de controle de enchentes urbanas que se utilizam de uma visão onde as causas são combatidas nas suas origens e não somente nas suas consequências (à jusante da fonte geradora de escoamento).

2.2 Drenagem urbana

Drenagem é o termo empregado na designação das instalações destinadas a escoar o excesso de água, seja em rodovias, na zona rural ou na malha urbana, sendo que a drenagem desta última é o objetivo do nosso estudo.

Conforme Neto (2010) o escoamento superficial da água pode ser topograficamente bem definido ou não. No entanto, após a urbanização, o caminho percorrido pela água passa a ser determinado pelo traçado das ruas, com o fluxo de água direcionado através de sarjetas até os bueiros. Essa vazão, somada à da rede pública, escoam pelas tubulações que alimentam os condutos secundários, a partir dos quais se atinge o fundo do vale, onde o caminho da água é topograficamente bem definido. Assim, Neto (2010) define que o escoamento no fundo do vale é o que determina o sistema de macrodrenagem, enquanto que o sistema que capta a água e a conduz até o sistema de macrodrenagem é denominado sistema de microdrenagem, que é o objetivo de estudo deste trabalho.

2.2.1 Elementos da microdrenagem

Segundo Neto (2010), os elementos principais da microdrenagem são os meios-fios, as sarjetas, as bocas-de lobo, os poços de visita, as galerias, os condutos forçados, as estações de bombeamento e os sarjetões. Cada um desses dispositivos hidráulicos é conceituado a seguir:

- Bocas-de-lobo: são dispositivos de captação das águas das sarjetas.
- Condutos forçados e estações de bombeamento. Quando não há condições de escoamento por gravidade para a retirada da água de um canal de drenagem para um outro, recorre-se aos condutos forçados e às estações de bombeamento.
- Galerias: são as canalizações públicas destinadas a escoar as águas pluviais oriundas das ligações privadas e das bocas-de-lobo.
- Meio-fio: são constituídos de blocos de concreto ou de pedra, situados entre a via pública e o passeio, com sua face superior nivelada com o passeio, formando uma faixa paralela ao eixo da via pública.
- Poços de visita: são dispositivos colocados em pontos convenientes do sistema, para permitir sua manutenção.
- Sarjetas: são as faixas formadas pelo limite da via pública com os meios-fios, formando uma calha que coleta as águas pluviais oriundas da rua.

- Sarjetões: são formados pela própria pavimentação nos cruzamentos das vias públicas, formando calhas que servem para orientar o fluxo das águas que escoam pelas sarjetas.

2.3 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

Nas últimas décadas inúmeros projetos voltados ao desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) iniciaram-se devido ao avanço tecnológico e computacional.

Como exemplo, é possível citar alguns softwares especializados, independentes ou integrados, como OSSIM, Orfeo ToolBox, Opticks e GRASS GIS (Rocchini et al., 2017). Dentre tantas alternativas livres disponíveis, destaca-se o software QGIS (QGIS Development Team, 2017) em razão da sua crescente utilização em todo o mundo e vasto material de apoio aos utilizadores.

O QGIS é um software livre para Sistema de Informação Geográfica, incubado pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) e impulsionado por um grupo ativo de desenvolvedores voluntários que regularmente lançam atualizações e correções para os problemas verificados neste aplicativo.

O software livre apresenta-se como uma afirmação de liberdade, no sentido de independência de expressão (FSF, 2015). Permitem-se adaptações ou modificações em seu código de forma espontânea, sem que haja a necessidade de solicitar permissão ao seu proprietário (Milaré et al., 2016).

Devido à grande liberdade proposta pelo QGIS, ele vem ganhando espaço em diversos projetos do ramo da engenharia. Neste trabalho, especificamente, através dele é possível obter informações geométricas e hidrológicas de grande importância no desenvolvimento do projeto.

2.4 Uso do SWMM em redes de drenagem

O *Storm Water Management Model* – SWMM (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - SWMM), da EPA (Environmental Protection Agency), é um modelo dinâmico chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial,

especialmente em áreas urbanas; pode ser utilizado para a simulação de um único evento chuvoso, bem como para uma simulação contínua de longo prazo.

O componente relativo ao escoamento superficial opera com um conjunto de sub-bacias hidrográficas que recebem precipitações e geram escoamentos e cargas poluidoras.

É importante destacar que seu módulo de transporte hidráulico simula o percurso destas águas através de um sistema composto por tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas e elementos de regulação.

O SWMM acompanha a evolução da quantidade e da qualidade do escoamento dentro de cada sub-bacia, assim como a vazão, a altura de escoamento e a qualidade da água em cada tubulação e canal, durante um período de simulação composto por múltiplos intervalos de tempo.

O SWMM foi desenvolvido em 1971, tendo sofrido, desde então, diversas atualizações. É amplamente utilizado em várias partes do mundo para o planejamento, análises e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais em áreas urbanas, sistemas coletores de águas residuárias (sejam eles separados, unitários ou mistos), com muitas aplicações, também, em áreas não urbanas.

2.5 Programa Pernambuco Tridimensional

Após as enchentes que atingiram drasticamente municípios da Mata Sul do Estado de Pernambuco, entre 2010 e 2011, foram realizados serviços de mapeamento das áreas afetadas e da calha dos principais rios das bacias hidrográficas atingidas. Esse mapeamento, realizado por meio da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE), realizou uma varredura a laser do terreno que permitiu obter com rapidez e qualidade as informações altimétricas para elaboração dos projetos das barragens de controle de cheias, além de desenvolver sistema de prevenção e alerta de inundações para a bacia do rio Una.

Atualmente, cabe à Secretaria de Desenvolvimento Econômico (SDEC) gerenciar o Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE), financiado pelo Banco Mundial. O PSHPE tem como objetivo ampliar o acesso da população à água potável e ao esgotamento sanitário. Com o êxito obtido, foi tomada

a decisão de inserir nas metas do PSHPE o mapeamento para todo o território do Estado, dando assim origem ao Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D).

Os serviços compreendem o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de todo o território pernambucano. Esse perfilamento foi feito usando a técnica *LIDAR – Light Detection and Ranging*, ou rastreamento a laser do terreno. Foram gerados, em levantamento na escala 1:5000, cerca de 80 bilhões de pontos cotados, o que equivale a identificar a cota de 3 pontos para cada 4m² da superfície de Pernambuco. Para um conjunto de 41 cidades também foi feito levantamento complementar em escala equivalente a 1:1000, com 4 pontos cotados por m². O erro médio esperado na avaliação das altitudes na escala 1:5000 é da ordem de 25cm e para a escala 1:1000 de 10cm. É uma notável base de dados espaciais para suporte a muitas iniciativas para o desenvolvimento sustentável de Pernambuco (CIRILO et al, 2014).

A utilização de técnicas avançadas de planejamento do uso do solo urbano e rural trazem expressivos ganhos de qualidade e rapidez para a elaboração de estudos, como planos diretores, e projetos de engenharia de maneira geral. Nesse contexto, a identificação detalhada do relevo e a possibilidade de quantificar previamente as transformações necessárias para realizar uma intervenção são fundamentais para escolha de soluções mais adequadas dos pontos de vista técnico, ambiental, econômico e social.

No que se refere à área ambiental, a base de dados pode dar apoio à identificação de áreas de risco e danos aos recursos naturais, como áreas de degradação e perda dos solos e da vegetação, contaminação das águas e degradação de nascentes e áreas de recarga de aquíferos.

O PE3D tem enorme potencial de utilização para as intervenções que requerem detalhamento preciso do terreno, como estradas, ferrovias, barragens, sistemas de irrigação, redes de água, esgotos, energia, gás, serviços de mineração e toda a gama de empreendimentos públicos e privados de maior porte.

No ambiente urbano, além das ações de infraestrutura citadas, deve-se ressaltar o potencial do PE3D para o controle da expansão urbana em bases sustentáveis. Considerando que um dos produtos é o modelo de elevação, a base de dados pode ser utilizada para identificação do estágio de verticalização das cidades e tomada de decisões pelo poder público.

Para o setor empresarial, o PE3D traz grandes oportunidades de otimizar decisões como na escolha do terreno de instalação ou expansão e nas ações de logística. Ao mesmo tempo, estado e municípios aumentam seu poder de atrair novos investimentos a partir da caracterização muito detalhada do seu território, potencializando as melhores locações para os empreendimentos.

Além da sua importância para as ações governamentais e da iniciativa privada, o PE3D deve se tornar um marco para o desenvolvimento no campo acadêmico, com benefícios a todas as ciências que desenvolvem pesquisas e lidam com a localização espacial e caracterização do relevo. A base de dados espaciais disponibilizada permitirá o desenvolvimento de novas ferramentas tecnológicas de forma pioneira, visto que Pernambuco é o primeiro estado das Américas, fora dos Estados Unidos, a dispor de produtos dessa natureza para todo o seu território.

Neste contexto, o PE3D apresenta-se como colaborador importante na realização deste trabalho, pois através dele é a possível obter a imagem com detalhamento preciso do terreno no local de estudo. Os resultados do levantamento estão sendo gradativamente disponibilizados no site www.pe3d.pe.gov.br, na medida em que são consistidos. No total, são 13125 quadrículas com diversos produtos digitais gerados.

2.6 Classificação de imagens

Com a evolução das geotecnologias, atualmente é possível uma análise mais eficiente dos ambientes, onde novas técnicas permitem seu conhecimento e, através do classificador orientado a objeto, que utiliza o princípio da segmentação com intuito de homogeneizar as informações, facilita a análise da imagem. Essa técnica tem sido comumente empregada em imagens de alta resolução, principalmente para áreas urbanas.

Orientação a objeto pode ser entendida, no âmbito da imagem, como a análise da relação de um objeto com os seus objetos vizinhos. Define-se objeto como o elemento da imagem constituído de relações espaciais, os quais podem se agregar a objetos maiores, criando-se níveis de segmentação (ANTUNES e STURM, 2005). A lógica de orientação a objeto preconiza as características semânticas dos objetos, que podem ser analisadas de acordo com seus aspectos geométricos e temáticos,

respectivamente. O primeiro compreende topologia, forma e posição, o segundo atributos não espaciais dos objetos (ANTUNES, 2003).

A classificação orientada objeto por ser eficiente no processo de segmentação, pois não leva em conta apenas o digital number do pixel a ser classificado, mas também dos pixels ao seu redor procurando por similaridades estatísticas, agrupando estes conjuntos (PARANHOS FILHO, 2008). Contudo é uma alternativa para distinguir alvos que não podem ser separados somente com informação espectral, pois a classificação orientada objeto leva em conta informações adicionais de forma e textura (ANTUNES, 2003).

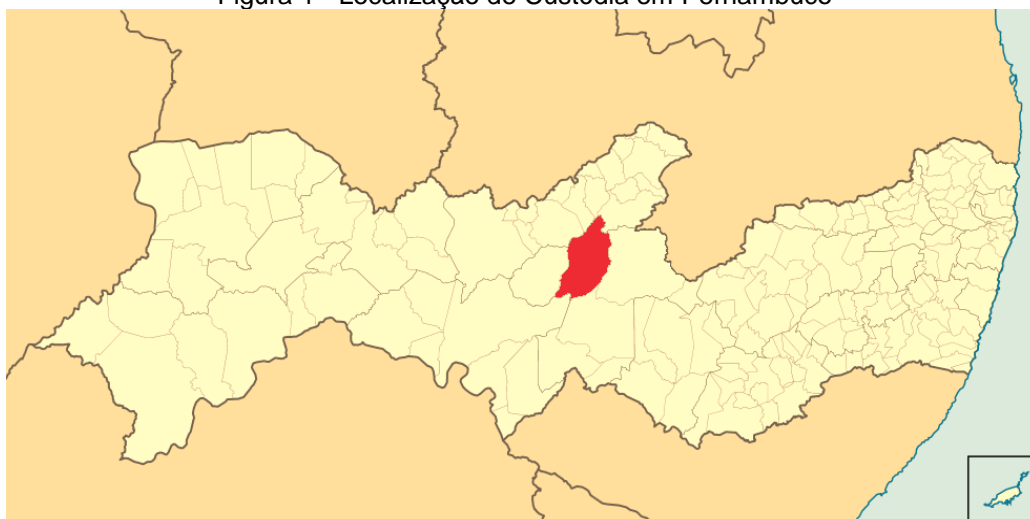
Existem diversos programas específicos para classificar imagens, como o ENVI, ERDAS-IMAGINE, E-COGNITION. No QGIS alguns “plugins” foram desenvolvidos para esse fim.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

A área de estudo encontra-se na cidade de Custódia-PE, no bairro Redenção, CEP:56640-000. A imagem de sua localização no estado de Pernambuco pode ser vista a seguir.

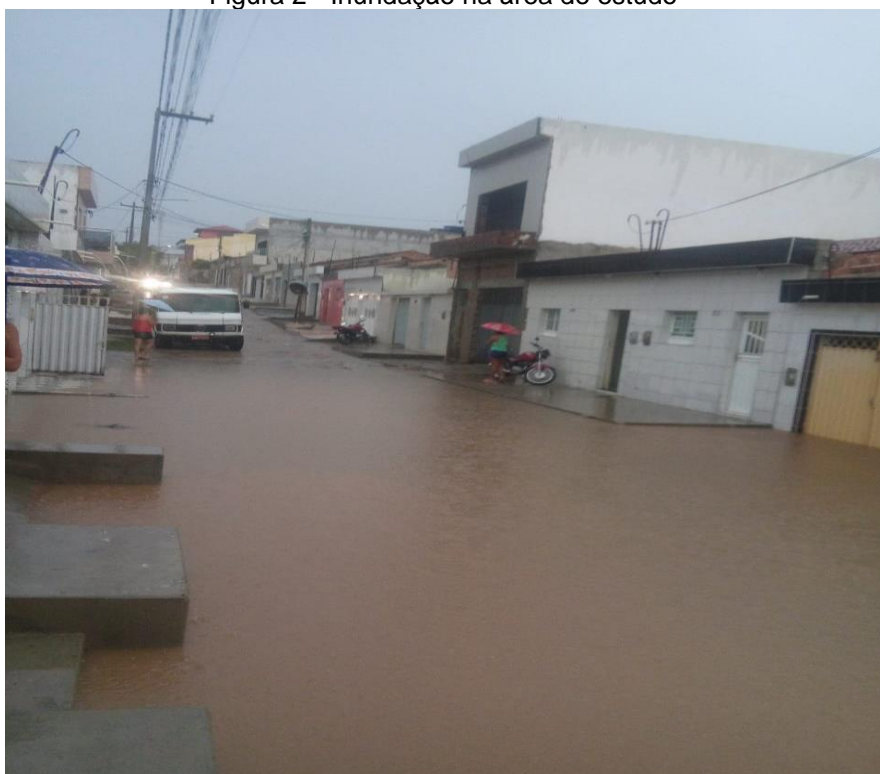
Figura 1 - Localização de Custódia em Pernambuco



FONTE: Autor (2018)

Com base em dados históricos, depoimentos dos moradores do local e fotografias são constatadas as frequentes inundações do local em períodos chuvosos, prejudicando toda a população circunvizinha. A seguir pode-se observar imagens dessa situação desagradável.

Figura 2 - Inundação na área de estudo¹



FONTE: Autor (2014)

Figura 3 - Inundação na área de estudo²



FONTE: Autor (2014)

Nessas duas últimas figuras, é possível observar os efeitos de um evento chuvoso ocorrido no dia 03 de fevereiro de 2014. Muitas casas foram inundadas, causando diversos danos para os moradores.

A imagem do local de estudo, disponível na escala de 1:5000, foi obtida através do PE3D, conforme figura a seguir.

Figura 4 - Área de estudo



FONTE: PE3D (2018)

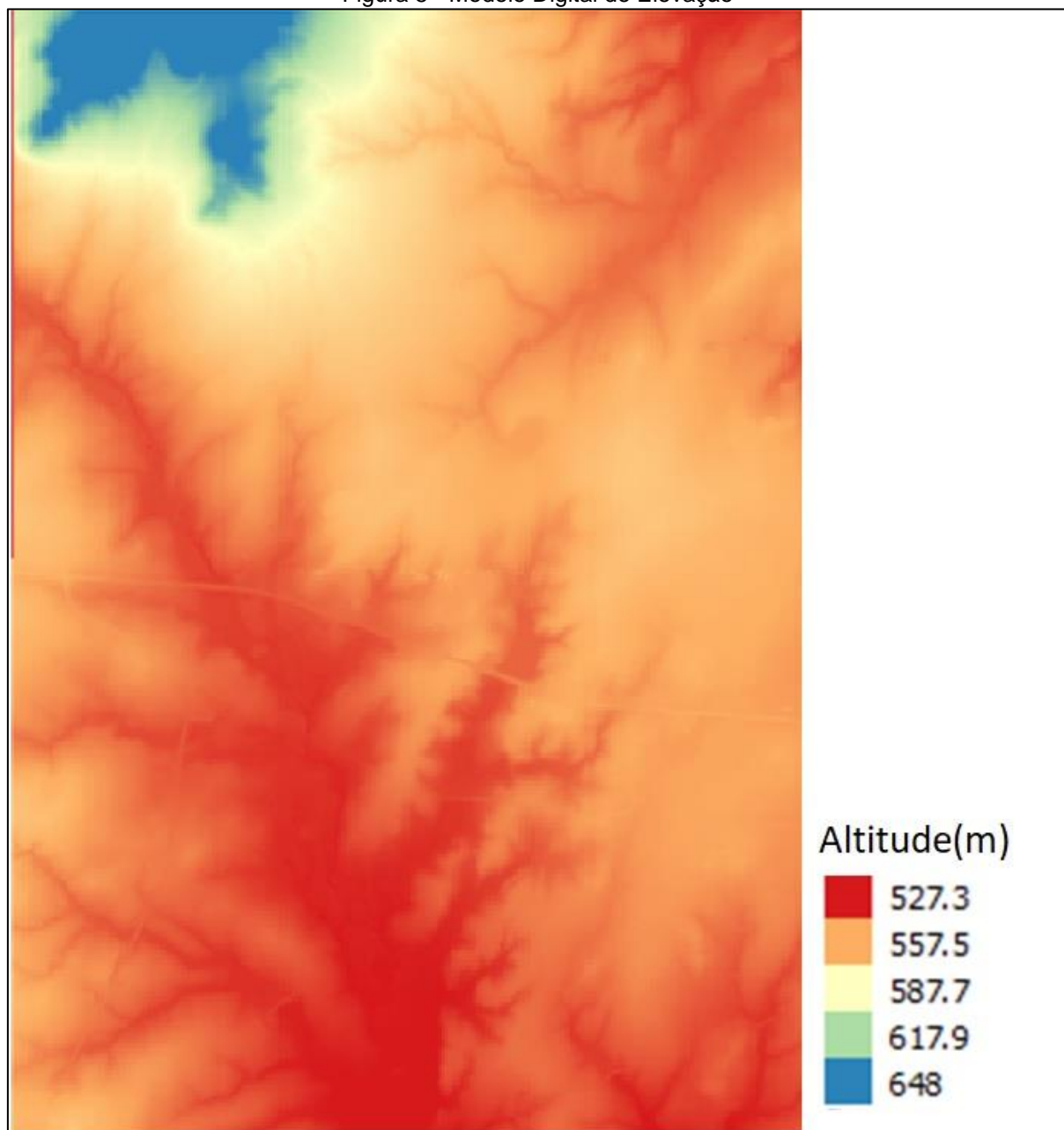
3.1.1 Geração da sub-bacia com saída no exutório de estudo

Ao iniciar o projeto no QGIS o primeiro passo a se executar é definir o sistema de referência de coordenadas que engloba a área de estudo. O local analisado é abrangido pelo sistema “SIRGAS 2000/UTM zone 24S”.

Para elaboração do estudo necessita-se definir os caminhos de escoamento. Nesta etapa é fundamental o recorte do MDT – Modelo Digital do Terreno ou o MDE – Modelo Digital de Elevação, a partir da base de dados PE3D. O MDE resulta diretamente do levantamento a laser, considerando o que se eleva acima do terreno

(construções, árvores, etc). O MDT é resultante de interpolação para representar somente as ondulações do terreno. Neste trabalho foi utilizado o MDE. O recorte, gerado com ferramentas do QGIS, é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo Digital de Elevação

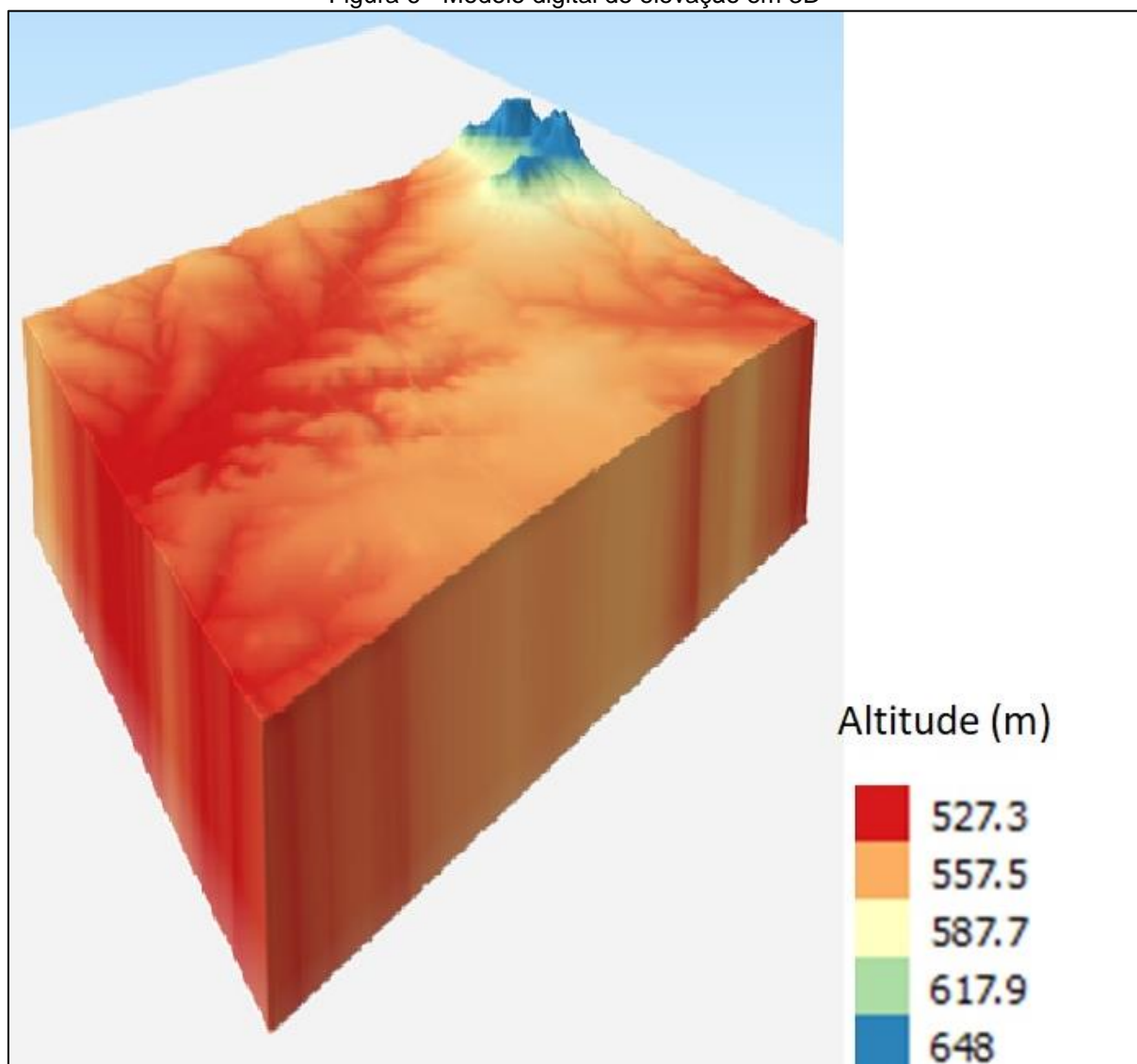


FONTE: Autor (2018)

Para traçado dos caminhos de fluxo é preciso preencher as depressões do terreno geradas por falhas de interpolação. No QGIS uma das ferramentas para isso se denomina "r.fill.dir".

Posteriormente, utilizando a camada do modelo digital de elevação com as falhas removidas pela ferramenta “r.fill.dir”, pode-se gerar uma representação tridimensional do terreno utilizando a ferramenta “Qgis2treejs” do QGIS. A representação do modelo digital de elevação em 3D pode ser vista na figura a seguir.

Figura 6 - Modelo digital de elevação em 3D



FONTE: Autor (2018)

Posteriormente é identificada a bacia hidrográfica que engloba a área de estudo, bem como a direção de drenagem e os segmentos de fluxo.

Esses resultados são obtidos utilizando a ferramenta “r.watershed”, localizada no mesmo endereço da ferramenta “r.fill.dir” citada na etapa anterior (opção “processar” do QGIS). Ao abrir a ferramenta, deve-se optar como parâmetro de

entrada, na opção “Elevation”, a camada do modelo digital de elevação ou do terreno (MDE ou MDT) sem depressões gerada na etapa anterior.

De antemão, para que o resultado obtido tenha melhor qualidade, convém que se aumente o valor do tamanho mínimo da bacia hidrográfica exterior. Para isso, editou-se o valor numérico da opção “*Minimum size of exterior watershed basin*”, colocando-se o valor 500, o qual obteve resultados satisfatórios. Valores mais elevados simplificam a rede de drenagem. Valores mais baixos levam a rede de rios com até 8 ordens na classificação de Strahler.

Para geração dos elementos necessários nessa etapa, nas opções para abertura do arquivo após execução do algoritmo, deixou-se marcadas apenas “drainage direction”, “stream segments” e “Half-basin”, correspondendo, respectivamente, à direção de drenagem, os segmentos de fluxo e a divisão da bacia hidrográfica.

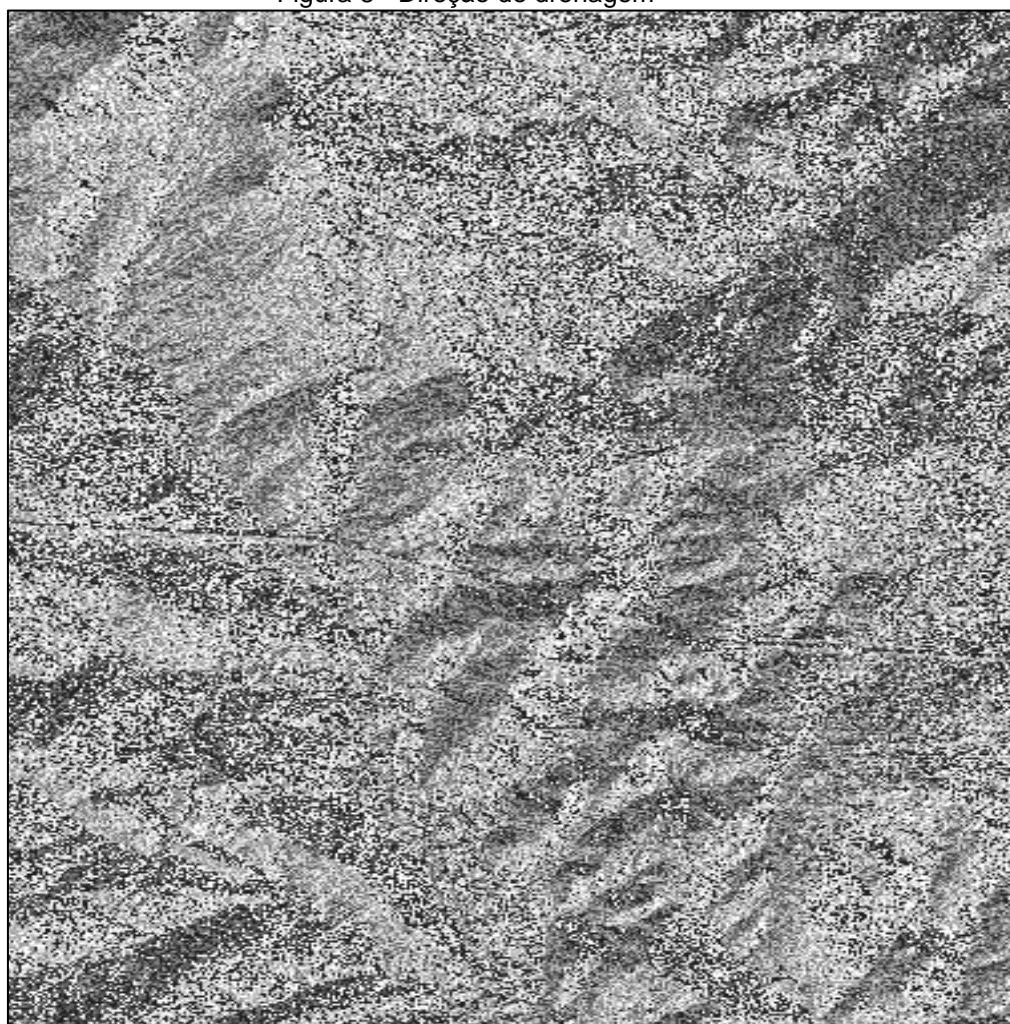
Os resultados obtidos são ilustrados nas figuras a seguir.

Figura 7 - Segmentos de fluxo



FONTE: Autor (2018)

Figura 8 - Direção de drenagem



FONTE: Autor (2018)

Figura 9 - Divisão das micro-bacias



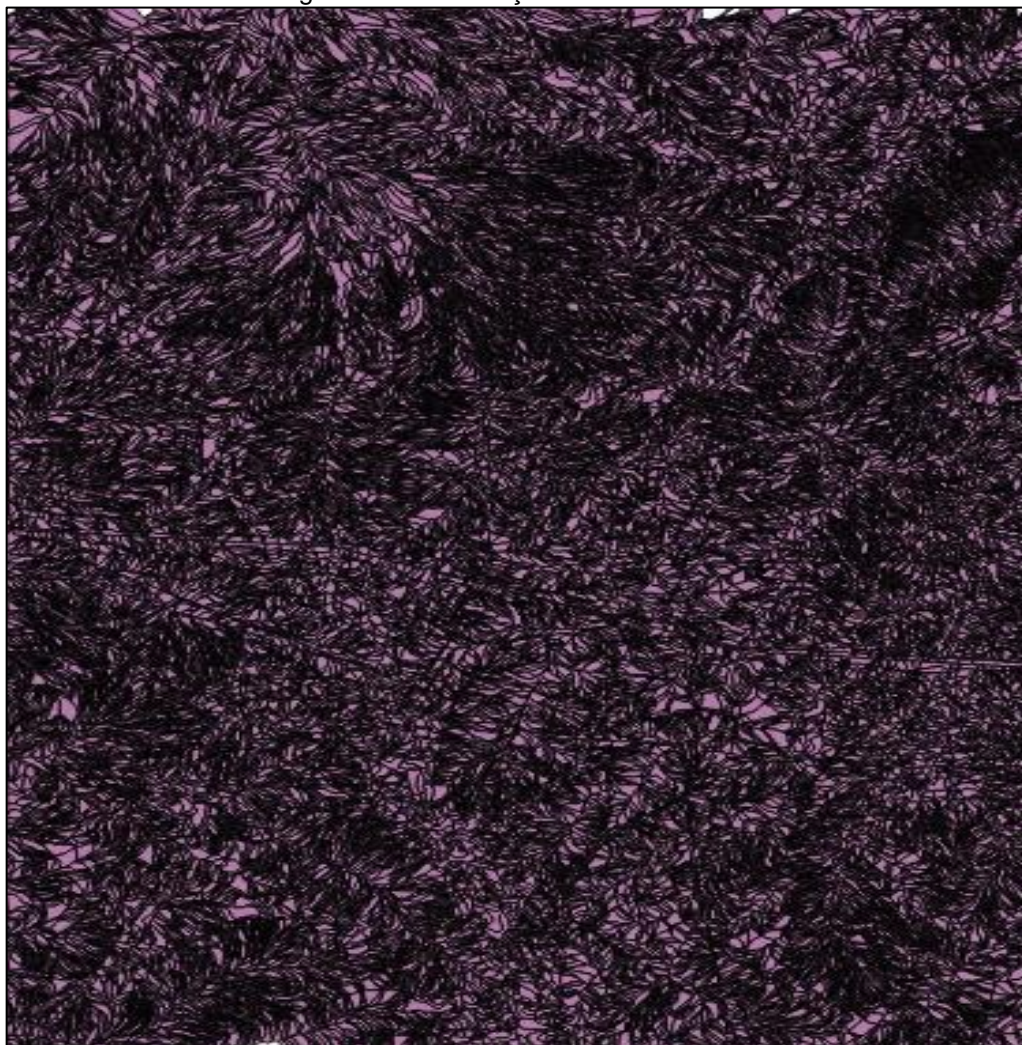
FONTE: Autor (2018)

Para melhor visualização das micro-bacias, é de grande importância a sua vetorização. Para realizar esse procedimento, utilizou-se a ferramenta “r.to.vect”, localizada no mesmo endereço das ferramentas citadas nas duas etapas anteriores.

Para isto, utiliza-se como parâmetro de entrada na opção “Input raster layer” a camada “Half-basin” gerada na etapa anterior. Como se trata de uma vetorização de uma área, é preciso especificar essa informação na aba “Feature type” marcando a opção “área”.

O resultado, está ilustrado na figura a seguir.

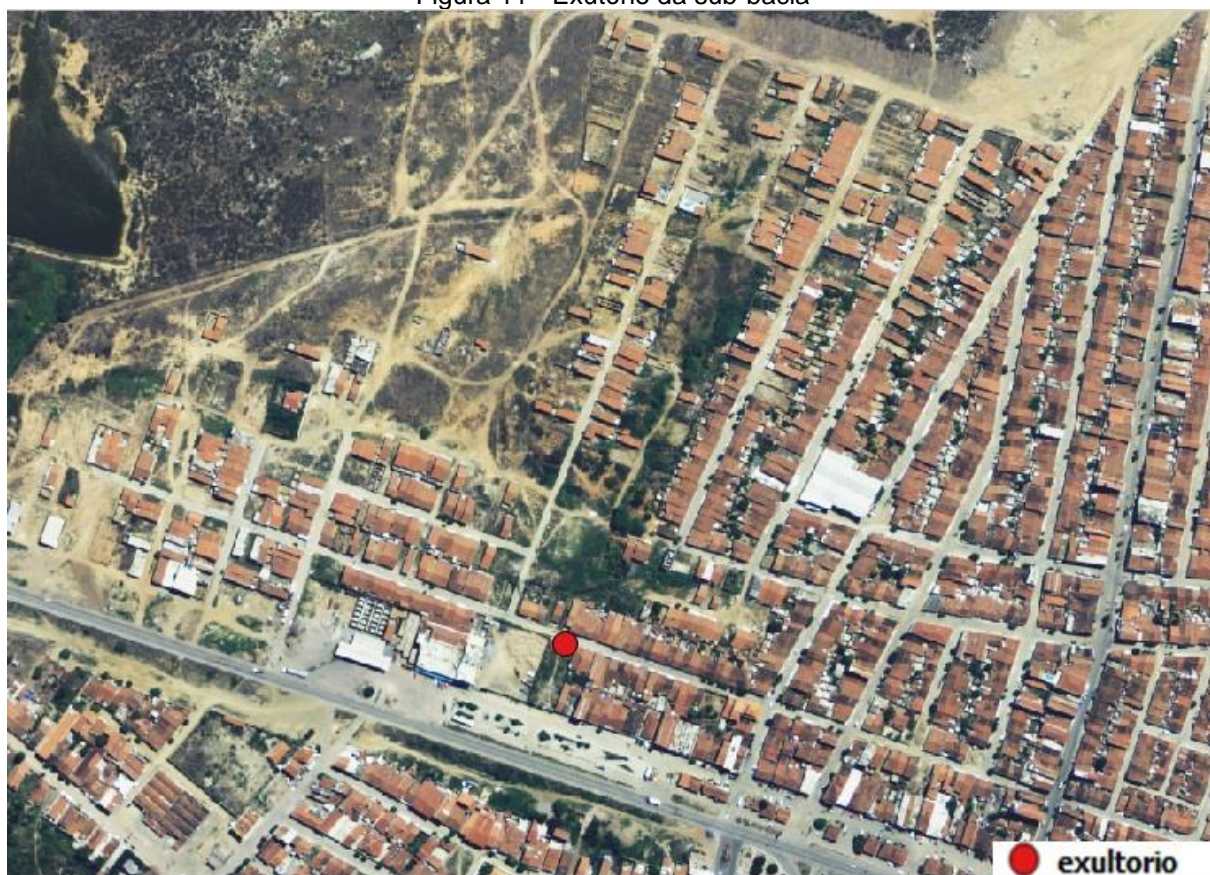
Figura 10 - Vetorização das micro-bacias



FONTE: Autor (2018)

A partir da análise do modelo digital de elevação é possível identificar os pontos mais baixos do terreno. Partindo da premissa de que o escoamento se dá dos pontos de maior cota para os de menor, bem como da disponibilidade de uma área propensa à construção de um elemento de macrodrenagem (sem necessidade de desapropriação, o que por questões econômicas, é o ideal), foi determinado o ponto ilustrado na figura a seguir, como sendo o exutório da sub-bacia.

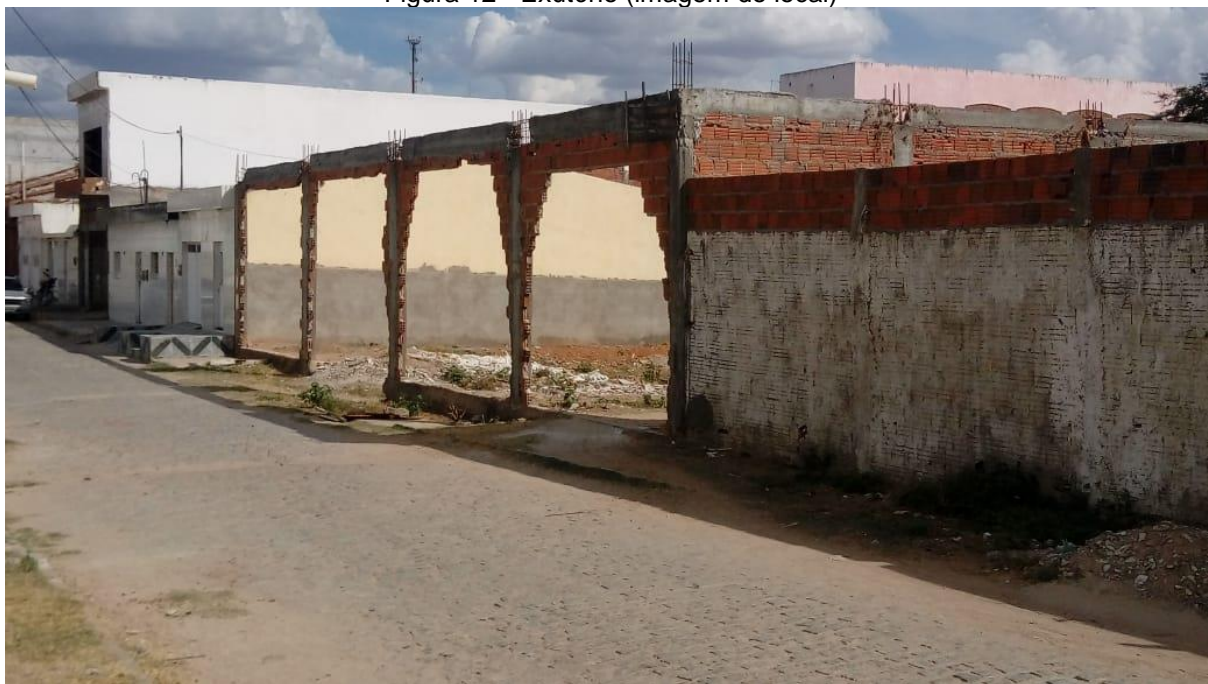
Figura 11 - Exutório da sub-bacia



FONTE: Autor (2018)

O ponto de exutório definido encontra-se na rua onde ocorrem inundações frequentes, definida como área de estudo como já ilustrado nas Figuras 2 e 3. Pode se ver o local escolhido como exutório na Figura 12.

Figura 12 - Exutório (imagem do local)



FONTE: Autor (2018)

Utilizando a ferramenta “*r.water.outlet*” foi possível gerar a sub-bacia até o exutório definido. Para isso, utilizou-se como parâmetro de entrada na aba “*Name of input raster map*” a camada “*Half-basins*” e, na aba “*Coordinates of outlet point (x,y)*” colocou-se as coordenadas do exutório obtidas pela ferramenta “Captura de coordenadas”. O resultado, pode ser visto na figura a seguir.

Figura 13 - Sub-bacia em estudo



FONTE: Autor (2018)

A partir da delimitação da sub-bacia, fez-se então o recorte das quadras que estão contidas nela. A Figura 15 mostra a área de contribuição para o exutório analisado.

Figura 14 - Área de contribuição



FONTE: Autor (2018)

3.1.2 Determinação das propriedades geométricas dos elementos

Sobrepondo a camada da sub-bacia gerada na camada RASTER da foto de satélite real da área de estudo, é possível, visualmente, identificar quais lotes estão contribuindo com o exutório.

Sabendo isso, fez-se então a delimitação desses lotes e posteriormente, utilizando a calculadora de campo do QGIS calculou-se a área de cada quadra. Os resultados são ilustrados a seguir.

Figura 15 - Delimitação das quadras



FONTE: Autor (2018)

Tabela 1 - Área das quadras

QUADRAS	ÁREA DAS QUADRAS (m ²)
1	6256.750158
2	6377.612879
3	35838.43158
4	16952.88256
5	20038.28919
6	17124.39816
7	2483.692396
8	6529.10782
9	2462.618177
10	4412.804151
11	13425.07936
12	3020.270039
13	3009.114989
14	4345.536826
15	1769.841051
16	4660.996377
17	49534.75336

FONTE: Autor (2018)

Levando em consideração que cada quadra teria um ponto de drenagem, fez-se necessário então desenhar estes pontos e calcular suas cotas geométricas. Os pontos foram escolhidos, de modo que todo o escoamento fosse feito por gravidade.

O cálculo das cotas foi feito utilizando a ferramenta “Point sampling tool” do QGIS. Nesta etapa, foram geradas duas análises diferentes. A primeira, consiste nos pontos que serão utilizados para o projeto de drenagem utilizando o SWMM e a segunda utilizando o Método Racional. Essa diferença resulta do fato de o SWMM permitir apenas um ponto de exutório para cada sub-bacia. Os resultados são ilustrados a seguir.

Figura 16 - Pontos utilizados no SWMM



FONTE: Autor (2018)

Tabela 2 - Cotas dos pontos utilizados no SWMM

PONTOS	COTAS (m)
1	553.95306
2	551.83533
3	550.15472
4	551.2998
5	546.45044
6	554.13013
7	553.85797
8	551.26532
9	547.62799
10	545.79272
11	544.63379
12	544.16858
13	541.71539
14	543.82672
15	549.66083
16	545.2254
17	552.6004
18	551.73981
19	551.43268
20	545.84943
21	563.09595

FONTE: Autor (2018)

Figura 17 - Pontos utilizados no Método Racional



FONTE: Autor (2018)

Tabela 3 - Cotas dos pontos utilizados no Método Racional

PONTOS	COTAS (m)
1	549.11462
2	545.55457
3	544.664
4	545.1106
5	544.04376
6	563.04163
7	561.88794
8	546.51074
9	560.69336
10	551.19165
11	546.2948
12	558.9635
13	559.0625
14	549.40869
15	549.1615
16	548.6062
17	554.1109
18	555.70526
19	553.44946
20	554.00159
21	551.04425
22	554.37238
23	554.9538
24	553.06683
25	552.79926
26	553.80798
27	551.23145
28	551.78558
29	552.78174
30	544.62189
31	559.80389
32	563.82629
33	541.78119

FONTE: Autor (2018)

Por fim, fez-se a demarcação das vias ligando os pontos gerados na etapa anterior. Os comprimentos de cada via foram determinados utilizando a calculadora de campo do QGIS. Os resultados são ilustrados nas figuras a seguir.

Figura 18 - Vias utilizadas no Método Racional



FONTE: Autor (2018)

Tabela 4 - Comprimento das vias utilizadas no Método Racional

TRECHOS	COMPRI MENTOS DOS TRECHOS (m)
1	157.23
2	48.21
3	157.42
4	9.17
5	38.23
6	50.01
7	63.95
8	49.53
9	55.34
10	55.97
11	116.61
12	53.13
13	56.25
14	67.81
15	63.33
16	60.97
17	55.93
18	58.36
19	100.91
20	357.16
21	113.43
22	72.23
23	315.89
24	372.34
25	57.7
26	63.42
27	36.73
28	53.71
29	55.11
30	243.49
31	144.81
32	93.38
33	59.98
34	58.63
35	54.74
36	92.13
37	94.97
38	99.26
39	109.76
40	381.34
41	81.84
42	76.28
43	73.55
44	158.24
45	122.89
46	49.35
47	45
48	158.46

FONTE: Autor (2018)

Figura 19 - Vias utilizadas no SWMM



FONTE: Autor (2018)

Tabela 5 - Comprimento das vias utilizadas no SWMM

TRECHOS	COMPRIMENTOS DOS TRECHOS (m)
1	70.76
2	62.74
3	28.92
4	54.87
5	27.61
6	61.56
7	75.9
8	70.29
9	31.55
10	135.54
11	52.19
12	44.36
13	90.41
14	52.98
15	40.79
16	43.62
17	83.7
18	88.96
19	24.17
20	349.1

FONTE: Autor (2018)

3.1.3 Classificação do uso do solo

Nesta etapa, foi feita a classificação do uso do solo para cada quadra do projeto. Os tipos de camadas de solo definidos para este projeto foram, respectivamente, solo sem cobertura vegetal (solo), solo com cobertura vegetal (vegetação) e as coberturas das edificações (telhado). O resultado pode ser observado na figura a seguir.

Figura 20 - Classificação do uso e ocupação do solo



FONTE: Autor (2018)

Os valores do coeficiente de escoamento superficial considerados foram de:

- $C = 92,5 \%$ (Superfície impermeável);
- $C = 60 \%$ (Terreno estéril plano);
- $C = 47,5 \%$ (Matas decíduas, folhagem caduca).

Os valores escolhidos, foram determinados por meio da figura a seguir.

Figura 21 - Valores de C propostos pelo Colorado Highway Department

Características da bacia	C (%)
Superfícies impermeáveis	90 - 95
Terreno estéril montanhoso	80 - 90
Terreno estéril ondulado	60 - 80
Terreno estéril plano	50 - 70
Prados, campinas, terreno ondulado	40 - 65
Matas decíduas, folhagem caduca	35 - 60
Matas coníferas, folhagem permanente	25 - 50
Pomares	15 - 40
Terrenos cultivados em zonas altas	15 - 40
Terrenos cultivados em vales	10 - 30

FONTE: Pruski et al. (2004)

Para os diferentes usos de ocupação do solo nas sub-bacias, o coeficiente de escoamento foi calculado fazendo-se a média ponderada conforme a Equação:

$$C = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + \dots + C_n \cdot A_n}{A_1 + A_2 + A_n}$$

Onde:

C = Coeficiente de escoamento superficial;

C_n = coeficiente de escoamento para uma determinada superfície;

A_n = área correspondente a essa superfície

Na tabela a seguir é possível visualizar os valores do coeficiente de escoamento superficial para as quadras da área de estudo.

Tabela 6 - Valores de C para as quadras

QUADRAS	ÁREA DAS QUADRAS (m²)	C(%)
1	6256.7502	63.83
2	6377.6129	72.88
3	35838.432	58.95
4	16952.883	64.56
5	20038.289	74.99
6	17124.398	74.07
7	2483.6924	80.77
8	6529.1078	89.72
9	2462.6182	87.71
10	4412.8042	90.41
11	13425.079	92.15
12	3020.27	91.74
13	3009.115	84.64
14	4345.5368	91.01
15	1769.8411	92.50
16	4660.9964	90.52
17	49534.753	53.34

FONTE: Autor (2018)

3.2 Avaliação da drenagem utilizando o Método Racional

O método racional foi apresentado pela primeira vez em 1851 por Mulvaney e depois utilizado por Emil Kuichling em 1889, sendo caracterizado por estabelecer uma relação entre a chuva e o escoamento superficial. Com o objetivo de contraposição aos métodos empíricos mais antigos, recebeu o nome de Método Racional. É utilizado para determinar a vazão contribuinte gerada por uma determinada área, mais adequado para pequenas dimensões. (TOMAZ, 2013).

Para realização do projeto, optou-se pelo uso do Método Racional, pelo fato da área da sub-bacia ser pequena, somente de 0,2 km². Para bacias com áreas maiores que 2km² este método não é aconselhado. A equação é a seguinte:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360}$$

Onde:

Q = vazão máxima de escoamento superficial, em m³/s;

C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

i = intensidade máxima média de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração, em mm/h ;

A = área da bacia de drenagem, em hectares.

3.2.1 Coeficiente de escoamento superficial

Os valores de escoamento superficial são observados na tabela 6.

3.2.2 Intensidade da chuva

O valor da intensidade da chuva i, foi determinado pela equação da curva I-D-F de Custódia-PE, obtida pelas análises de Silva et al. (2012), pela seguinte expressão:

$$i = \frac{840,677 \times TR^{0,193}}{(t + 10,531)^{0,753}}$$

Nesta expressão, T é o período de retorno em anos, t a duração da chuva em minutos e i a intensidade de precipitação em mm/h.

Considera-se que a duração da chuva t é igual ao tempo de concentração tc. O tempo de retorno T ou TR é definido em função do tipo de ocupação da área. Normalmente se considera TR = 5 anos para áreas residenciais.

3.2.3 Tempo de concentração

É o intervalo de tempo da duração da chuva necessário para que toda a bacia hidrográfica passe a contribuir para a vazão no exutório. Seria também o tempo de

percurso, até à secção de drenagem, de uma porção da chuva caída no ponto mais distante da bacia.

A Fórmula de Izzard para cálculo do tempo de concentração (em minutos) para áreas pequenas, com i em mm/h, escoamento à superfície em forma difusa é dada por:

$$t_c = \frac{526,42 \, b \, L^{1/3}}{(C \cdot i)^{2/3}}$$

Onde L é o comprimento (m) na direção do escoamento na área, b um coeficiente dado por:

$$b = \frac{0,0000276 \, i + c_r}{S^{1/3}}$$

Sendo c_r um coeficiente de retardamento, tabelado, e S a declividade da superfície. O valor escolhido para o coeficiente de retardamento, foi de 0,046 referente a uma superfície de relvado aparente, obtida através da tabela a seguir.

Tabela 7 - Valores do coeficiente de retardamento

Tipo de superfície	Valor de c_r
Asfalto liso bem acabado	0,007
Concreto	0,012
Macadame asfáltico	0,017
Relvado aparado rente	0,046
Vegetação rasteira densa	0,060

FONTE: Manual de Drenagem da Prefeitura de Porto Alegre (2005)

Para cada um dos trechos de galeria a seção a ser considerada é sempre a sua extremidade de montante, onde, se concentra a vazão a ser conduzida no trecho. Ao longo da rede, o tempo de concentração é determinado adotando um valor inicial de intensidade de chuva igual a 60 mm/h para o primeiro trecho e, nos trechos seguintes é determinado pela seguinte equação:

$$t_c = t_c(\text{anterior}) + t_p$$

Onde:

t_c = tempo de concentração (min);

t_p = tempo de percurso (min)

O tempo de percurso é determinado pela seguinte equação de escoamento uniforme:

$$t_p = \frac{L}{V}$$

Onde:

L = comprimento do trecho anterior (m);

V = velocidade real no trecho anterior (m/min).

3.2.4 Escoamento superficial

A seção de escoamento na sarjeta é considerada triangular, com lâmina máxima y no meio-fio. Essa lâmina é calculada a partir da Fórmula de Manning, admitindo a condição de escoamento crítico, para a qual o raio hidráulico $R_h = y/2$. A expressão se torna:

$$y = \left(\frac{2^{5/3} n S_t Q}{S^{1/2}} \right)^{3/8}$$

A altura de sarjeta considerada para o projeto foi 0,15m. Nos trechos, onde essa altura foi ultrapassada foi feita a instalação de bocas de lobo.

3.2.5 Instalação das bocas de lobo

Quando a água acumula sobre a boca-de-lobo, gera uma lâmina sobre a abertura da guia. Segundo o Manual de drenagem da Prefeitura de Porto Alegre

(2005), esse tipo de boca-de-lobo pode ser considerado um vertedor, e a capacidade de engolimento será:

$$Q = 1,7 \times L \times y^{3/2} \text{ válida se } y < 2h$$

Onde:

Q: vazão de engolimento (m³/s);

y: altura de água próxima à abertura na guia (m);

h: altura da abertura (m)

L: extensão da abertura da boca de lobo (m).

Se $y \geq 2h$, utilizar a expressão:

$$Q = 3,01 \times L \times h^{3/2} (y_1/h)^{1/2}$$

Onde:

$$y_1 = y - h/2$$

3.3 Parâmetros da modelagem no SWMM

Após o dimensionamento das galerias de drenagem de água pluvial, fez-se a modelagem da rede no SWMM a partir da identificação dos objetos: subáreas, condutos e nós. Para inserção dos dados cadastrais de drenagem no modelo, foram considerados os seguintes aspectos para os diferentes objetos.

3.3.1 Parâmetros físicos das Subáreas

Área – parâmetro que representa o valor da área dos segmentos presentes no sistema de drenagem, tais foram determinados no QGIS, conforme a Tabela 1.

Largura – valor referente à dimensão do escoamento superficial principal em cada subárea: foi adotada a maior dimensão de cada subárea.

Declividade – as declividades superficiais das subáreas foram obtidas a partir do levantamento das cotas no QGIS.

Taxa impermeável – este parâmetro foi obtido de acordo com a classificação do uso do solo.

Profundidade das depressões – Este parâmetro representa a retenção da água da chuva na superfície. São apresentados na Tabela 8 os valores sugeridos pelo SWMM, em função das diferentes coberturas da superfície.

Tabela 8 - Valores típicos de armazenamento em depressões

Natureza da Superfície	Valores (mm)
Superfícies Impenetráveis	1,27 - 2,54
Gramados	2,54 - 5,08
Pastagem	5,08
Serrapilheira	7,62

Fonte: ASCE, (1992). Apud Manual do SWMM Brasil (2012).

Como valor de referência para as depressões sobre superfícies impermeáveis adotou-se 2,54 mm, enquanto que para as superfícies permeáveis o valor das depressões adotado foi de 5 mm.

Rugosidade – é um parâmetro que estima o coeficiente de rugosidade com base nas características do revestimento do solo. Foram adotados valores sugeridos pelo SWMM, presentes na Tabela 9.

Tabela 9 - Coeficiente n de Manning – Escoamento à superfície livre.

Superfície	n
Asfalto liso	0,011
Concreto liso	0,012
Concreto normal	0,013
Madeira	0,014
Tijolo com cimento	0,014
Cerâmica	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubos de metal ondulado	0,024
Cimento com superfície de pedregulho	0,024
Solo em pousio	0,05
Solos cultivados	
Cobertos de resíduos < 20%	0,06
Cobertos de resíduos > 20%	0,17
Campo (natural)	0,13
Gramma	
Curta, pradaria	0,15
Densa	0,24
Gramma-bermudas	0,41
Floresta	
Vegetação rasteira leve	0,4
Vegetação rasteira densa	0,8

Fonte: MCCUEN (1996). Apud Manual do SWMM Brasil (2012).

Para as áreas impermeáveis, adotou-se um valor igual a 0,013. Já para as superfícies permeáveis adotou-se um valor igual a 0,13 para as camadas de solo sem cobertura vegetal (campo natural) e 0,4 para as camadas de solo com cobertura vegetal (Vegetação rasteira leve), referente à grama curta.

Deste modo, em cada subárea adotou-se 0,13 como valor do coeficiente de Manning para áreas impermeáveis, enquanto que para determinação do coeficiente de Manning para áreas permeáveis fez-se a média ponderada levando em consideração as áreas destas camadas. Na tabela 10 é possível observar os valores encontrados.

Tabela 10 - Valores do coeficiente de Manning para as áreas permeáveis

QUADRAS	n permeável
1	0.311
2	0.278
3	0.298
4	0.317
5	0.315
6	0.311
7	0.327
8	0.400
9	0.376
10	0.400
11	0.130
12	0.130
13	0.367
14	0.130
15	
16	0.400
17	0.321

FONTE: Autor (2018)

3.3.2 Nós e trechos

Cota dos nós – no QGIS foram levantadas as cotas correspondente aos tampões dos poços de visita.

Profundidade máxima dos condutos – esse parâmetro relaciona-se ao diâmetro dos condutos dimensionados pelo método racional. Nos casos em que o escoamento é feito somente pelas sarjetas, considerou-se o diâmetro de 400mm.

Comprimento dos condutos – é dado pela distância entre o nó de montante e jusante do elemento condutor.

3.3.3 Infiltração

A determinação da variável infiltração pode ser obtida por três modelos diferentes considerados pelo SWMM (Modelo de infiltração de Horton, Green – Ampt e Curva Número do SCS).

Para este estudo, adotou-se o modelo de infiltração da Curva Número do SCS– Soil Conservation Service dos Estados Unidos.

Para a determinação do escoamento superficial pelo Método do Número da Curva, é suficiente que o projetista conheça a precipitação que incide sobre a área, para a duração pretendida, e obtenha, a partir de tabelas, o valor do número da curva para diferentes condições de superfície e tipos de solo. A partir da tabela a seguir, é possível estimar o valor de CN para áreas de ocupação urbana.

Tabela 11 - Valores de CN para bacias com ocupação urbana

Utilização ou cobertura do solo	Tipo de solo			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios → boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas cobertura ruim	45	66	77	83
Florestais cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições				
com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
com relva de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
lotes de (m ²) % média impermeável				
<500 65	77	85	90	92
1000 38	61	75	83	87
1300 30	57	72	81	86
2000 25	54	70	80	85
4000 20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas asfaltadas e com drenagem				
de águas pluviais	98	98	98	98
paralelepípedos	76	85	89	91
terra	72	82	87	89

FONTE: TUCCI (1993)

Os tipos de solos, identificados nos referidos quadros, são os seguintes:

- Solo A: Produz baixo volume de escoamento superficial e apresenta alta infiltração. É o caso de solo arenoso profundo com pouco silte e argila.

- Solo B: Menos permeável do que o anterior. Típico de solo arenoso menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média.
- Solo C: Gera volume de escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentual considerável de argila. Pouco profundo.
- Solo D: Contém argilas expansivas. São pouco profundos, com muito baixa capacidade de infiltração.

Segundo o estudo do solo de Pernambuco feito pela EMBRAPA disponível no site www.embrapa.br, o solo da área de estudo é classificado como sendo REd - Associação de regosoldistrofíco. Pela imagem o que predomina é a impermeabilização. O valor de CN, adotado foi de 92 (Zonas residenciais com lotes menores que 500 m², tipo D).

3.4 Técnicas de atenuação de vazão

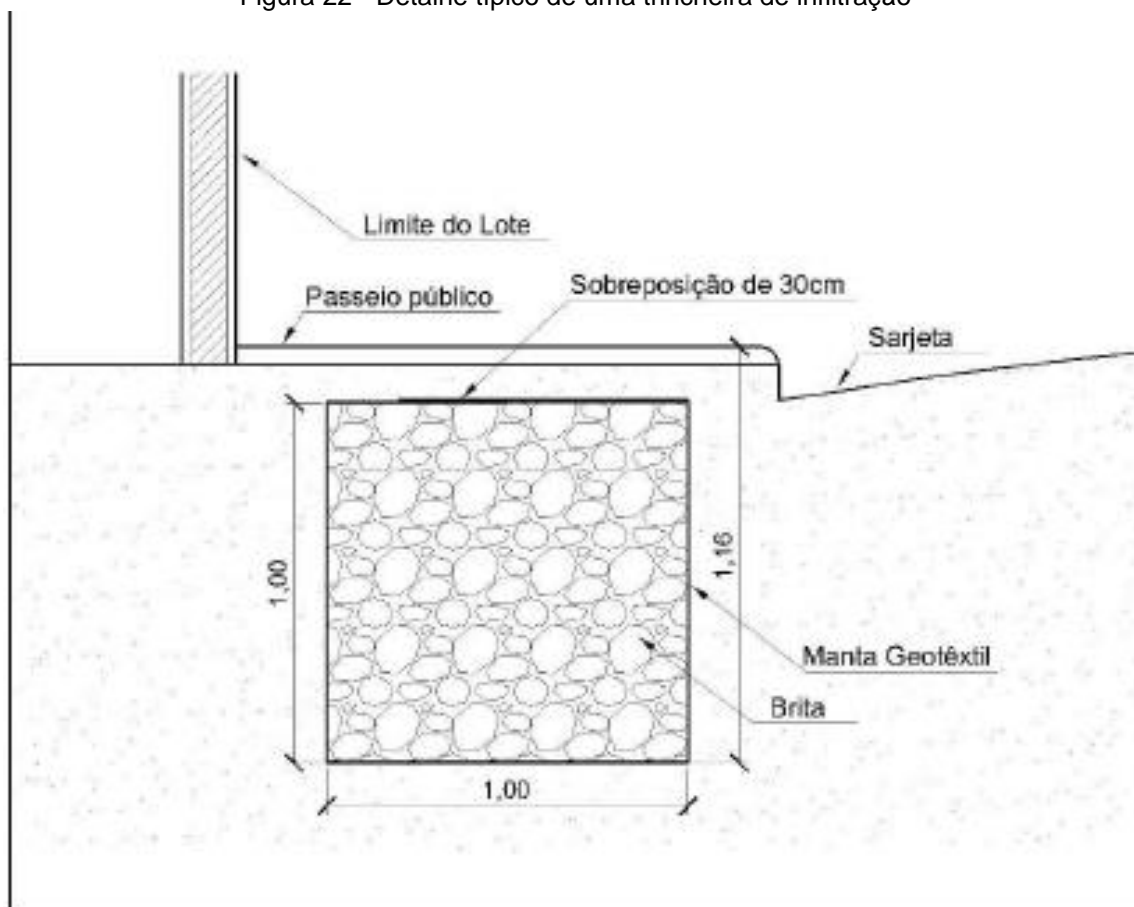
Como medidas alternativas para aperfeiçoamento do projeto de drenagem, por meio da redução dos picos de vazão dos pontos críticos, este projeto considerou a utilização de trincheiras de infiltração e a construção de um reservatório.

3.4.1 Trincheiras de infiltração

O SWMM pode modelar especificadamente cinco tipos de dispositivos de baixo impacto (LID): Bacia de filtração, trincheira de infiltração, pavimentos permeáveis, cisternas, e valas de infiltração sem dreno. Essas técnicas subtraem parte do escoamento superficial atenuando os picos de vazão.

A técnica de infiltração adotada foi a trincheira de infiltração, instaladas no passeio público (Figura 23). Considerou-se que essas trincheiras podem receber contribuições das áreas impermeáveis e após atingir sua capacidade, escoarão as águas excedentes para as sarjetas.

Figura 22 - Detalhe típico de uma trincheira de infiltração



Fonte: FEITOSA (2015).

Quanto às propriedades da superfície das trincheiras de infiltração, não se considerou armazenamento ou cobertura vegetal. Por recomendação do Manual do SWMM Brasil (2012), a rugosidade e a declividade atribuídas foram iguais a zero.

Em relação ao armazenamento, a espessura da camada de brita foi de um metro (Figura 23), parâmetro que representa a altura de armazenagem. O índice de vazios fica em torno de 40% (seixo, brita, pedra-de-mão ou outro) (TUCCI; MARQUES, 2001).

3.4.2 Construção de reservatórios

Desde alguns anos algumas cidades do Brasil, como São Paulo e Rio de Janeiro vem adotando a construção de reservatórios como forma de atenuação dos picos de vazão.

De maneira geral essas cidades exigem o uso de reservatórios de águas pluviais em loteamentos que possuam algum percentual de área impermeável, o qual varia conforme o critério adotado para a retenção temporária das águas pluviais que precipitam sobre cada lote, captadas através dos telhados, coberturas, pisos e áreas impermeáveis. Dessa forma, a retenção nesses lotes contribuem para o retardo do escoamento dessas águas para o sistema de drenagem público, uma vez que esses reservatórios só podem ser esvaziados no sistema de drenagem após determinado tempo de encerramento da chuva.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação da drenagem utilizando o Método Racional

A partir do desenho dos pontos de drenagem (Figura 18) e das cotas destes pontos (Tabela 3) foi traçada a rede de drenagem da área de estudo, onde os ramos A, B e C representam os ramos principais do sistema e os demais representam os ramos secundários que contribuem com aqueles. Conforme a figura 23, é possível observar o traçado da rede de drenagem.

Figura 23 - Traçado da rede de drenagem utilizando o Método Racional



FONTE: Autor (2018)

Com a rede traçada foi realizado o dimensionamento do sistema de drenagem utilizando o Método Racional, com o auxílio do EXCEL 2016. O resultado do dimensionamento da rede de drenagem utilizando o Método Racional pode ser observado na Tabela 13 encontrada no Apêndice A.

4.1.1 Determinação dos trechos críticos

Após o dimensionamento foram identificados os seguintes trechos críticos (em cor vermelha), como sendo os de maior vazão.

Figura 24 - Trechos críticos



FONTE: Autor (2018)

Nesses trechos, foi necessária a utilização de galerias subterrâneas (Tabela 14, no apêndice A).

Através da modelagem com o uso do SWMM é possível simular estratégias para reduzir os picos de vazão nesses trechos críticos e consequentemente, no exutório.

4.2 Dimensionamento utilizando o SWMM

Os resultados a seguir se referem às simulações da rede de drenagem pluvial, para a situação sem o uso de dispositivo de controle, modelagem da rede com trincheiras de infiltração e modelagem da rede com a utilização de um reservatório.

Para a primeira situação foi avaliada a compatibilidade da identificação dos trechos críticos em relação ao dimensionamento utilizando o Método Racional.

Para as duas últimas situações de modelagem foram avaliados os picos de vazão no exutório, afim de analisar o efeito da técnica de infiltração e a de inserção de reservatório na atenuação do pico de vazão.

4.2.1 Séries temporais

Utilizou-se o método *Bureau of Reclamation* para construção do hietograma de projeto baseado na curva I-D-F do local de estudo, disponibilizada por Silva et al.(2012).

Para este trabalho, adotou-se um tempo de retorno de 25 anos e um tempo de duração de chuva de 1 hora. O resultado pode ser observado na tabela a seguir.

Tabela 12 - Hietograma de trabalho

Tr 25 anos				
Duração (min)	i (mm/h)	Pac (mm)	ΔP (mm)	rearranjo precipitação (mm)
10	155.671	25.945	25.945	3.99
20	115.463	38.488	12.542	6.03
30	93.280	46.640	8.152	8.15
40	79.008	52.672	6.032	25.95
50	68.964	57.470	4.798	12.54
60	61.464	61.464	3.994	4.80

FONTE: Autor (2018)

Onde:

Duração = Duração da chuva em minutos;

i = intensidade da chuva em mm;

Pac = Precipitações correspondentes a diferentes durações;

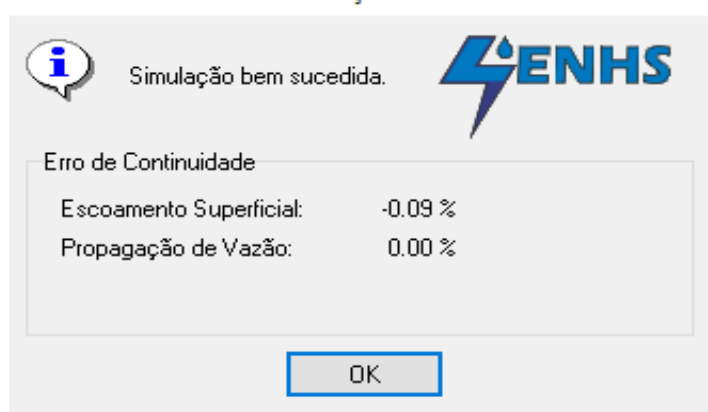
ΔP = incrementos de chuva correspondentes a cada incremento de duração;

Rearranjo precipitação = aplicação do método Bureau of Reclamation.

4.2.2 Simulação sem o uso de dispositivos de atenuação de vazão

Na Figura 25 é apresentado o relatório de erro para simulação sem o uso de dispositivos de atenuação de vazão. Os pequenos erros de continuidade, refletem a qualidade da simulação.

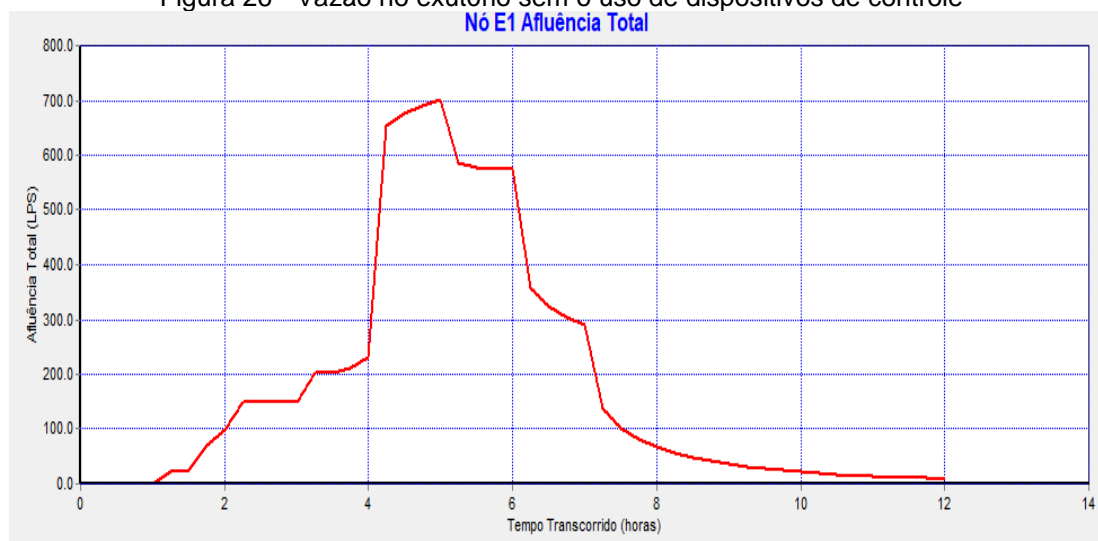
Figura 25 - Mensagem de erro da simulação sem dispositivos de controle
Relatório do Estado da Simulação



FONTE: Autor (2018)

Erros de continuidade com valores maiores que 10%, possuem resultados não confiáveis, sendo necessário rever os parâmetros de entrada. O gráfico com o comportamento da vazão no exutório em função do tempo pode ser visto na figura a seguir.

Figura 26 - Vazão no exutório sem o uso de dispositivos de controle



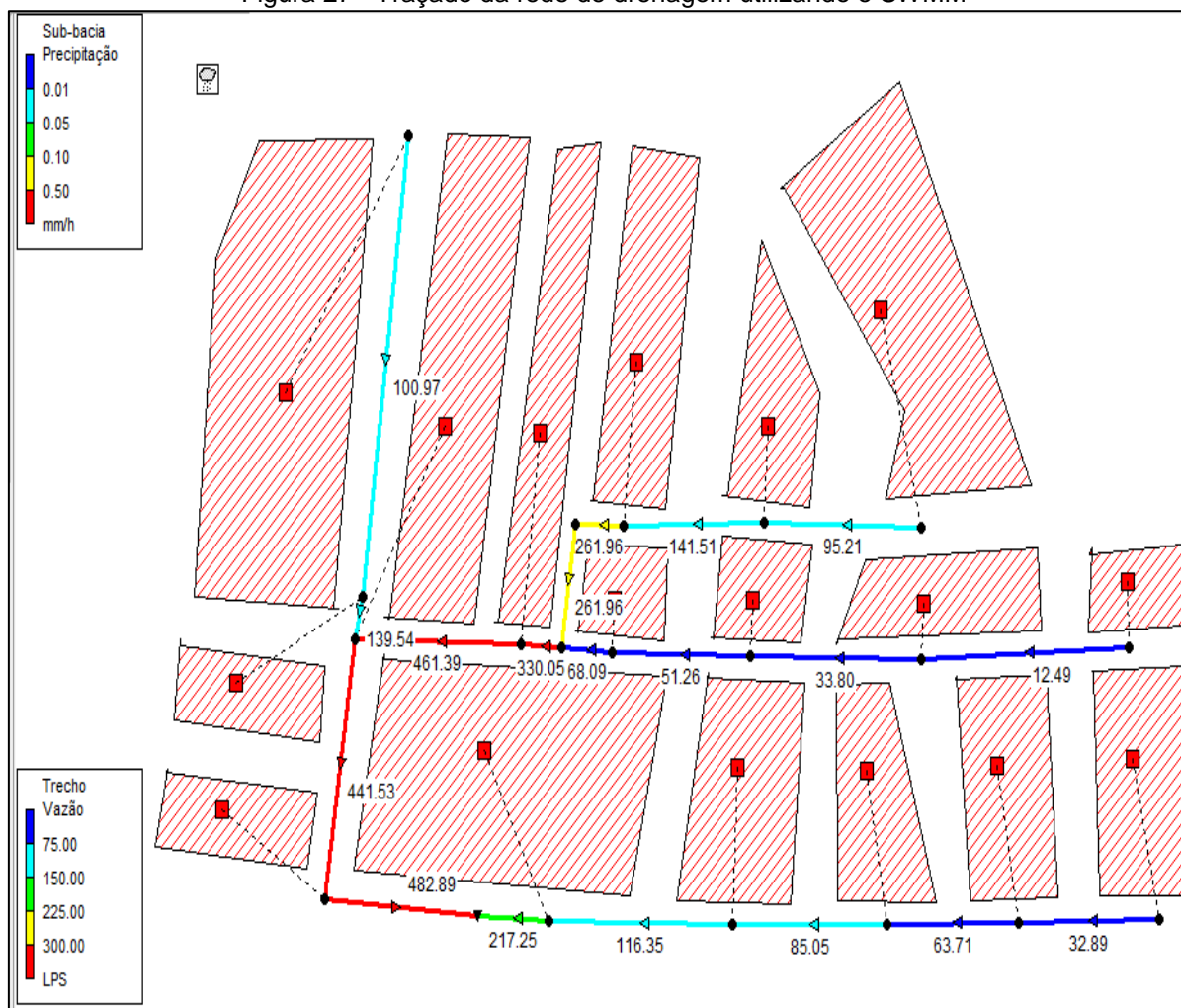
FONTE: Autor (2018)

A vazão máxima ocorreu em 5 horas de simulação. O pico de vazão foi de 700.14 L/s.

Foi possível observar que os trechos críticos do dimensionamento utilizando o SWMM são os mesmos que os determinados utilizando o Método Racional (Figura 25). A vazão máxima, porém, foi avaliada em 2400 L/s, muito superior à obtida pelo SWMM.

A figura com a modelagem da rede no SWMM sem o uso de dispositivos de drenagem e a identificação dos trechos críticos (trechos em cor vermelha), pode ser observada a seguir.

Figura 27 - Traçado da rede de drenagem utilizando o SWMM

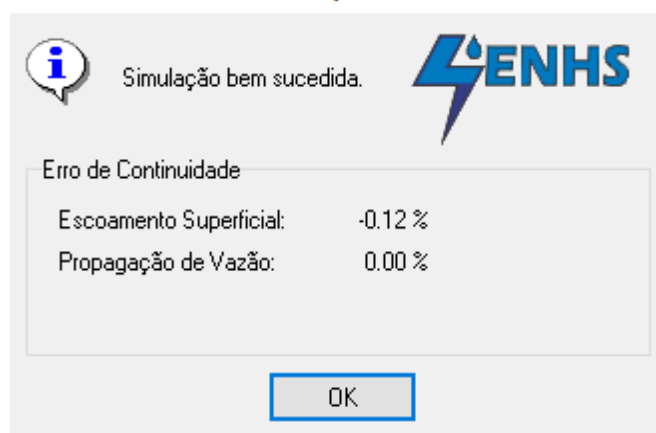


FONTE: Autor (2018)

4.2.3 Simulação com o uso de trincheiras de infiltração

O relatório de estado para a simulação com o uso de trincheiras de infiltração é apresentado na Figura 28. Os pequenos erros de continuidade conferem um resultado confiável a modelagem.

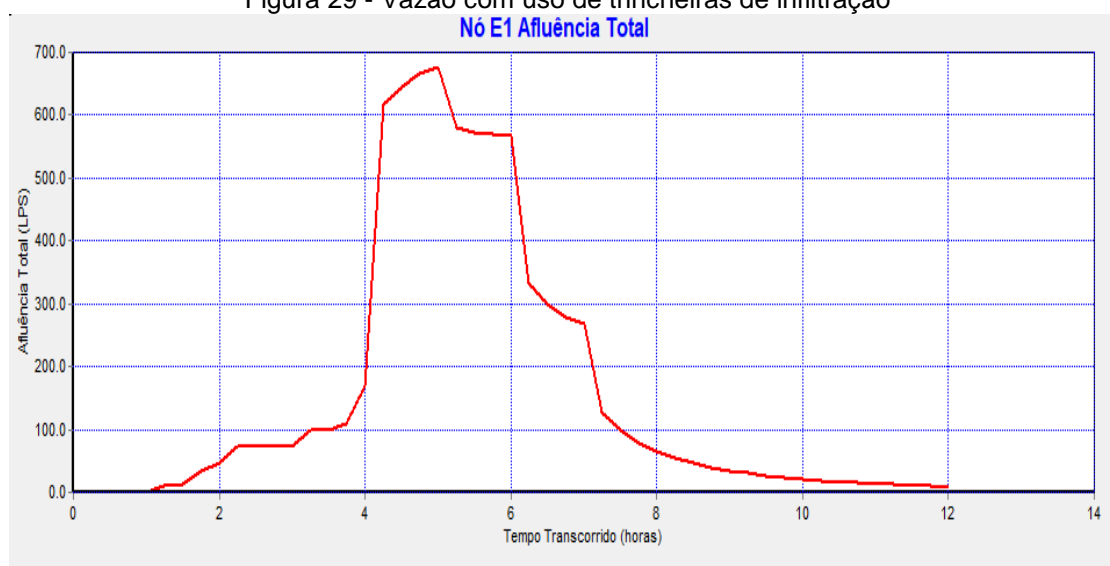
Figura 28 - Mensagem de erro da simulação com trincheiras de infiltração
Relatório do Estado da Simulação



FONTE: Autor (2018)

Na Figura 29 é mostrado o comportamento da vazão para a simulação da rede de drenagem com trincheiras de infiltração.

Figura 29 - Vazão com uso de trincheiras de infiltração
Nó E1 Afluência Total



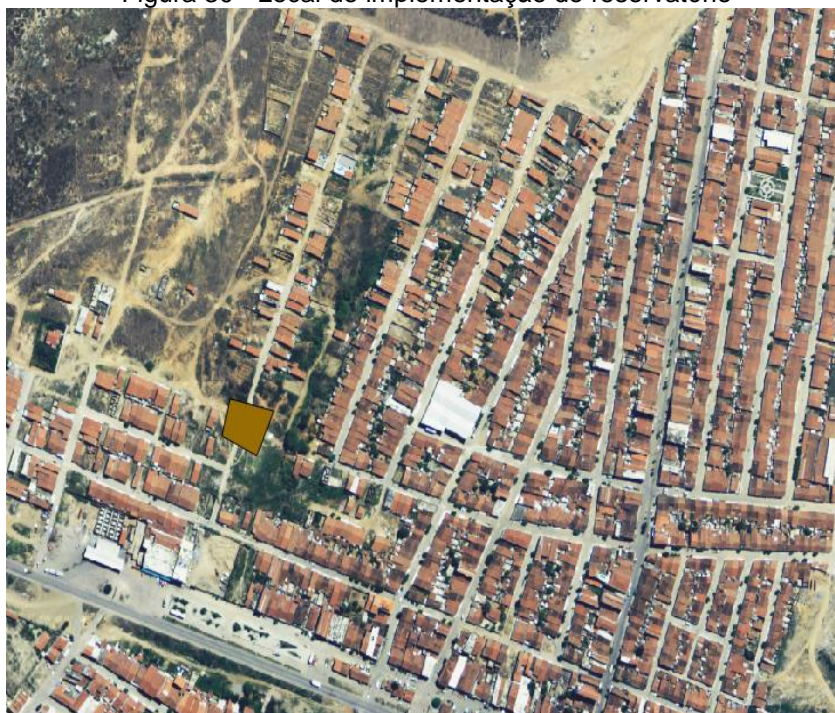
FONTE: Autor (2018)

A vazão máxima ocorreu em 5 horas de simulação. O pico de vazão foi de 677.41 L/s. Essa proposta, resultou numa redução de 3,25 % da vazão de pico da rede simulada.

4.2.4 Simulação com o uso de reservatório

Com base na identificação dos pontos críticos, buscou-se na área de estudo uma área propensa a construção de um reservatório. Nesta área, pode-se construir o reservatório sem a necessidade de desapropriação. Na Figura 30 é possível observar a área destinada a construção deste reservatório.

Figura 30 - Local de implementação do reservatório

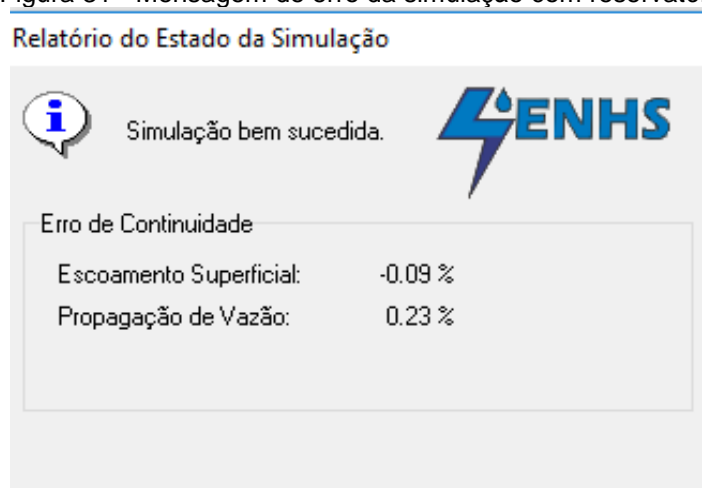


FONTE: Autor (2018)

Utilizando o QGIS, calculou-se a área do reservatório e a cota da tampa do reservatório e os valores obtidos foram, respectivamente, 1600 m² e 544,4 metros. Admitindo que este reservatório tenha uma altura de 2 metros, é possível armazenar um volume de 3200 m³.

O relatório de estado para a simulação com o uso do reservatório é apresentado na Figura 31. Os pequenos erros de continuidade conferem um resultado confiável a modelagem.

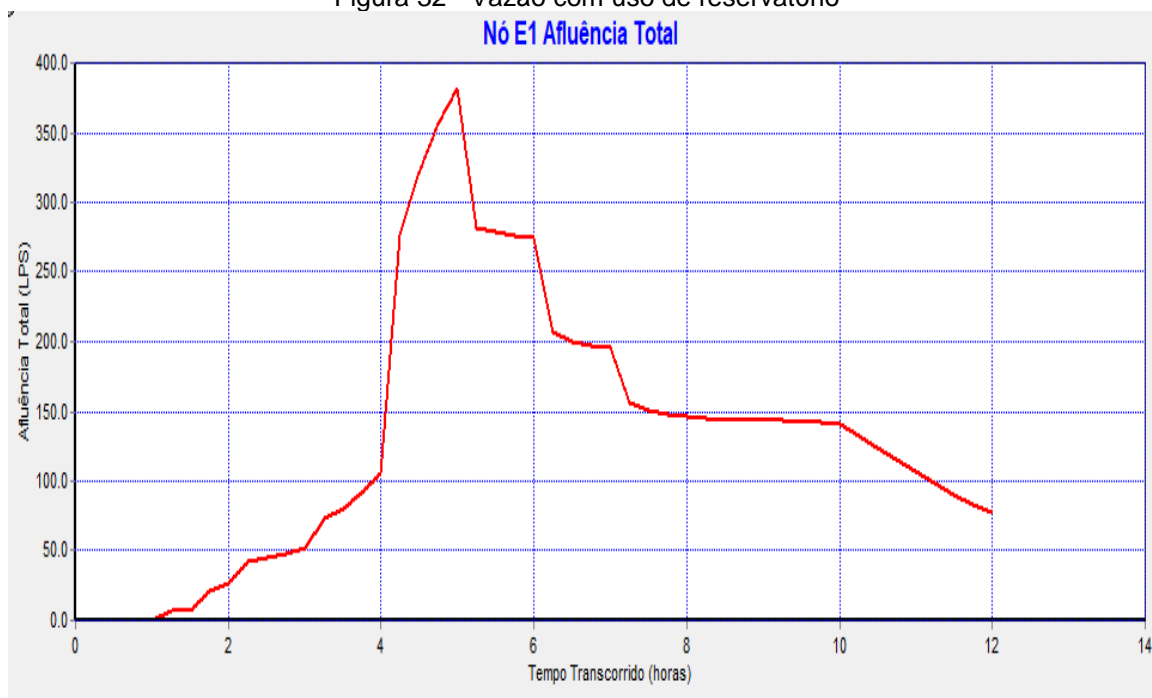
Figura 31 - Mensagem de erro da simulação com reservatório



FONTE: Autor (2018)

Na Figura 32 é mostrado o comportamento da vazão para a simulação da rede de drenagem com o reservatório.

Figura 32 - Vazão com uso de reservatório



FONTE: Autor (2018)

A vazão máxima ocorreu em 5 horas de simulação. O pico de vazão foi de 382.2 L/s. Essa proposta, resultou numa redução de 45,41 % da vazão de pico da rede simulada.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar as possibilidades de dimensionamento de rede de drenagem de uma sub-bacia localizada no município de Custódia-PE, através do SWMM, concomitantemente com imagens aéreas e modelo numérico do terreno de alta resolução associados com ferramentas de geoprocessamento.

Foi possível observar a equidade dos trechos críticos do projeto, utilizando o Método Racional e o SWMM. No entanto, o Método Racional levou a uma vazão da ordem de 2400 L/s no exutório.

Ocupando 2% da área total de cada subárea, foi visto que as trincheiras de infiltração diminuíram até 3,25% do pico de vazão para a rede simulada. Por outro lado, a construção de um reservatório com capacidade de reservação de 3200 m³ diminuiu até 45,41% do pico de vazão para a rede simulada.

A partir dos resultados analisados percebeu-se que a construção do reservatório obteve uma atenuação do pico de vazão da rede simulada maior que a utilização de trincheiras de infiltração.

Deste modo é realçada a importância do SWMM como ferramenta de planejamento de uma rede de drenagem urbana.

Como sugestão para novos trabalhos, fica a realização deste tipo de simulação levando em consideração um estudo de crescimento populacional da área analisada, vinculado ao aumento das taxas de impermeabilização do solo.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, A. F. B e STURM, U. 2005. **Segmentação orientada a objeto aplicado ao monitoramento de ocupações irregulares em áreas de proteção ambiental. Anais XII** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2019-2026.

ANTUNES, A.F.B. 2003. **Object oriented analysis and semantic network for high resolution image classification.** Boletim de Ciências Geodésicas. Volume 9, n 2.

CANHOLI, A.P., (2005) **Drenagem urbana e controle de enchentes.** Oficina de Textos, São Paulo, 304 p.

CIRILO, J.A., ALVES, F.H.B., SILVA, L.A.C., CAMPOS, J.H.A. **Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial.** RBGF – Revista Brasileira de Geografia Física. Volume 7, 2014. p. 755-763.

EMBRAPA. **Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco.** Disponível em: < www.embrapa.br>. Acesso em: 07 de novembro de 2018.

FEITOSA, F. F. S. **Avaliação do uso de trincheiras de infiltração para Atenuação de Picos de Cheia Utilizando o SWMM.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2015.

FONTES; A. R. M.; BARBASSA, A. P. **Diagnóstico e Prognóstico da Ocupação e da Impermeabilização Urbana.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, São Paulo, v. 8, n.2, abr/jun 2003. p. 137 – 142.

FSF - Free Software Foundation. **O que é software livre?** 2015. Disponível em: <<http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html>>. Acesso em: 10 de setembro de 2018.

GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional**. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: 27 de agosto de 2018.

MANUAL DO SWMM BRASIL. **EPA 5.0-Modelo de Gestão de Drenagem Urbana**. 2012. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/swmm/SWMM_2012.pdf>. Acesso em: 15 de setembro de 2018.

MILARÉ, G.; DA SILVA, N. M.; PARANHOS FILHO, A. C. **Cenário do uso de software livre em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) no Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 39, n.3, p.111-115, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11137/2016_3_111_115>. Acesso em: 25 de agosto de 2018.

NETO, A. C. **Sistemas Urbanos de Drenagem**. 2010. Disponível em: http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/ProducaoAcademica/Antonio%20Cardoso%20Neto/Introducao_a_drenagem_urbana.pdf. Acesso em: 25 de agosto de 2018.

PARANHOS FILHO, ANTÔNIO CONCEIÇÃO. 2008. **Sensoriamento remoto ambiental aplicado: introdução às geotecnologias**. Material didático – Campo Grande/ MS: Ed UFMS; p 103 -140.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Manual de Drenagem Urbana**. 2005

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. 2.ed. Viçosa: UFV, 2004. p 87.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation. 2017. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org/pt_BR/site/>. Acesso em: 20 julho de 2018

ROCCHINI, D.; PETRAS, V.; PETRASOVA, A.; CHEMIN, Y.; RICOTTA, C.; FRIGERI, A.; LANDA, M.; MARCANTONIO, M.; BASTIN, L.; METZ, M.; DELUCCHI, L.; NETELER, M. Spatio-ecological complexity measures in GRASS GIS. **Computers & Geosciences**, v. 104, p. 166-176, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.006>.

SILVA, B. M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, F.B.;FILHO,P.F.A (2012). **Chuvas intensas em localidades do Estado de Pernambuco**. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v17,n3,p.135-147,jul/set 2012.

TUCCI, C.E.M. 1993. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. EDUSP, Editora da UFRGS, ABRH, p 952.

Tucci, C. E. M.; Genz, F. 1995. **Controle do impacto da urbanização In: Drenagem urbana**. Tucci, C. E. M.; Porto, R. L. L.; Barros, M. T. ABRH 428 p.

TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. V. 2, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

TUCCI, C.EM. **Águas Urbanas**. Estudos avançados ed. 22. 2008

TOMAZ P. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. 2013. Disponível Em: <www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo.../capitulo02.pdf> Acesso em: 28 de outubro de 2018.

