UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

GEÓRGIA MOREIRA GURGEL

CRESCIMENTO URBANO E SEUS IMPACTOS NO SISTEMA DE DRENAGEM DE UMA BACIA EM NATAL/RN

Natal
2016

GEÓRGIA MOREIRA GURGEL

CRESCIMENTO URBANO E SEUS IMPACTOS NO SISTEMA DE DRENAGEM DE UMA BACIA EM NATAL/RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Marozzi Righetto

Natal
2016

GEÓRGIA MOREIRA GURGEL

CRESCIMENTO URBANO E SEUS IMPACTOS NO SISTEMA DE DRENAGEM DE UMA BACIA EM NATAL/RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Marozzi Righetto - Orientador

Profa. Dra. Adelena Gonçalves Maia - Examinadora UFRN

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro- Examinador Externo UFC, PhD.

Natal, 22 de Fevereiro de 2016

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Gurgel, Geórgia Moreira.
Crescimento urbano e seus impactos no sistema de drenagem de uma bacia em Natal/RN / Geórgia Moreira Gurgel. - Natal, RN, 2016.
83f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Antônio MarozziRighetto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Drenagem urbana – Dissertação. 2. Uso e ocupação do solo – Dissertação. 3. Simulação de cenários – Dissertação. 4. StormWater Management Model (SWMM) – Dissertação. 5. LowImpactDevice (LID) – Dissertação. I. Righetto, Dr. Antônio Marozzi. II. Título.

RN/UF/BCZM CDU 628.12

Aos meus pais, Gracinha e Edival, pelas palavras de conforto, por todo o esforço feito até hoje para me proporcionar uma educação de qualidade, bem como a superar todas as dificuldades com fé e honestidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus meu grande orientador por todas as conquistas alcançadas até aqui.

Ao professor Righetto pela confiança na execução deste trabalho.

Aos meus pais, Gracinha e Edival e ao meu irmão Giovane, que apesar dos quilômetros de distância, sempre me deram amor e incentivo para concluir esta etapa tão difícil de minha vida.

Ao meu esposo Anderson, pelo companheirismo, dedicação e incentivo para concluir este trabalho.

A Raniere Lima, pelas várias vezes que esteve disponível para me ajudar.

Aos meus sogros, Graça e Edson, por me receberem como uma filha na fase final dessa caminhada.

A CAPES pela bolsa de mestrado.

A todos que contribuíram de alguma forma para esta conquista, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS vii
LISTA DE TABELAS viii
RESUMO ix
1. INTRODUÇÃO 1
2. HIPÓTESES 4
3. OBJETIVOS 4
3.1. Objetivo Geral 4
3.2. Objetivos Específicos 4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
4.1. Urbanização 5
4.1.1 Crescimento urbano em Natal/RN 6
4.2 Drenagem urbana 7
4.3 Impacto da urbanização e o desenvolvimento sustentável da drenagem . 8
4.4 Medidas sustentáveis para o manejo das águas pluviais 11
4.5 Modelagem hidrológica 17
4.5.1 O modelo SWMM 18
5. MATERIAL E MÉTODOS 20
5.1. Área de estudo 20
5.2. Determinação das características físicas da bacia 21
5.3. Pluviometria local 22
5.4. Caracterização da bacia 23
5.5. Caracterização do sistema de drenagem da bacia 23
5.6. Determinação do uso do solo para os anos de 2005 e 2014 26
5.7. Aplicação do modelo SWMM – Storm Water Management Model 28
5.7.1. Discretização das subáreas 28
5.7.2. Representação do sistema de drenagem no modelo SWMM 30
5.7.3. Parâmetros hidrológicos 32
5.7.4. Dados hidrológicos 34
5.7.5. Parâmetros hidráulicos 36
5.8. Determinação de cenários de expansão urbana 37
5.9. Projeção da população 38
5.10. Análise de sensibilidade 39
6. RESULTADOS 40
6.1. Uso do solo para os anos de 2005 e 2014 40
6.2. Resultados das simulações com SWMM para os anos de 2005 e 2014 ... 44

6.3. Resultados das simulações para os cenários de expansão urbana 47

6.4. Resultados da análise de sensibilidade para o evento 1 49

6.5. Resultados da análise de sensibilidade para o evento 2 50

7. DISCUSSÃO 51

7.1. Análise do processo de urbanização 51

7.2. Análise dos parâmetros obtidos nas simulações para os anos de 2005 e 2014 52

7.3. Análise das simulações para os cenários de expansão urbana 53

7.4. Análise de sensibilidade para os eventos 1 e 2 54

8. CONCLUSÕES 55

9. REFERÊNCIAS 57

ANEXO-I 62

ANEXO II 67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipologia de técnicas compensatórias para o manejo das águas pluviais. ... 12
Figura 2. a)Valas de infiltração, b) Trincheira de infiltração, c) Pavimentos permeáveis, d) Telhados verdes, e)Extensão do meio fio com vegetação, f) Trincheiras de árvores para águas pluviais. ... 14
Figura 3. a)Barril de chuva, b) cisterna na UFRN, c)Cisterna de concreto integrada a garage ... 15
Figura 4. a)Bacia de detenção, b) Bacia de retenção, c)Bacia de infiltração do colégio CEI. ... 16
Figura 5. Localização da Sub-bacia 4. ... 20
Figura 6. Bacia de drenagem XII e suas sub-bacias. ... 21
Figura 7. Mapa topográfico da sub-bacia 4 ... 22
Figura 8. Precipitações médias mensais no ano de 2009 para a cidade de Natal. ... 22
Figura 9. Lagoa do Preá. ... 24
Figura 10. Sistema de drenagem da sub-bacia 4. ... 25
Figura 11. Transbordamento da Lagoa do Preá em 14/06/2014. ... 26
Figura 12. Visita a Lagoa do Preá nos anos de: a) 2009; b) 2010; c) 2011; d) 2014; e) 2010 ... 26
Figura 13. Discretização da bacia. ... 29
Figura 14. a) Discretização do sistema de drenagem no SWMM; b) Discretização do sistema de drenagem para o SWMM. ... 31
Figura 15. Gráfico da desagregação para o evento 1 pelo método de Huff. ... 35
Figura 16. Gráfico da desagregação pelo método de Huff: a) Evento 2; b) Evento3. ... 36
Figura 17. Avenidas com pavimento permeável para o cenário 4. ... 38
Figura 18. Gráfico da projeção populacional pelo método da projeção geométrica. ... 39
Figura 19. Uso e ocupação do solo para o ano de 2005. ... 41
Figura 20. Uso e ocupação do solo para o ano de 2014. ... 42
Figura 21. Regiões para análise do processo de urbanização. ... 44
Figura 22. Hidrogramas de saída do SWMM: a) Para o ano de 2005; b) Para o ano de 2014. ... 45
Figura 23. Nós que apresentaram alagamento na simulação para o evento 46
Figura 24. Perfis longitudinais gerados pelo SWMM: a) Perfil longitudinal da linha d'água para o evento 5 no ano de 2005; b) Perfil longitudinal da linha d'água para o evento 1 no ano de 2005 ... 47
Figura 25. Mapa de pontos críticos de alagamento para os cenários propostos. ... 49
Figura 26. Influência do n° de Manning para áreas impermeáveis na vazão de pico. ... 50
Figura 27. Influência dos parâmetros na vazão de pico ... 50
Figura 28. Influência dos parâmetros na vazão de pico. ... 51
Figura 29. Gráfico da desagregação pelo método de Huff: a) Evento 4; b) Evento 5; c) Evento 6; d) Evento 7 69
Figura 30. Hidrogramas gerados pelo SWMM para cada cenário e precipitação de 9,6: a) Cenário1; b) Cenário 2; Cenário 3; Cenario4 ... 71
Figura 31. Hidrogramas gerados pelo SWMM para cada cenário e precipitação de 14,9: a) Cenário1; b) Cenário 2; Cenário 3; Cenario4. ... 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Categorias de medidas não estruturais. 12
Tabela 2. Características físicas da Sub-bacia XII.4 21
Tabela 3. Padrões de detalhamento da bacia 27
Tabela 4. Parâmetros hidrológicos das subáreas 32
Tabela 5. Parâmetros de infiltração por subárea. 33
Tabela 6. Parâmetros de caracterização das subáreas para o SWMM 34
Tabela 7. Curva do reservatório para o SWMM 37
Tabela 8. Áreas por padrão de uso e ocupação do solo nos anos de 2005 e 2014 43
Tabela 9. Eventos obtidos para os anos 2005 e 2014 45
Tabela 10. Volumes de inundação da lagoa para os anos 2005 e 2014 45
Tabela 11. Vazão de pico gerada pelo SWMM para cada cenário. 48
Tabela 12. Dados obtidos pelo SWMM para cada cenário analisado. 48
Tabela 13. Discretização das subáreas para os conjuntos de quadras 63
Tabela 14. Diâmetros dos trechos adotados 64
Tabela 15. Parâmetros hidráulicos para os nós de conexão no SWMM 65
Tabela 16. Parâmetros hidráulicos para os trechos no SWMM 66

CRESCIMENTO URBANO E SEUS IMPACTOS NO SISTEMA DE DRENAGEM DE UMA BACIA EM NATAL/RN

RESUMO

O crescimento desordenado da maioria das cidades brasileiras não é, de forma planejada, acompanhado pelo desenvolvimento da infraestrutura urbana. Com o aumento da impermeabilização do solo, do escoamento superficial e a diminuição do volume infiltrado, impactos sobre os recursos hídricos e sobre a população das áreas afetadas pelo crescimento urbano são inevitáveis. Este trabalho tem como objetivo avaliar o uso e ocupação do solo de uma bacia e analisar o sistema de drenagem, de forma a controlar os impactos por meio de medidas que integrem o desenvolvimento urbano com a drenagem das águas pluviais em uma importante bacia na cidade de Natal/RN. O estudo envolveu a caracterização da bacia XII.4, sobre o uso e ocupação do solo, referente aos anos de 2005 e 2014. Com a aplicação do modelo SWMM foi possível analisar os impactos causados pelo processo de urbanização no sistema de drenagem existente, mostrando que os dois anos analisados encontram- se com suas áreas muito próximas do estado de saturação, em termos de porcentagem de áreas impermeáveis. Apesar da região ainda ser predominantemente residencial unifamiliar, sofre crescente verticalização, principalmente de edifícios comerciais. Sobre o sistema de drenagem, este se encontra ineficiente para as necessidades da área já no ano de 2005. O sistema de drenagem também foi testado para quatro variações de uso do solo através da elaboração de cenários. O cenário 1 é relacionado ao ano de 2014, considerado atual. O cenário 2 foi adotada a taxa máxima de 80% para a ocupação do solo, permitida para o município de Natal. O cenário 3 apresenta o estado crítico de ocupação do solo, estando à área 100% impermeabilizada. O cenário 4 é aplicado para a existência de LID(Dispositivo de Baixo Impacto). A análise dos cenários mostrou que todos indicam deficiência em algum ponto do sistema de drenagem em conseqüência do alto grau de ocupação da área que geram escoamentos superiores a capacidade inicial do sistema. Com o estudo, ficou claro que a adoção de medidas não estruturais são eficientes na redução de alagamentos e no aumento da capacidade do sistema de drenagem.

Palavras-chave: Uso e ocupação do solo; Simulação de cenários; Drenagem urbana; SWMM; LID.

URBAN GROWTH AND ITS IMPACTS ON DRAINAGE SYSTEM OF A BASIN IN NATAL / RN

ABSTRACT

The uncontrolled growth of most Brazilian cities is not accompanied by the development of urban infrastructure. With increasing soil sealing, runoff and decreased infiltration volume, impacts on water resources and on population of the areas affected by urban growth are inevitable. This study aims to evaluate the use and occupation of a watershed and analyze the drainage system in order to control the impact using tools to integrate urban development with the drainage of rainwater in an important watershed in the Natal City, Rio Grande do Norte State. The study involved the characterization of the basin XII.4 on the land use and occupation, for the years 2005 and 2014. With the application of SWMM model was possible to analyze the impacts caused by the urbanization process in the existing drainage system, showing the two years analyzed have their areas very close to percentage saturation of impervious areas. Although the region is still predominantly single family residential, suffers increasing verticalization of mainly commercial buildings. The drainage system is inefficient for the area's needs by the year 2005. The drainage system was also tested for four variations of land use by developing scenarios. Scenario 1 is related to the year 2014, considered current. Scenario 2 was adopted the maximum rate of 80% for land use, allowed for the Natal City. Scenario 3 gives the critical condition of land use, with the area 100% impervious. Scenario 4 is applied to the existence of LID (Low Impact Device). The scenarios analysis showed that all indicate deficiency at some point of the drainage system as a result of the high degree of occupation of the area that generate higher flows than the initial drainage system capacity. With the study it became clear that the adoption of non-structural tools are effective in reducing flooding and improving the drainage system capacity.

Keywords: Land use and occupation; Simulation scenarios; Urban drainage; SWMM; LID.

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento econômico, aumento da população e consequente ampliação das cidades, há a necessidade, principalmente nos grandes centros urbanos, de um acompanhamento sustentável da infraestrutura urbana.

O forte crescimento da construção civil nos últimos anos, resultante do desenvolvimento da economia, impulsionou o processo de verticalização e impermeabilização do solo nas grandes cidades. Regiões com potencial turístico, como a cidade de Natal-RN, atraem a atenção de investidores e novos habitantes, incrementando especialmente o mercado imobiliário. Em consequência desse crescimento surgem problemas urbanísticos decorrentes de subdimensionamento da infraestrutura urbana e deterioração do meio ambiente.

A copa do mundo de futebol de 2014 produziu transformações às cidades sedes. Grandes obras de infraestrutura e mobilidade urbana foram e ainda estão sendo realizadas, resultando na valorização do espaço em que se inserem, provocando aumento nos valores das áreas construídas e proporcionando o surgimento de novas áreas nobres. Devido à especulação imobiliária sofrida pelas cidades, tem-se a necessidade de um planejamento eficaz dessas áreas urbanas.

As modificações no uso e ocupação do solo das cidades geram vários impactos, não apenas sobre a população, mas também sobre os recursos hídricos. Em consequência desses impactos tem-se frequentemente a ocorrência de inundações urbanas que resultam em transtornos de mobilidade, perdas ambientais, materiais e até de vidas humanas.

A drenagem urbana pode ser entendida como um conjunto de equipamentos que visa reduzir os riscos que a população está sujeita e os prejuízos causados por inundações. A drenagem adequada contribui para promover um desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável (TUCCI, 2002).

A capital do estado do Rio Grande do Norte, Natal, sofreu vários processos de transformação do seu território. Passando de cidade dos Reis Magos, em 1599, com lento crescimento ao redor de igrejas, à cidade do Natal,

que hoje contempla grandes obras de engenharia e vivencia processos de ocupação, verticalização e problemas decorrentes da ineficácia dos serviços básicos de drenagem e de limpeza pública.

O conhecimento das modificações realizadas no solo decorrentes do uso e ocupação é essencial para identificar a influência no escoamento da bacia devido à impermeabilização de sua superfície, auxiliando na elaboração de medidas que permitam o desenvolvimento sustentável da bacia.

As técnicas compensatórias e não estruturais visam impedir que os problemas de drenagem sejam transferidos para jusante e, assim, realiza-se o controle do escoamento na bacia, fontes geradoras de deflúvio e não no curso d'água (CRUZI, 2007).

Em sua maior parte, as medidas de mitigação se baseiam na utilização de superfícies permeáveis, áreas de infiltração e armazenamento das águas superficiais (TUCCI; GENZ, 1995), integrando a outros interesses da sociedade, como abastecimento e paisagismo.

Com a elaboração de cenários é possível esclarecer as conseqüências resultantes de cada ação tomada. A simulação de cenários é adequada para inferir sobre as tendências de alterações do uso e ocupação do solo uma melhor definição de instrumentos de planejamento e políticas para a gestão territorial (ALMEIDA, 2004).

Através das legislações existentes no Plano Diretor Urbanístico e no Plano Diretor de Drenagem, busca-se promover a regulamentação da drenagem urbana associada aos ordenamentos do uso e ocupação do solo da bacia em estudo. Para mitigar os problemas causados pela ocupação não planejada do solo, são necessárias medidas que promovam a integração das ações realizadas pelos planos diretores para o crescimento urbano, assim como medidas não estruturais, que ajudem a manter a sustentabilidade da infraestrutura de drenagem existente.

No presente estudo, optou-se por analisar uma área com base no Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Natal (PDDMA). A bacia XII.4, unidade de estudo do presente trabalho, apresenta significativa importância para a cidade e vem sofrendo modificações estruturais de grande magnitude em virtude da construção do Estádio Arenas das Dunas, localizado ao lado da região estudada. O objetivo desse trabalho é a realização

do diagnóstico da área, com a descrição do uso do solo e dos tipos de ocupação urbana nele presente, bem como, a simulação de cenários para diferentes usos do solo e analisar o comportamento do sistema de drenagem em resposta a cada cenário proposto com a aplicação do modelo Storm Water Management Model (SWMM), bem como a adoção de medidas de controle sustentável para a drenagem urbana em uma região da cidade de Natal. O modelo hidrológico SWMM não será calibração por não haver equipamento instalado na bacia em estudo, portanto, neste trabalho a aplicação do modelo tem por finalidade a simulação de cenários que permitam a utilização da modelagem como uma ferramenta no processo de planejamento urbano e na identificação de pontos críticos quanto à rede de drenagem existente.

2. HIPÓTESES

2.1. A urbanização e consequentemente a impermeabilização do solo, ocorreu sem o planejamento e execução de obras adequadas para a drenagem urbana.

2.2. A urbanização não planejada é responsável por diversos impactos sobre o local na qual é aplicada, dentre eles, pontos de alagamento encontrados na área em estudo.

2.3. A infraestrutura de drenagem existente ou em construção mantém sua eficiência quando acompanhada de medidas não estrurais que acompanhem o crescimento de uso e ocupação do solo.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o uso e ocupação do solo de uma bacia representativa de Natal/RN, analisar o sistema de drenagem para diferentes ocupações do solo e possível adoção de medidas não estruturais que reduzam os impactos gerados pela urbanização da área.

3.2. Objetivos Específicos

3.2.1. Avaliar a condição atual da bacia em relação ao aspecto de uso e ocupação e a drenagem urbana existente.

3.2.2. Desenvolver modelo conceitual associando os escoamentos e retenções pluviais com alterações de uso e ocupação do solo.

3.2.3. Simulações de cenários de ocupação urbana e análise de sua influência do comportamento do sistema de drenagem.

3.2.4. Avaliar a viabilidade de promover medida não estrutural compatível com o crescimento urbano.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Urbanização

A urbanização é um processo no qual ocorre o aumento da população urbana em relação à população rural, decorrente das mudanças sofridas pelas cidades, resultado do desenvolvimento social, industrial e comercial. Esse processo ganhou força durante o século XX com a revolução industrial, trazendo com ela a migração da população do meio rural para as cidades em busca de oportunidades e melhoria da qualidade de vida (SPOSITO, 2000).

O Brasil, até os anos 60, era considerado um país agrícola, apresentando uma taxa de urbanização de 44,7%. Em 1980 já havia 67,6% da população vivendo nas cidades (IBGE, 1997). Esse período marca o início da urbanização no Brasil.

A urbanização ocorreu de forma rápida e intensa, resultando no surgimento de vários problemas urbanos, tais como poluição do meio ambiente, enchentes e alagamentos causados pela impermeabilização em excesso do solo e ocupação das áreas sujeitas a inundações, ocupação irregular de terrenos públicos formando as favelas com habitações insalubres e a falta de uma infraestrutura urbana.

As cidades surgem a partir do desafio de transformar a cultura de uma comunidade voltada às preocupações com a reprodução e nutrição e a uma finalidade que superasse a mera sobrevivência (MUMFORD, 2008).

Mas o crescimento exagerado resultante da explosão demográfica gerada pela migração do homem do campo para o meio urbano deu origem a construções inadequadas, bairros sem planejamento urbano e a crença de que todos os males sociais têm sua origem nas cidades (BRITO, 2002).

O desenvolvimento de uma cidade, bem como a qualidade de vida de seus moradores, são reflexos da eficiência das obras de saneamento básico existentes. Os principais sistemas de saneamento básico contemplam: os sistemas de abastecimento de água, que inclui aspectos da qualidade e da quantidade de água; o sistema de esgotamento sanitário com a coleta, tratamento e destino final dos efluentes; o sistema de coleta, transporte e destinação dos resíduos sólidos; e a infraestrutura de drenagem de águas pluviais, com áreas de infiltração e de retenção como também os elementos

estruturais de acumulação e de transporte (RIGHETTO; MOREIRA; SALES,2009).

Planejar a cidade integrando as ações de saneamento aos processos de urbanização, com educação ambiental e uma gestão pública participativa, promove o crescimento urbano com a garantia da qualidade de vida e o bem estar da população.

A constituição federal de 1988 destaca a importância do município como ente federado com autonomia financeira, administrativa e política. Dá-lhe competência para instituir e arrecadar os seus próprios tributos, organizar e prestar os serviços públicos de interesse local e capacidade para elaborar a lei orgânica e eleger os seus próprios governantes (CNM, 2013). A autonomia dada pela constituição permite aos gestores municipais a possibilidade de evitar os vários problemas urbanos encontrados nas cidades.

Com o Estatuto da Cidade, Lei 10.257 de 2001, busca-se, através de instrumentos de ordem urbana, reparar os problemas verificados no passado e que possibilitem estabelecer planos que efetivamente tenham foco na construção de cidades mais sustentáveis (PNCC, 2014).

O estatuto da cidade estabelece a obrigatoriedade do plano diretor para cidades com mais de 20 mil habitantes. Torna-se evidente a preocupação com a qualidade de vida dos moradores. Fica demonstrada a existência de planos e leis que regulamentam o meio urbano, o que falta, na verdade, é a aplicação eficiente e impassível desses regulamentos.

4.1.1 Crescimento urbano em Natal/RN

A cidade do Natal, capital do Rio Grande do Norte, teve sua ocupação urbana no início do no século XVI, nos bairros de Cidade Alta e da Ribeira. Na década de 1930, a cidade apresentou um forte crescimento, ocupando os atuais bairros de Tirol e Petrópolis, sendo estes os primeiros a apresentarem o processo de planejamento da cidade pelo Plano Urbanístico Polidrelli (MELLO, 2008).

O plano Polidrelli é um plano urbanístico simples, que define apenas novas ruas e avenidas, sem informações detalhadas sobre sua concepção (BORBA, 2007). Por outro lado, a remoção dos moradores de baixa renda das áreas de atuação do plano Polidrelli, para a criação dos novos bairros, permitiu

a formação das primeiras “favelas” de Natal, Praia do Meio e Passo da Pátria (PMN, 2009).

Em razão do início da Segunda Guerra Mundial, a cidade tem uma nova explosão de crescimento. Devido a sua posição geográfica estratégia, serviu de base para as tropas americanas que trouxeram investimentos em infraestrutura e um rápido progresso para a cidade. (FIGUEIREDO, 2011).

A partir de então, a cidade do Natal passou por intervenções urbanas e após três planos diretores, em 2007, o plano diretor urbanístico de 1994 recebe uma nova revisão (sua quarta e atual versão), com destaque para a participação popular, que permitiu o debate com a sociedade sobre as decisões a serem tomadas para o ordenamento da cidade. As maiores modificações foram em relação à Política de Habitação de Interesse Social, a Regularização Fundiária e a Questão Ambiental (RMN, 2009).

Hoje, a cidade do Natal sofre com vários problemas referentes à falta de infraestrutura urbana, devido, principalmente, ao crescente número de novas construções legais e ilegais que surgem todos os anos.

4.2 Drenagem urbana

A drenagem urbana de águas pluviais por muito tempo teve como objetivo, apenas remover o excesso das águas do escoamento superficial, resultado da impermeabilização do solo, para evitar transtornos, prejuízos e riscos de inundações (TUCCI, 2009), dessa forma, aumenta não apenas a capacidade condutora da rede, como também, a transferência do problema para outro lugar, que no futuro sofrerá uma nova intervenção, acarretando mais gastos públicos e transtornos com novas obras de engenharia.

As inundações trazem vários prejuízos à população, dentre eles, os de ordem sanitária e ambiental. Corpos hídricos receptores sofrem contaminação, impedindo que o equilíbrio natural seja restabelecido no meio aquático, em função do esgoto lançado às redes de drenagem, devido às ligações clandestinas, e a elevada quantidade de resíduos sólidos e poluentes que seguem com o escoamento superficial das águas pluviais. Durante um evento pode ocorrer um extravasamento do sistema de drenagem, favorecendo a proliferação de vetores e expondo a população às doenças de veiculação hídrica.

Partindo do exposto anteriormente, uma nova perspectiva é dada a drenagem urbana, envolvendo os cuidados com o meio ambiente e à saúde pública, e não apenas aos de ordem técnica. Desse modo, introduz-se a tomada de medidas compensatórias associadas à infraestrutura de drenagem urbana.

O manejo das águas pluviais urbanas apresentam dois sistemas clássicos de drenagem. São definidos em dois principais: microdrenagem e macrodrenagem (TUCCI, 2009).Os sistemas são formados por um conjunto de obras e dispositivos que recebem parte do escoamento superficial de áreas afetadas pela urbanização com o objetivo de evitar a ocorrência de inundações.

A microdrenagem é definida pelo traçado das ruas, por fontes de deflúvios em que não se tem um escoamento natural preciso, e o sistema de pequenas galerias, composto de condutos e coletores de águas pluviais como as bocas de lobo.

O sistema de macrodrenagem formado por canais abertos ou condutos de maiores dimensões tem a função de receber as águas pluviais dos sistemas de microdrenagem e conduzir essas águas a um corpo d'água principal com capacidade para escoar todo o deflúvio gerado pela bacia de drenagem. Este sistema é projetado para comportar precipitações maiores que as da microdrenagem.

4.3 Impacto da urbanização e o desenvolvimento sustentável da drenagem

O desenvolvimento sustentável pode ser entendido como atividades que atendam as necessidades das gerações atuais sem causar danos e por em risco à capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades (WCED, 1987), sendo esta, uma das principais definições encontradas sobre o assunto.

O conceito de sustentabilidade surge a partir do processo da política global, integrando o desenvolvimento econômico ao desenvolvimento social, para satisfazer as necessidades básicas do ser humano, e por último, ao desenvolvimento ecológico, respeitando seu ambiente e conservando seus recursos. O desenvolvimento sustentável é resultado da interseção entre os

três desenvolvimentos citados anteriormente (NEWMAN; KENWORTHY, 1999).

A intensa ocupação do solo urbano sem o planejamento integrado das infraestruturas essenciais ao desenvolvimento adequado das cidades, em função da inserção de um sistema de malha viária trazendo posteriormente uma serie de obras que proporcionaram a impermeabilização total ou parcial das calhas secundárias dos cursos d'água. Dessa forma, desencadeou o surgimento de problemas de drenagem por ocasião dos eventos hidrológicos de alta intensidade (RIGHETTO; MOREIRA; SALES,2009).

Em consequência da falta de fiscalização adequada para o cumprimento das legislações tem-se frequentemente problemas de inundações urbanas, alagamentos e enchentes que resultam em transtornos de mobilidade, perdas ambientais, materiais e até de vidas humanas. Tanto o manejo das águas pluviais quanto o controle dos impactos sofridos pela sociedade são compreendidos por dois ambientes distintos, sendo eles, a bacia de médio e grande porte com predomínio de inundações ribeirinhas e a bacia de pequeno porte prevalecendo à urbanização do solo (TUCCI; ORSINI, 2005).

O antigo conceito tradicional da drenagem urbana tinha o objetivo apenas de transportar os escoamentos superficiais de uma região para outra da forma mais eficiente possível. No entanto, esse conceito não é viável se aplicado isoladamente, havendo a necessidade de integrar-se ao meio urbano (LIMA, 2011). Deve-se incluir ao planejamento da drenagem o desenho da malha urbana e sua expansão, o zoneamento de atividades, a rede viária e de transportes, fluxos de informações e aspectos paisagísticos (POMPÊO, 2000).

Com o desenvolvimento urbano, os solos das cidades sofrem modificações devido ao uso e ocupação do mesmo pelo homem que provocam impactos à população à infraestrutura urbana e aos recursos hídricos. A remoção da cobertura vegetal natural reduz os tempos de concentração, resultando no aumento do volume escoado superficialmente, aumento do nível dos cursos d'água e diminuindo da recarga do aquífero.

Deve-se ressaltar a importância da integração do uso e ocupação do solo aos fenômenos e processos hidrológicos (POMPÊO, 2000). Considerar a bacia hidrográfica como unidade urbana principal é significativo para avaliar os impactos causados pela urbanização. O desenvolvimento sustentável

contempla a garantia de bacias hidrográficas saudáveis, ao mesmo tempo garante um futuro sustentável interagindo as mudanças da paisagem com a infraestrutura e, consequentemente, com as águas pluviais e a redução dos impactos negativos gerados por elas (PHILADELPHIA WATER DEPARTMENT, 2011).

Dando menos ênfase às obras de infraestrutura tradicionais e direcionando os investimentos às novas tecnologias com novos materiais absorventes, à criação, melhoria e aplicação adequada das legislações, da educação ambiental e da conscientização da sociedade, torna-se possível garantir o desenvolvimento sustentável.

Nesse sentido, procura-se aproximar a drenagem urbana da drenagem natural com incentivo à prática de reuso e infiltração das águas pluviais. Com práticas de gestão integradas (IMPs) e o Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (Low-Impact Development, LID), obtêm-se resultados positivos referentes a recursos financeiros e ambientais aos novos empreendimentos (SOUSA, 2005).

Aliando o controle da quantidade e da qualidade através de práticas integradas e estratégias de projeto, tem-se a intensificação da recarga subterrânea; retenção ou detenção para armazenamento permanente; controle e captura de poluentes; valorização estética da propriedade e uso múltiplo de áreas (SOUSA, 2005). Algumas práticas integradas que estão sendo testadas e implementadas, destacam-se: Telhados verdes; Pavimentos Permeáveis; Cisternas; Barris de chuva; Trincheiras de Infiltração; Valos de infiltração; Proteção natural; Poços de infiltração; Preparo do solo; Biorretenção.

O Plano Diretor de Drenagem Urbana tem por objetivo criar mecanismos de gestão da infraestrutura urbana, que estejam relacionados ao escoamento das águas pluviais e dos rios na área urbana. Por sua vez, o plano pretende evitar perdas econômicas, melhorando as condições de vida da população e preservando o meio ambiente da cidade, coerente com os princípios econômicos, sociais e ambientais definidos pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental da cidade (TUCCI, 2005).

Através do plano diretor de drenagem é possível fornecer subsídios técnicos e institucionais que permitam reduzir significativamente os impactos

das inundações no Município e criar as condições para uma gestão sustentável da infraestrutura de drenagem urbana (PDDU, 2009).

4.4 Medidas sustentáveis para o manejo das águas pluviais

Nas definições atuais para manejo de águas pluviais urbanas, adotam-se um conjunto de ações e soluções de caráter estrutural e não estrutural, que envolvem a execução de grandes e pequenas obras e de planejamento e gestão de ocupação do espaço urbano, com o uso de legislações especificas e fiscalização ativa quanto à geração dos deflúvios superficiais decorrente do uso e da ocupação do solo (RIGHETTO; MOREIRA; SALES,2009).

As ações e soluções de caráter estrutural, conhecidas por medidas estruturais, são obras de engenharia projetadas para escoar ou desviar as águas de escoamentos superficiais, reduzindo os riscos de inundações e enchentes. Já as medidas não estruturais, estão relacionadas às medidas compensatórias que envolvem o uso e ocupação do solo de forma racional, a educação ambiental e legislações adequadas que visam à redução dos impactos gerados pelas inundações urbanas.

As medidas não estruturais não incluem obras civis, e sim meios naturais para reduzir os escoamentos e cargas poluidoras. Ações de cunho social são adotadas para modificar padrões de comportamento da população (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009), permitindo a implantação dos sistemas de controle na fonte. A Tabela 1 mostra as principais categorias de controle de escoamento na fonte.

As medidas compensatórias buscam compensar ou minorar os impactos nos processos naturais do ciclo hidrológico causados pela urbanização. Existem vários modos de classificação das medidas compensatórias, dentre elas, as relacionadas ao modo de influência na geração dos escoamentos pluviais e sua localização na bacia, como mostra a Figura 1(NASCIMENTO; BABTISTA,2009).

Tabela 1. Categorias de medidas não estruturais.

Principais categorias	Medidas não estruturais
Educação pública	Educação pública e disseminação do conhecimento Equipe técnica capacitada Superfícies com vegetação
Planejamento e manejo da água	Áreas impermeáveis desconectadas Telhados verdes Urbanização de pequeno impacto
Uso de materiais e produtos químicos	Uso de produtos alternativos não poluentes Praticas de manuseio e de armazenamento adequadas
Manutenção dos dispositivos de infiltração nas vias	Varrição das ruas Coleta de resíduos sólidos Limpeza dos sistemas de filtração Manutenção das vias e dos dispositivos Manutenção dos canais e cursos d'água
Controle de conexão ilegal de esgoto	Fiscalização: detecção, retirada e multa Controle do sistema de coleta de esgoto e de tanques sépticos Medidas de prevenção contra a conexão ilegal
Reuso da água pluvial	Jardinagem e lavagem de veículos Sistema predial Fontes e lagos

(Fonte: Adaptado de RIGHETTO; MOREIRA; SALES,2009)

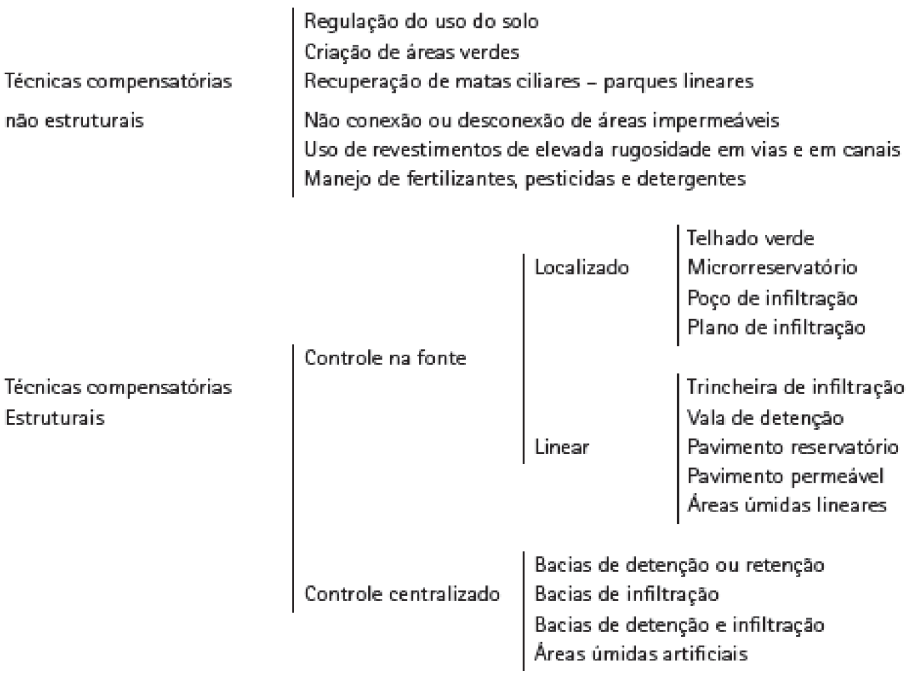


Figura 1. Tipologia de técnicas compensatórias para o manejo das águas pluviais. (Fonte: NASCIMENTO; BABTISTA, 2009).

As técnicas de controle na fonte são as principais medidas de controle localizado nos lotes, estacionamentos, parques e passeios (TUCCI, 2003). Tais medidas podem usar dispositivos que mantenham a vazão de saída do lote

com valor igual ou menor a de pré-desenvolvimento (PDDU, 2009). Os sistemas de controle na fonte objetivam preservar as condições hidrológicas da bacia pré-urbanizada, reduzindo os impactos gerados a níveis aceitáveis (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009).

Tais medidas envolvem um conjunto de regras de controle de uso e ocupação do solo que englobam quatro tipos de ações mostradas abaixo (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009):

• Planejamento e implantação de estruturas de retenção e armazenamento;

• Manutenção constante e adequada das superfícies permeáveis e impermeáveis;

• Educação ambiental e treinamento para conscientizar a população sobre os problemas ambientais, e suas relações com a água;

• Regulamentação, vigilância e mecanismos de sanções.

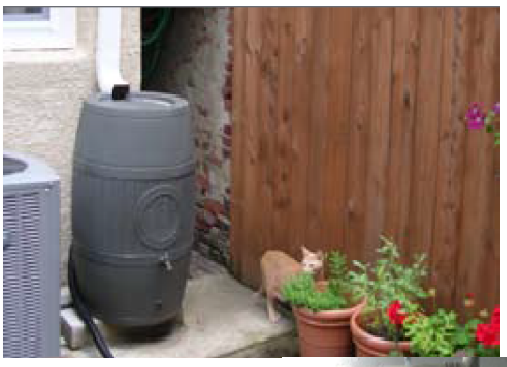
Os dispositivos usados nas técnicas de controle na fonte podem ser classificados em dispositivos de infiltração e de armazenamento.

Os dispositivos de infiltração para controle na fonte possuem a função de reter os escoamentos na fonte geradora, reduzindo os volumes direcionados à rede pública de drenagem. Estes dispositivos favorecem a recarga do aquífero, dependendo das características do solo podem promover a redução das cargas contaminantes presentes nas águas de escoamento.

Os elementos de extensão do meio fio além de promover a infiltração das águas ainda acalma o tráfego e quando localizados na faixa de pedestres oferece segurança aos mesmos, pela redução da distancia de travessia da rua (PHILADELPHIA WATER DEPARTMENT, 2011). Alguns dispositivos de infiltração podem ser classificados como: planos e valos de infiltração; pavimentos permeáveis; poços e trincheiras de infiltração; bacias de percolação; telhados verdes; extensão do meio fio com vegetação (Figura 2).

Figura 2. a)Valas de infiltração, b) Trincheira de infiltração, c) Pavimentos permeáveis, d) Telhados verdes, e)Extensão do meio fio com vegetação, f) Trincheiras de árvores para águas pluviais. (Fonte: a),b),c), RIGHETTO; MOREIRA; SALES,2009; d) DHALLA; ZIMMER, 2010; e), f)PHILADELPHIA WATER DEPARTMENT, 2011).

Já os dispositivos de armazenamento, os micro-reservatórios, são destinados a reservar a água captada para posterior utilização, tem-se os barris de chuva e cisternas (Figura 3). Os micro-reservatórios captam e armazenam as águas oriundas dos telhados das construções, podendo ser utilizadas para rega de jardins entre outros usos mais específicos.

a)  b)

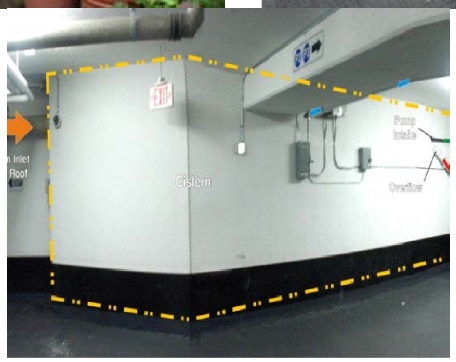
c) 

Figura 3. a)Barril de chuva, b) cisterna na UFRN, c)Cisterna de concreto integrada a garagem.(Fonte: a)PHILADELPHIA WATER DEPARTMENT,2011, b)MELO; ANDRADE NETO, 2007, c) DHALLA; ZIMMER, 2010)

As técnicas compensatórias de controle centralizado são destinadas a deter e/ ou reter as águas de escoamento gerado na bacia, de forma temporária ou não, favorecendo a infiltração ou não das águas no solo. Esses dispositivos amortecem as vazões máximas lançadas no corpo receptor, reduzindo os impactos à jusante (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009). Pode impedir inundações de áreas situadas à jusante e o assoreamento do corpo receptor, associando-se ou não a outros dispositivos, quando destinadas apenas a deter as águas. Quando permitem o armazenamento, podem promover a melhoria da qualidade da água com a renovação da mesma entre os eventos hidrológicos, a recarga do aquífero, agregando valor paisagístico e melhoria da qualidade de vida da população.

Os dispositivos de controle centralizado podem ser as bacias de detenção, retenção e infiltração (Figura 4).

a) b)

c)

Figura 4. a)Bacia de detenção, b) Bacia de retenção, c)Bacia de infiltração do colégio CEI. (Fonte: a) e b) RIGHETTO,2009; c)FIGUEIREDO,2011)

A escolha das técnicas compensatórias depende de fatores sociais, urbanísticos, ambientais e econômicos, sendo como ideal a adoção das técnicas em paralelo ao desenvolvimento do projeto urbanístico da nova área, permitindo a adequação das técnicas ao projeto urbano (NASCIMENTO; BABTISTA, 2009) .

As características físicas das áreas em que serão implantadas as medidas compensatórias, como o nível d'água do lençol freático, a topografia e a capacidade de infiltração e suporte do solo são, portanto, importantes para a devida escolha dos dispositivos. Para obras de infiltração deve-se conhecer a condutividade hidráulica do solo, sendo adequados valores entre 10^{-3} e 10^{-6} m/s e nível mínimo d'água no período chuvosa de pelo menos 1m abaixo da superfície do solo, para garantir a infiltração das águas e evitar a contaminação do lençol freático (NASCIMENTO; BABTISTA, 2009).

As medidas compensatórias de controle centralizado normalmente necessitam de grandes áreas para sua implantação. Por sua vez, podem gerar conflitos pela ocupação do solo urbano que possui valor econômico. Torna-se evidente a necessidade de adotar benfeitorias para a população por meio da criação de espaços para a prática de esportes e implantação de áreas verdes.

Áreas já urbanizadas merecem atenção especial, em razão da ocupação do subsolo pela existência de tubulações de água, esgoto, telefonia entre outros que, desse modo, limitam a implantação de algumas medidas (NASCIMENTO; BABTISTA, 2009).

A vulnerabilidade do aqüífero à contaminação é conseqüência das características naturais dos estratos que o separam da superfície da terra, nesse contexto há necessidade de se considerar o perigo de contaminação das águas subterrâneas como a interação entre a vulnerabilidade do aqüífero à contaminação e a carga contaminante, que é, será ou pode ser aplicada no meio como resultado da atividade humana (FOSTER et al. 2006). É preciso ressaltar a preocupação em manter as características iniciais da qualidade da água para as gerações futuras.

Sobre os riscos sanitários que algumas medidas podem oferecer, é preciso acentuar os esclarecimentos sobre as dificuldades operacionais que resultem em falhas de manutenção ou uso inadequado, ocasionando na paralisação da água em certas técnicas propiciando o desenvolvimento de organismos prejudiciais a saúde do homem (NASCIMENTO; BABTISTA, 2009).

4.5 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica é considerada como instrumento imprescindível tanto para a gestão das águas urbanas quanto para o manejo das águas pluviais urbanas, em virtude da realização de eventos hidrológicos intensos (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009).

Através dos modelos hidrológicos é possível simular as alternativas existentes e verificar a sua eficiência nos diferentes casos para a solução dos problemas, avaliando os impactos para riscos superiores aos do projeto (TUCCI, 2006).

Os modelos hidrológicos integram os procedimentos metodológicos de quantificação do escoamento partindo da precipitação máxima associada a uma probabilidade de ocorrência, partindo desse, os modelos hidrológico-hidráulicos podem simulam os processos de escoamento na bacia com utilidade em projeto de estruturas, na estimativa do nível de enchente ou na avaliação do impacto gerado pela urbanização sobre a drenagem urbana (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009).

Modelos computacionais possuem diversas utilidades na gestão das águas pluviais urbanas, com aplicação na fase de planejamento e detalhamento de projetos, tanto em casos de manutenção corretiva para a realização de obras complementares quanto para simulação de cenários sobre o comportamento de um sistema de drenagem submetido a certas condições de precipitação pluviométrica (CABRAL et al., 2009).

Compreender o processo de escolha dos modelos guiados pela importância de seu uso permite ao usuário compreender a importância e o potencial das ferramentas, tendo como conseqüência decidir quais e quantas soluções para a resolução dos problemas (LIMA, 2011).

4.5.1 O modelo SWMM

O modelo SWMM (Storm Water Management Model) é um modelo de armazenamento/hidrodinâmico desenvolvido pela Metcalf & Eddy Inc., Universidade da Flórida, e a Water Resource Engineers. O SWMM é considerado o mais detalhado e abrangente modelo de simulação de cenários para eventos de escoamento através de tubulações e estruturas de armazenamento/tratamento, a partir disso pode ser aplicado para períodos longos de simulação (LIMA, 2011).

Esse modelo permite simular ou estimar de forma adequada as cargas de contaminantes, ao longo do tempo de vários eventos pluviométricos, através de parâmetros de ajustes preliminares do modelo (GOMES et al.,2013).

O SWMM considera, no ciclo hidrológico, os processos de infiltração das águas pluviais nas camadas do solo não saturado e a percolação para o lençol freático. Subáreas de contribuição devem ser definidas, em permeáveis, podendo infiltrar-se no solo, e impermeáveis, divididas em outras subáreas que contenham ou não depressões de armazenamento (CABRAL et al., 2009).

A infiltração ocorre nas camadas não saturadas do solo das áreas de contribuição em direção ao aquífero. O programa oferece três modelos de infiltração a escolher, assim sendo, tem-se o modelo de Horton, o método de Green-Ampt e o método da Curva Numero (CN) (CABRAL et al., 2009).

A estrutura do SWMM é formada por módulos, dos quais cinco referem-se aos módulos de serviço, quatro ao cálculo computacional e um módulo executivo (CABRAL et al., 2009). O modulo computacional compreende o

Runnof, Transport, Extran e o modulo Storage/treatment. A entrada e tratamento dos dados são feitos pelos módulos de serviço, como os dados de precipitação e temperatura (GOMES et al.,2013).

Os dados de entrada para o funcionamento do modelo são: a precipitação pluviométrica; informações sobre as áreas de contribuição com declividade média, área, percentual permeável do solo entre outros; poços de visita contendo, por exemplo, as cotas e a profundidade; informações físicas das tubulações como diâmetro e comprimento; e por fim, dados sobre o nível do lençol freático, poços de bombeamentos etc. (CABRAL et al., 2009).

O SWMM permite escolher o modo de propagação do escoamento superficial gerado nas subáreas entre áreas permeáveis e impermeáveis de três formas:

IMPERVIOUS: O escoamento segue da área permeável para a área impermeável;

PERVIOUS: O escoamento segue da área impermeável para a área permeável;

OUTLET: O escoamento de ambas as áreas segue diretamente para o exutório da sub-bacia.

Para definir o método de propagação dos escoamentos, o SWMM adota três métodos: método do fluxo estacionário, da onda dinâmica e da onda cinemática. Segundo LIMA; RIGHETTO (2013), este método aplica a resolução da equação da continuidade juntamente com uma forma simplificada da equação do momento em cada canal e exige que a inclinação da superfície da água seja igual ao declive do conduto. o método não leva em conta os efeitos de remanso, as perdas de entrada e saída, inversão de fluxo, ou fluxo sob pressão. LIMA; RIGHETTO (2013) destacam um aspecto positivo do modelo sobre a estabilidade numérica, podendo esta ser estabelecida com intervalos de tempo moderadamente grande, da ordem de 1 a 5 minutos e que o método da onda cinemática pode ser empregado como uma boa alternativa, principalmente em se tratando de períodos longos de simulação.

A calibração e validação do modelo são executadas por um processo iterativo, que apresentam uma reconfiguração dentro do modelo de simulação de um ou mais coeficientes representativos da bacia. Nesse contexto, o

objetivo dessa mudança nos valores dos coeficientes é atingir um resultado tido como valor de parâmetro válido na atividade de calibração (RIGHETTO et al., 2009).

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Área de estudo

A área está localizada no Município do Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte (Figura 5), compreende boa parte do bairro de Lagoa Nova e uma pequena porção de Nova Descoberta. A bacia representativa é a sub-bacia 4 da bacia XII de drenagem (Rio das Lavadeiras) (Figura 6), estabelecida através do Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Natal (PDDMA).

A bacia escolhida baseou-se no fato de abranger uma área com grande densidade populacional e problemas decorrentes da intensa urbanização, além de não haver estudos realizados na área em questão.

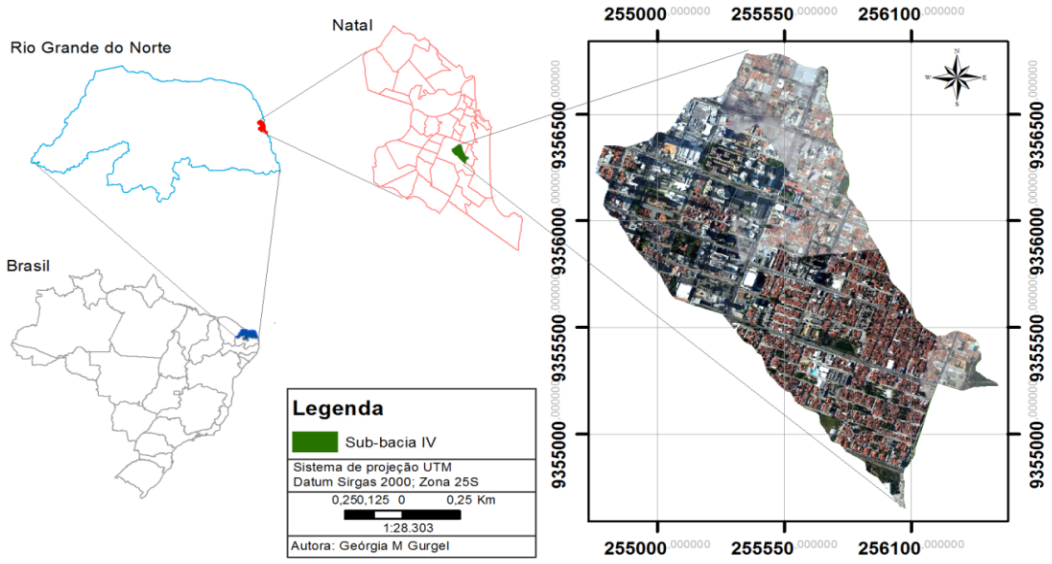


Figura 5. Localização da Sub-bacia 4. (Fonte: Arquivo da autora).

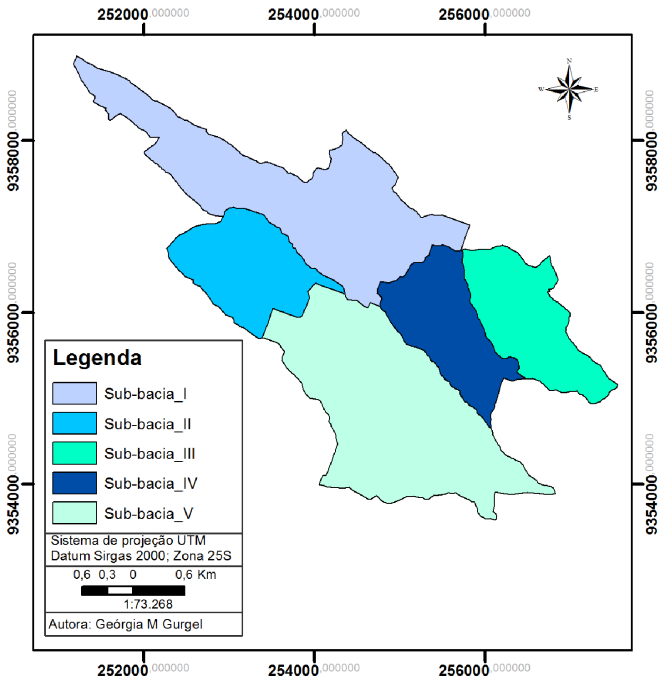


Figura 6. Bacia de drenagem XII e suas sub-bacias. (Fonte: Arquivo da autora)

5.2. Determinação das características físicas da bacia

A área apresenta solo areno argiloso com teor de argila variando de 20 a 30%, camadas argilosas impermeáveis e blocos de pedras ausentes até a profundidade de 1,2 m, com presença de camadas inferiores densificadas permeáveis. O coeficiente de deflúvio médio da bacia é de 0,53 e a taxa de infiltração no solo é de 7 mm/h (PDDMA, 2009). Para determinar as características físicas da bacia foi elaborado o mapa topográfico apresentado na Figura 7. A Tabela 2 apresenta algumas das características da bacia em estudo.

Tabela 2. Características físicas da Sub-bacia XII.4

Parâmetro	**Sub-bacia XII.4**
Área de drenagem (A)	1,54 km²
Perímetro da bacia (P)	6,34 km
Comprimento da bacia (Le)	0,603 km
Coeficiente de compacidade (Kc)	1,44
Fator de forma (Kf)	4,24
Altitude máxima	54 m
Altitude mínima	27 m
Declividade média da bacia	0,0458 m/m

Fonte: Arquivo da autora

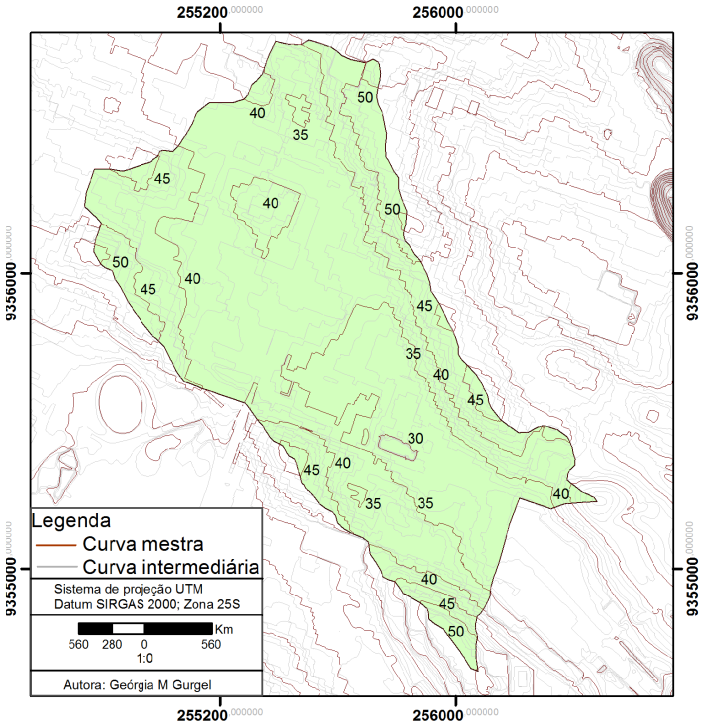


Figura 7. Mapa topográfico da sub-bacia 4 (Fonte: Arquivo da autora)

5.3. Pluviometria local

Natal encontra-se na Mesorregião Litoral Leste, com totais precipitados anuais que variam entre 800 a 1.600 mm. Os principais mecanismos produtores de chuvas nessa mesorregião são os Sistemas de Brisas associados às Ondas de Leste, com seu período chuvoso principal ocorrendo entre os meses de abril a julho. (CPRM, 2010)

O período de estiagem tem início logo após o período chuvoso principal e se estende até o início do ano seguinte, apresentando seus menores valores precipitados entre os meses de setembro a dezembro (Figura 8).

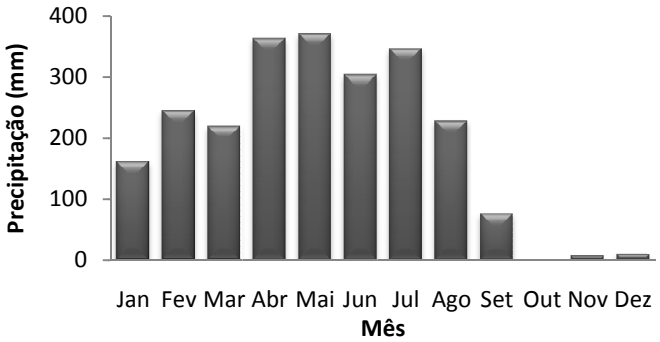


Figura 8. Precipitações médias mensais no ano de 2009 para a cidade de Natal. (Fonte: EMPARN,2015)

5.4. Caracterização da bacia

A bacia em estudo tem grande importância para o município, com a construção do complexo Arena das Dunas, para a realização de jogos da Copa do Mundo de 2014, localizado ao lado da área analisada, e demais atividades esportivas e culturais no bairro de Lagoa Nova.

Com densidades demográficas que variam de 49,36 habitantes/hectares no bairro de Lagoa Nova a 78,33 habitantes/ hectares em Nova Descoberta, a área apresenta características bem distintas sobre o uso e ocupação do solo.

A condição socioeconômica é heterogênea, visto que, no bairro de Lagoa Nova o rendimento nominal médio mensal (em salários mínimos) é de 4,05, no entanto, Nova Descoberta tem 2,07 de rendimento médio (PDDMA, 2009).

Toda a área em estudo está inserida na zona adensável com gabarito máximo para construção de até 90 metros, com exceção da porção localizada a leste pelo Parque das Dunas e a Oeste pela Av. Xavier da Silveira por estar no entorno do Parque das Dunas, considerada Zona de Proteção Ambiental (ZPA 02), com altura máxima permitida de 15 metros.

A Av. Senador Salgado Filho, principal avenida da cidade, atravessa a área em estudo e recebe praticamente todo o fluxo viário que entra na capital pela BR 101, com destaque para os moradores da região metropolitana que se deslocam diariamente para trabalhar em Natal.

A área é quase 100% coberta pelo sistema de abastecimento de água apresentando mais de 1.356 ligações à rede geral de distribuição (PDDMA, 2009). Sobre o sistema de esgotamento sanitário da região, este é insuficiente para atender as necessidades dos moradores, apresentando o uso de fossas sépticas ou outros métodos inadequados para a coleta do esgoto em mais de 50% dos domicílios particulares.

5.5. Caracterização do sistema de drenagem da bacia

O sistema de drenagem da bacia é definido como um sistema fechado e conectado a uma lagoa de infiltração (Lagoa do Preá) (Figura 9). Localizada ao sul da área, a lagoa corresponde à cota 32m cujas coordenadas são 255828 X e 9355456 Y (PDDMA,2009). Inicialmente a Lagoa do Preá foi uma depressão

natural que recebia os escoamentos das águas pluviais, passando após alguns anos a fazer parte do sistema de drenagem de Natal (SILVA, 2011).

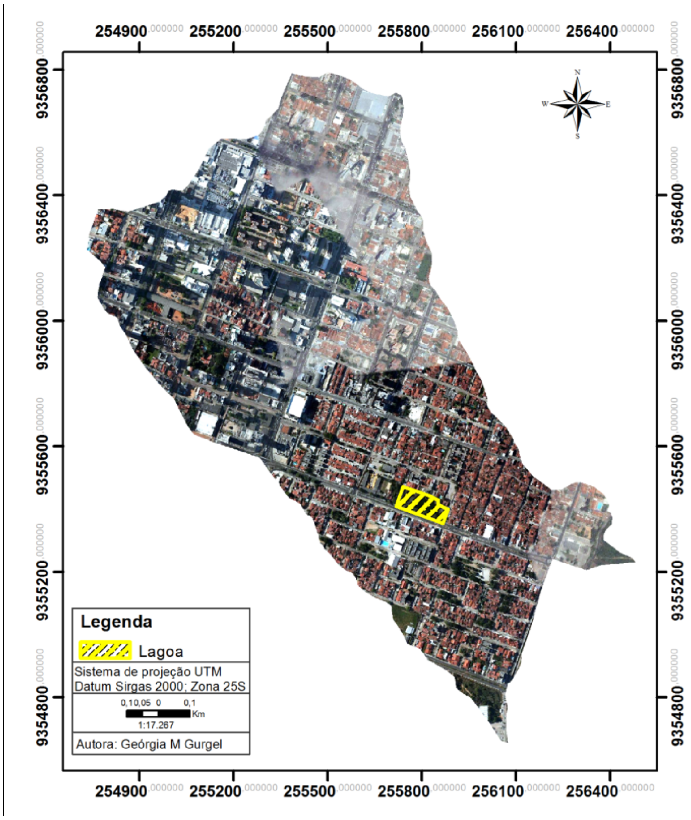


Figura 9. Lagoa do Preá. (Fonte: Arquivo da autora)

A lagoa recebe as águas pluviais através de cinco bueiros ligados a tubulações que formam uma rede de galerias com diâmetros que variam entre 0,60 a 1,50 metros. Também compreende o sistema de drenagem, os poços de visita e as bocas de lobo que estão distribuídas ao longo da rede como mostrado na Figura 10. O volume excedente da lagoa é bombeado e segue por uma adutora, sistema de macrodrenagem, com diâmetro de 0,50 metros até encontrar-se com o excedente da Lagoa dos Potiguares, e posteriormente lançados no Rio Potengi. A macrodrenagem é deficiente, apresentando um sistema de bombeamento com funcionamento relativamente precário para reduzir o tempo de inundação das lagoas (GUIMARÃES JUNIOR, RIGHETTO, 2013).

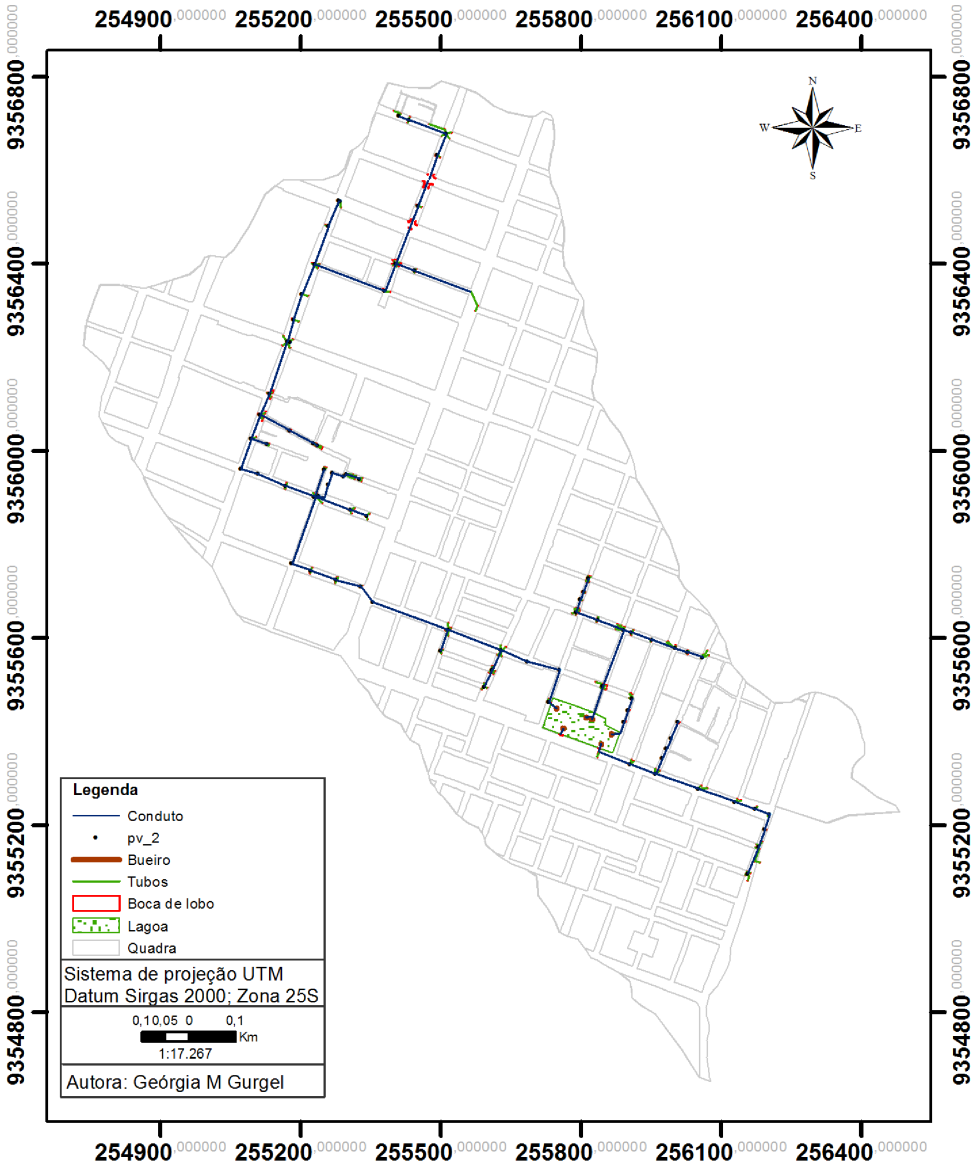


Figura 10. Sistema de drenagem da sub-bacia 4. (Fonte: Arquivo da autora).

A lagoa apresenta taludes sem revestimento adequado e fundo colmatado. Há também presença de resíduos sólidos dentro da lagoa, principalmente próximo a cerca de proteção, resultado da falta de educação ambiental dos moradores e o descaso por parte dos órgãos responsáveis pela limpeza da lagoa. Mesmo na estação seca é notória a presença de líquido na lagoa, esse fato ocorre por causa do lançamento de esgoto doméstico na rede de drenagem. Em função disso, o sistema de infiltração não atende a necessidade em casos de chuvas intensas (Figura 11). A Figura 12 mostra a situação da lagoa após cinco anos de observação.

Figura 11. Transbordamento da Lagoa do Preá em 14/06/2014. (Fonte: Globo.com, 2014)

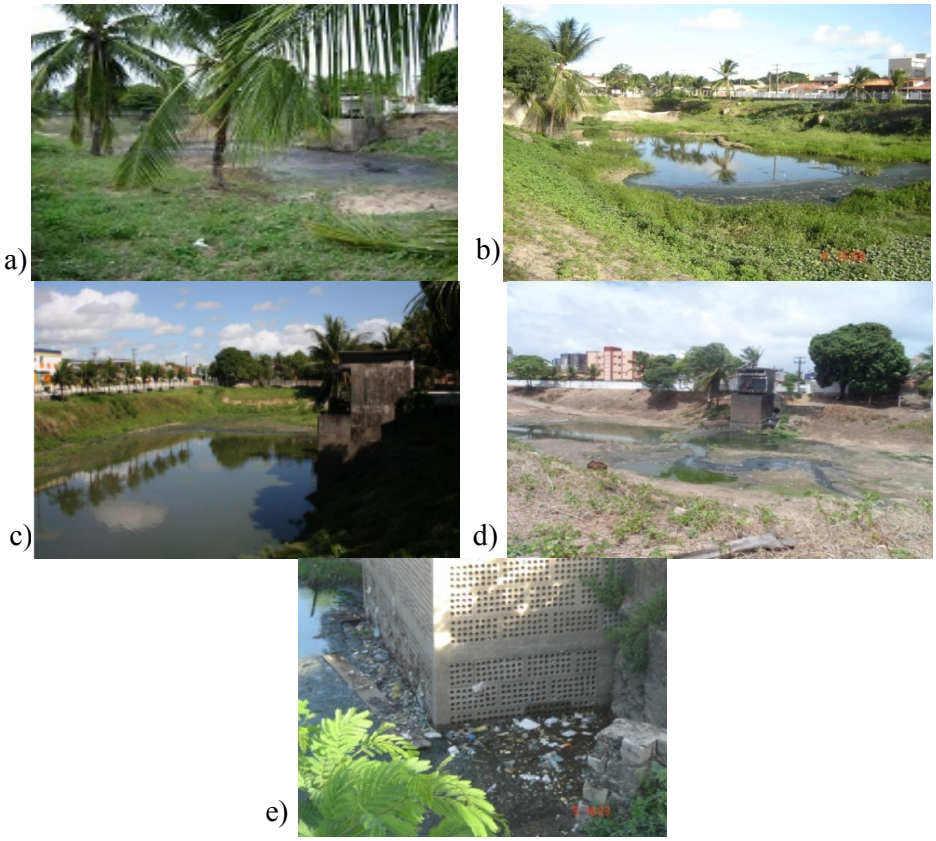


Figura 12. Visita a Lagoa do Preá nos anos de: a) 2009; b) 2010; c) 2011; d) 2014; e) 2010. (Fonte: a) PDDMA, 2009; b) FIGUEIREDO, 2010; c) SILVA, 2011; d) Foto da autora, 2014; e) FIGUEIREDO, 2010

5.6. Determinação do uso do solo para os anos de 2005 e 2014

Para a determinação do uso e ocupação do solo como também a evolução da ocupação urbana, foram analisadas duas datas com intervalo de 9 anos entre elas, sendo as datas referentes aos anos de 2005 e 2014. O ano de 2005 foi escolhido por ser a data mais antiga com qualidade de resolução do Google adequado para a determinação de suas características.

Foram escolhidos e aplicados, para a caracterização da bacia, cinco padrões de detalhamento, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Padrões de detalhamento da bacia

Padrões	Classes	Detalhamento
Residencial	Unifamiliar	Casas residenciais
	Multifamiliar	Edifícios residenciais
Comercial	Edifício comercial	Edifícios com salas comerciais
	Residência comercial	Construções com até um pavimento
Praça/quadra de esporte	-	Áreas permeáveis destinadas ao lazer da comunidade
Áreas livres	-	Áreas sem construção, públicas ou não, e lotes com até 50% de sua área permeável.
Lagoa	-	Lagoa de infiltração

Fonte: Arquivo da autora

Foram solicitados, a secretaria municipal de meio ambiente e urbanismo de Natal (SEMURB), dados digitais sobre o loteamento da área em estudo para os dois anos analisados, bem como ortofotocartas que apresentam melhores resoluções que as imagens do Google. Apesar dos diversos contatos realizados não foi possível obter os dados solicitados.

Como alternativa para solucionar a falta de dados digitais, a análise foi realizada inicialmente através do Google Earth Pro, com a delimitação das áreas referentes aos padrões citados anteriormente. Foram delimitados cerca de 750 polígonos salvos no formato KML e convertidos para shapefile no software ArcGIS da ESRI. Partindo de arquivos em AutoCAD sobre arruamento da área em estudo, obtidos no site da SEMURB, foi possível elaborar os mapas de loteamento e da rede viária de onde foram extraídas as áreas e perímetros para os dois anos estudados.

Foram realizadas visitas á área, no primeiro semestre de 2014, para a visualização *in loco* das condições atuais da bacia em relação ao uso e ocupação do solo, auxiliando na determinação dos padrões da área e identificando as áreas não edificadas e de uso público, como praças e áreas verdes.

5.7. Aplicação do modelo SWMM – Storm Water Management Model

Para a aplicação do modelo são necessários vários elementos que representam o sistema de drenagem, iniciando pela determinação das áreas de contribuição, compostas por superfícies permeáveis e impermeáveis que direcionam o escoamento superficial a um ponto de descarga. O método escolhido para a propagação do fluxo na rede de drenagem foi o método da onda cinemática.

É preciso representar os elementos que formam a rede de drenagem, como os responsáveis pela condução do escoamento entendidos pelo programa como trechos, os nós da rede, reservatórios de armazenamento entre outros. Os parâmetros hidrológicos e hidráulicos que caracterizam as áreas e os elementos de drenagem foram identificados para a realização da modelagem. Por fim, o SWMM requer a entrada de uma série de dados de precipitação que ocorrem na região estudada.

O SWMM não será calibrado em função da ausência de séries temporais de vazões na área. É detalhado a seguir o processo de identificação e caracterização de cada elemento usado para o presente estudo.

5.7.1. Discretização das subáreas

As bacias hidrográficas urbanas apresentam características heterogêneas na ocupação de sua superfície, resultante das modificações geradas por ações antrópicas. Para representar a bacia o mais próximo da realidade, sua área total é dividida em áreas menores que possuam características semelhantes entre si.

A discretização da bacia em estudo baseou-se em quatro fatores: a dimensão total da área com elevado número de quadras, limite entre as principais avenidas existentes, a topografia local e a redução no processamento de dados do modelo.

O conjunto de quadras é a unidade de estudo adotada, com o objetivo de simplificar o número de informações existente na área. A bacia foi dividida em 20 áreas menores que correspondem aos conjuntos de quadras. Cada área foi subdividida com base no método tradicional de divisão que associa a quadra a um telhado de quatro águas, considerando que, na maior parte dos casos, as

estimativas de vazões são realizadas em cruzamentos de ruas (POMPEO 2001).

As ruas também foram consideradas como subáreas na formação do escoamento. A contribuição de cada uma das 135 subáreas geradas foi direcionada a outra subárea ou aos nós da rede de drenagem situados nas vias públicas com base na topografia, na divisão das áreas e no traçado das ruas. A Figura 13 mostra a discretização da bacia, e a

Tabela **13** do anexo A apresenta a discretização das subáreas referentes aos conjuntos de quadras.

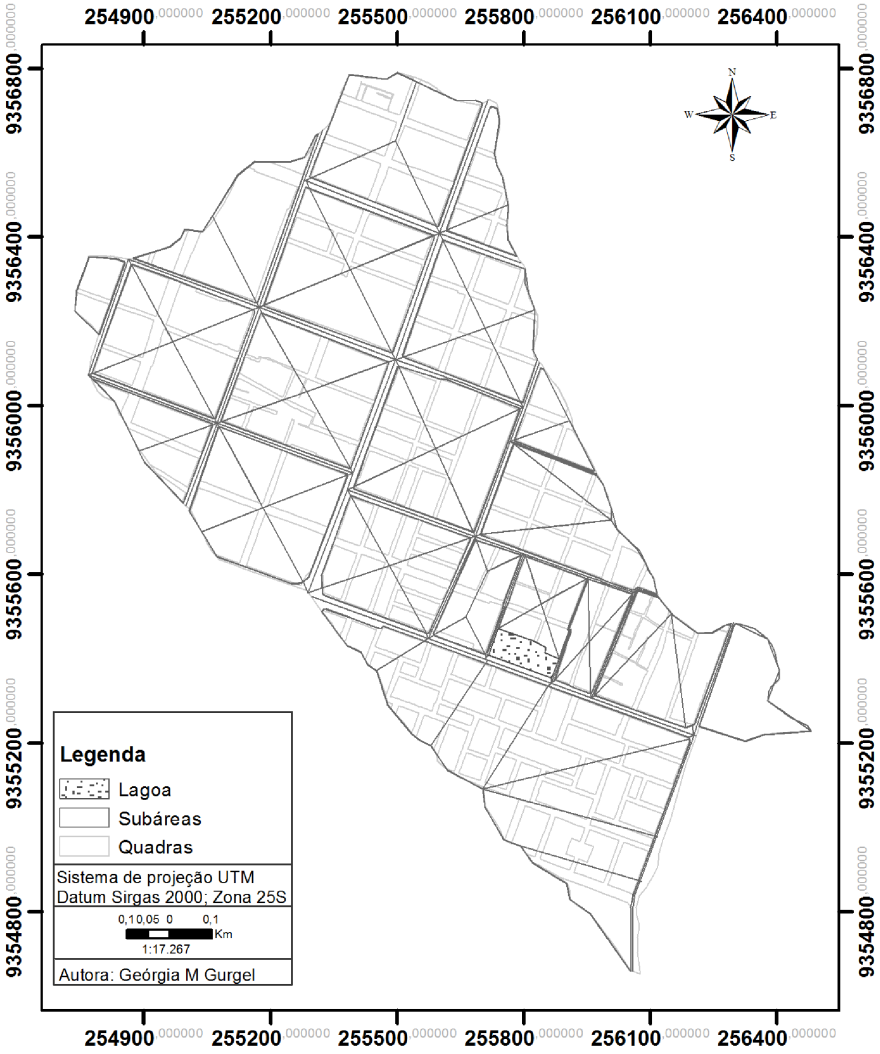


Figura 13. Discretização da bacia. (Fonte: Arquivo da autora)

5.7.2. Representação do sistema de drenagem no modelo SWMM

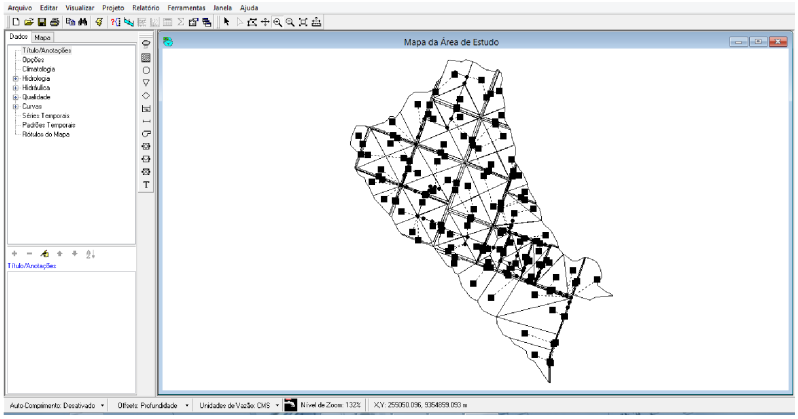
Para representar o sistema de drenagem no SWMM foi necessária à definição dos nós presentes na rede, dos elementos de condução do escoamento superficial gerado pelas subáreas e, por último, a caracterização do reservatório de armazenamento existente.

Os nós da rede de drenagem foram criados no início e fim de cada elemento de condução do escoamento e sempre que ocorre mudança de direção, declividade ou seção transversal de tais elementos. Os nós também são considerados exutórios de algumas subáreas de contribuição. Os condutos, elementos de condução do escoamento presentes no sistema de drenagem, são representados no modelo por trechos de seção circular.

Para simplificar a modelagem, apenas os condutos e os poços de visita foram considerados, sendo desconsideradas as bocas de lobo, os tubos que fazem sua ligação à rede de drenagem e os condutos que não recebem contribuição em função da divisão adotada para a área, uma vez que, estando o sistema bem dimensionado, suportará a vazão determinada pelas áreas de contribuição. A exclusão das bocas de lobo justifica-se, também, pela limitação do modelo ao permitir apenas um exutório para cada subárea.

Foram representados no modelo 69 nós de conexão e 69 trechos de seção circular. Na Figura 14 é mostrado a discretização do sistema de drenagem para a modelagem. Na tabela 14 do anexo A estão os diâmetros dos trechos apresentados no modelo.

a)



b)

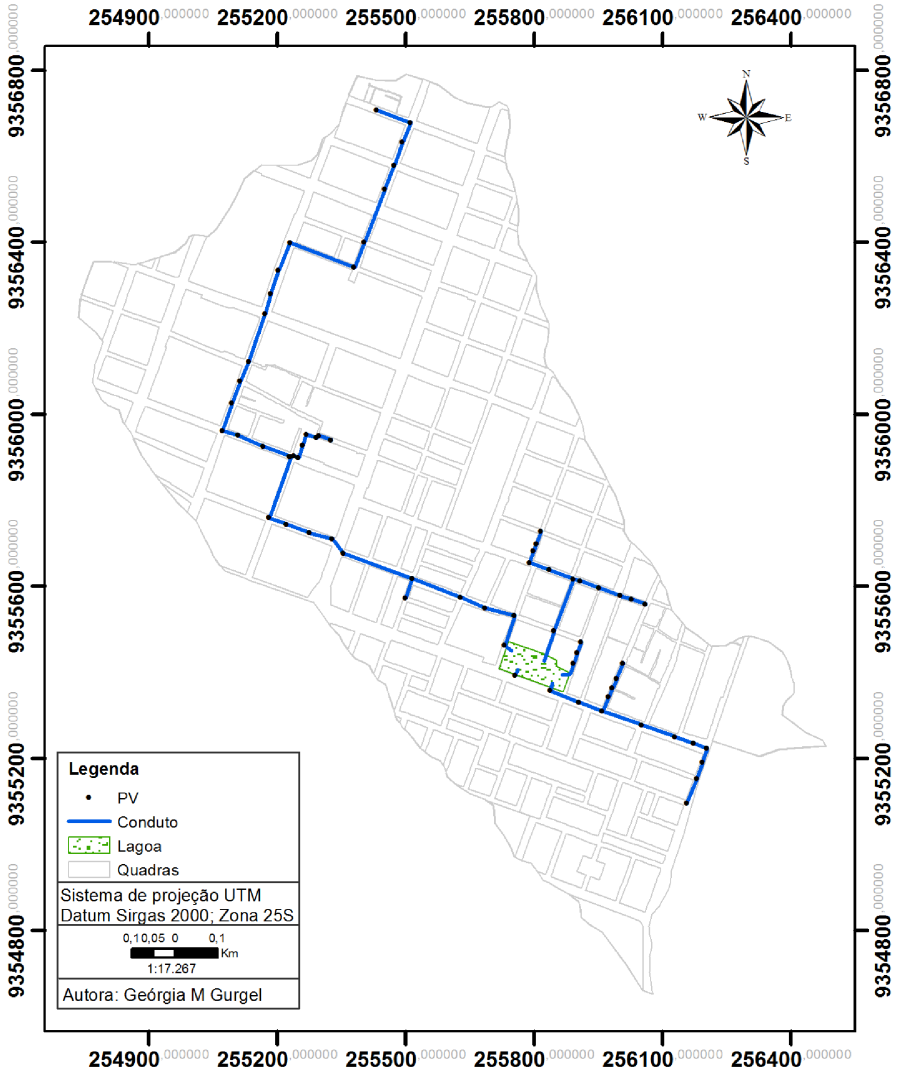


Figura 14. a) Discretização do sistema de drenagem no SWMM; b) Discretização do sistema de drenagem para o SWMM. (Fonte: Arquivo da autora)

5.7.3. Parâmetros hidrológicos

Os parâmetros hidrológicos necessários para a caracterização das subáreas no modelo SWMM estão descritos na tabela abaixo:

Tabela 4. Parâmetros hidrológicos das subáreas

Parâmetro	**Unidade**
Largura do escoamento	m
Declividade	m/m
Porcentagem de área impermeável	%
Coeficiente de rugosidade de Manning para a área impermeável	$m^{-1/3}.s$
Coeficiente de rugosidade Manning para a área permeável	$m^{-1/3}.s$
Profundidade do armazenamento nas depressões das áreas impermeáveis	mm
Profundidade do armazenamento nas depressões das áreas permeáveis	mm
Modo de propagação do escoamento entre a área permeável e impermeável	-
Porcentagem do escoamento transferido entre as áreas dentro da subárea	%
Escolha do método de infiltração e determinação dos respectivos	-

Fonte: Arquivo da autora

A largura característica do escoamento das subáreas foi determinada pelo resultado da divisão entre a área da sub-bacia e o maior comprimento de fluxo, sendo este adotado como o valor da largura do retângulo equivalente, como mostrado nas equações 1 a 3.

$$W = \frac{A}{Le} \quad (1)$$

$$Le = \frac{k_c \sqrt{A}}{1{,}12}\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1{,}128}{k_c}\right)^2}\right] \quad (2)$$

$$k_c = 0{,}282\frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

Onde:

W - Largura das sub-bacias (m);

A - Área da sub-bacia (m²);

Le - Largura do retângulo equivalente (m);

Kc - Coeficiente de compacidade;

P - Perímetro da bacia hidrográfica ou sub-bacia (m).

Foi utilizada a fórmula de Horton como modelo de infiltração, sendo seus parâmetros determinados a partir da classificação hidrológica do solo, conforme pode ser visto na tabela5.

Tabela 5. Parâmetros de infiltração por subárea.

Parâmetros da fórmula de Horton	Solo Tipo C - SCS
Taxa de infiltração inicial do solo seco: f_o (mm/h)	130
Taxa de infiltração final do solo úmido: f_c (mm/h)	7
Constante característica - k	2

Fonte: PDDMA,2009

Foram adotados para as subáreas representativas das Ruas, padrão Residencial Unifamiliar e padrão Residência Comercial os seguintes parâmetros adotados por LIMA (2011): coeficientes de rugosidade de Manning, as profundidades de armazenamento em depressões e a porcentagem de área impermeável sem armazenamento. Tais valores foram resultantes da calibração para a bacia de Mirassol, localizada a cerca de 900 m da área em estudo e por apresentar padrões de ocupação semelhantes aos da bacia analisada.

No estudo de LIMA (2011) não foram observadas áreas referentes à praça/quadra de esporte, área livres, edifício comercial e residência multifamiliar e, portanto, foram adotados os valores dos parâmetros de caracterização das subáreas de acordo com as referências dispostas no modelo de simulação. A tabela 6 fornece os parâmetros que caracterizam as subáreas para aplicação no SWMM.

Para a determinação do modo de propagação do escoamento superficial gerado nas subáreas foi adotado OUTLET para as ruas pavimentadas e calçadas visto que, em sua maior parte, o escoamento segue das ruas para o exultório. O modo PERVIOUS foi adotado para os demais padrões em função de tais subáreas apresentarem mais áreas impermeáveis que permeáveis.

Tabela 6. Parâmetros de caracterização das subáreas para o SWMM

Tipo de subárea	n imp	n perm	PA imp	PA perm	% imp	PE	%p
Ruas pavimentadas	0,07	0,2*	0,05	0,05*	90*	OUTLET	100
Ruas calçadas	0,08	0,4*	0,05	3*	90*	OUTLET	100
Residencial unifamiliar	0,05	0,4*	0,05	10*	90*	PERVIOUS	50
Residencial multifamiliar	0,01	0,13	0,05	10	90	PERVIOUS	50
Residência comercial	0,05	0,4*	0,05	10*	90*	PERVIOUS	50
Edifícios comerciais	0,01	0,13	0,05	10	90	PERVIOUS	50
Praça/quadra de esporte	0,02	0,15	0,05	0,2	90	PERVIOUS	50
Área livre	0,02	0,15	0,05	0,2	90	PERVIOUS	50

n imper - nº de manning para área impermeável ($m^{-1/3}$.s), **n perm** - nº de manning para área permeável ($m^{-1/3}$.s), **PA imp** -Profundidade de armazenamento nas depressões das áreas impermeáveis (mm), **PA perm** - Profundidade de armazenamento nas depressões das áreas permeáveis (mm), **% imp** – % de área impermeável sem armazenamento, **PE**- Modo de propagação do escoamento, **%p** - Porcentagem do escoamento transferido entre as áreas dentro da subárea.
*LIMA,2011

5.7.4. Dados hidrológicos

Na etapa de simulação hidrológica foram utilizados três eventos chuvosos escolhidos para analisar o sistema de drenagem em relação a evolução urbana ocorrida entre os anos de 2005 e 2014 e conseqüência da urbanização nos cenários analisados.

De forma iterativa foram testados vários eventos chuvosos para determinar os limites que a rede e o sistema de drenagem suportam sem gerar alagamentos para as datas de 2005 e 2014.

Evento 1: Evento chuvoso de maior intensidade no período de 2005 a 2014. Este evento apresentou uma precipitação acumulada diária de 222 mm, ocorrido no dia 15 de junho de 2014, de acordo com os dados da estação meteorológica da UFRN obtidos no site da Empresa de Pesquisa Agropecuária – EMPARN. Vale ressaltar que tal evento superou a chuva crítica, com duração de até 24 horas e período de retorno de 25 anos, estabelecida pelo PDDMA.

O SWMM não permite valores acumulados diários de precipitação, nesse caso, optou-se pelo método do terceiro quartil (Huff, 1990) para distribuir o acumulado diário de 222mm ao longo de 12 horas do dia, obtendo valor máximo precipitado de 37,74mm no instante de 07:48 h. Essa duração foi escolhida por representar o comportamento mais próximo da realidade ocorrida no dia analisado. A Figura 15 apresenta a desagregação do evento1 pelo método de Huff.

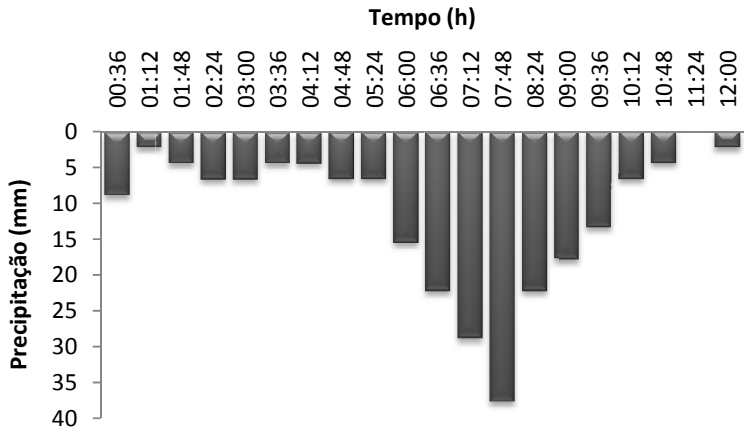


Figura 15. Gráfico da desagregação para o evento 1 pelo método de Huff. (Fonte: Arquivo da autora)

Para determinar o comportamento do sistema de drenagem em relação aos cenários simulados foram utilizados dois eventos chuvosos:

Evento 2: A precipitação acumulada diária de 14,9mm foi escolhida por ser a média do acumulado diário dos quatro meses mais chuvosos dos últimos nove anos.

Evento 3: A precipitação acumulada diária de 9,6 mm foi adotada por ser a média anual de 2015, media anual mais recente.

Os dados usados para determinar as médias analisadas foram da estação meteorológica da UFRN, obtidos no site da Empresa de Pesquisa Agropecuária – EMPARN.

Optou-se pelo método do primeiro quartil (Huff, 1990) para distribuir os valores acumulados, referentes aos eventos 2 e 3, ao longo de 50 minutos, período este, igual ao tempo de concentração da bacia estabelecido pelo PDDMA. A Figura 16 apresenta a desagregação dos eventos 2 e 3pelo método de Huff.

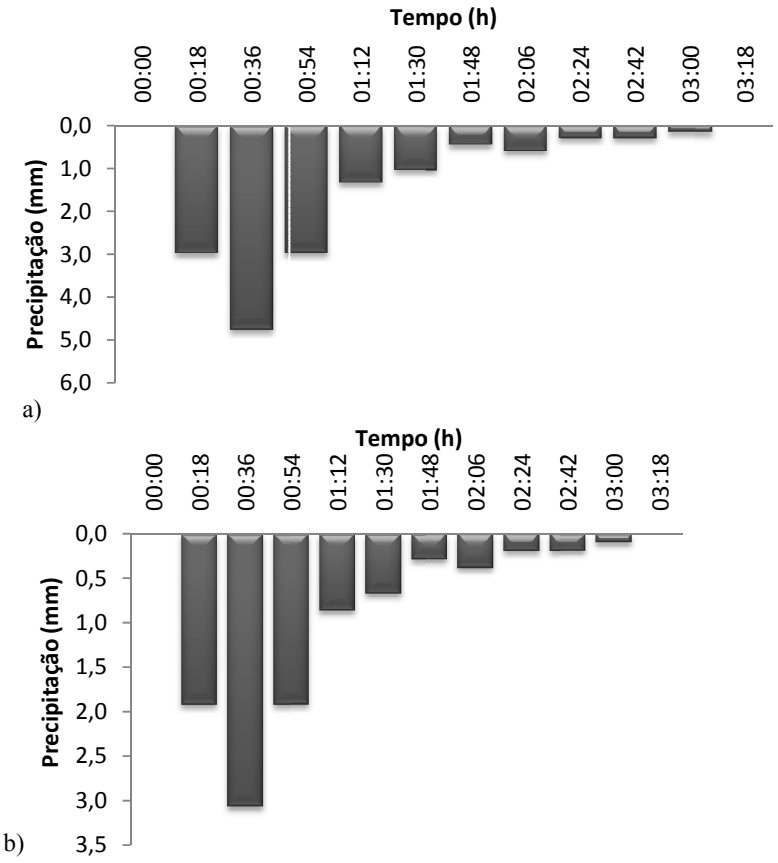


Figura 16. Gráfico da desagregação pelo método de Huff: a) Evento 2; b) Evento3. (Fonte: Arquivo da autora)

5.7.5. Parâmetros hidráulicos

Os parâmetros hidráulicos necessários à modelagem implicam na caracterização dos elementos que compõem a rede de drenagem, como os comprimentos, coeficiente de rugosidade de Manning e tipos de seção transversal para os trechos. Os nós necessitam de informações como a profundidade máxima e cota do radier. As tabelas 19 e 20 do anexo I apresentam os parâmetros hidráulicos determinados para o modelo, referentes respectivamente, aos nós e trechos. Para a lagoa existente na área é preciso fornecer a curva do reservatório com dados que relacionam profundidades as suas respectivas áreas superficiais, como mostrado na tabela 7.

Foi adotado o número de Manning igual a 0,017 por ser o mais adequado para simular as condições de funcionamento da rede de drenagem durante sua vida útil. Tal valor representa o máximo admitido para tubos de concreto com poços de visita (CANHOLI,2005).

Tabela 7. Curva do reservatório para o SWMM

Curva do reservatório	
Profundidade	**Área (m²)**
0	4189,16
3,30	5054,20
4,82	5996,26
6,29	6294,65
7,84	6884,08

Fonte: Arquivo da autora

5.8. Determinação de cenários de expansão urbana

Quatro cenários foram elaborados para avaliar as consequências da atividade humana na bacia em estudo. Os cenários foram descritos abaixo.

Cenário 1: Esse cenário consiste em testar o sistema de drenagem existente na bacia, considerando as condições de uso e ocupação do solo para o ano de 2014, considerado como cenário atual. O grau de impermeabilização para cada subárea referente aos conjuntos de quadras foi determinado a partir da caracterização realizada para a área. Para as subáreas que representam as ruas foi adotada porcentagem de impermeabilização igual a 95%.

Cenário 2: Para este cenário foi analisado o Plano Diretor de Natal, segundo a lei complementar n° 082, de 21 de Junho de 2007, que determina taxa de ocupação urbana de até 80% para as áreas que se encontram na zona adensável. Para a realização deste cenário foi adotado para o total impermeável de cada subárea referente aos lotes à taxa máxima de ocupação urbana de 80% e para as subáreas que representam as ruas foi adotado 95%.

Cenário 3: Neste cenário a bacia é avaliada para uma condição extrema de impermeabilização, ou seja, a bacia encontra-se 100% impermeabilizada. Este valor foi adotado para as subáreas que representam as ruas e os lotes.

Cenário 4: O último cenário, testa o comportamento da área em estudo com a introdução de LID (Dispositivo de Baixo Impacto). Foram adotados os pavimentos permeáveis nas principais avenidas presentes na área, visto que, recebem em sua maior parte os escoamentos dos conjuntos de quadras. Foram escolhidos por serem medidas que não dependem diretamente da população para serem realizadas e sim das autoridades competentes ou órgãos responsáveis. A Figura 17 apresenta as avenidas que receberam pavimento permeável.

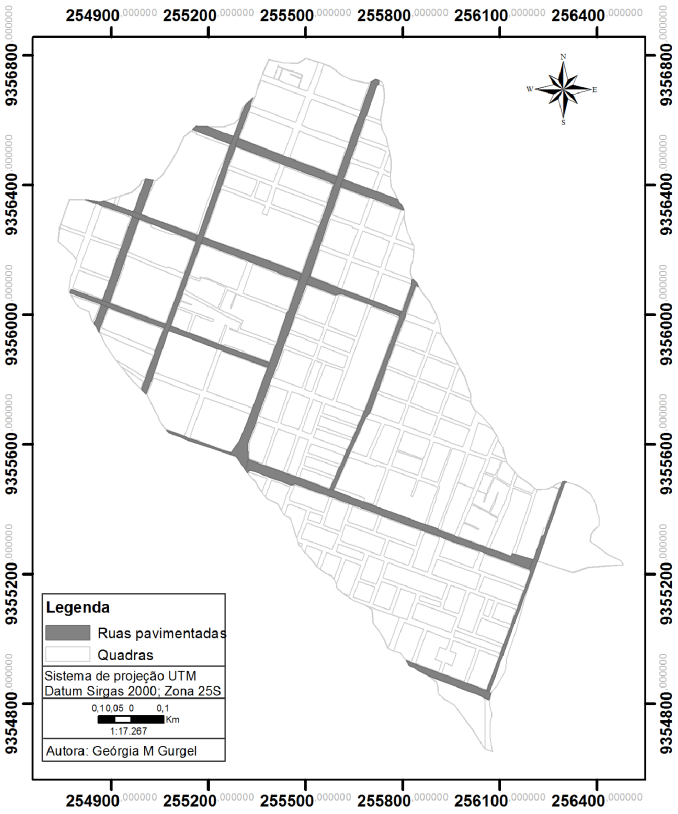


Figura 17. Avenidas com pavimento permeável para o cenário 4. (Fonte: Arquivo da autora)

5.9. Projeção da população

Maior parte da área em estudo é compreendida pelo bairro de Lagoa Nova, este bairro apresenta crescente aumento de sua população, esse crescimento populacional pode vir a causar mais impactos no futuro à área em estudo. Partindo dessa premissa, há a necessidade de se estimar a população futura para melhor compreender o comportamento da área em termos populacionais. A população foi estimada para o ano de 2025 pelo método da projeção geométrica. A partir de dados de populações anteriores para o bairro de Lagoa Nova, em intervalo de 22 anos (1991 a 2013), obtidos pela SEMURB,2013, pôde-se projetar a população para um horizonte de projeto de 12 anos. A estimativa resultante para a população foi igual a 41.284 mil habitantes para o ano de 2025. A Figura 18 apresenta a projeção populacional pelo método da projeção geométrica.

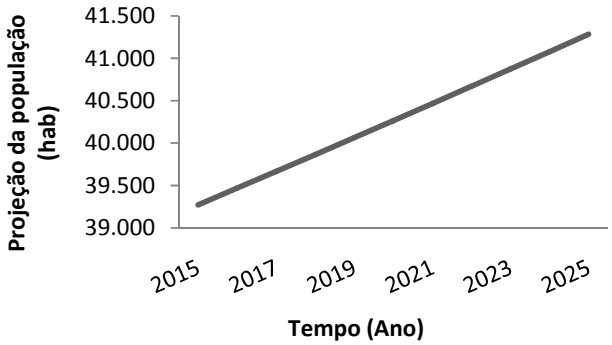


Figura 18. Gráfico da projeção populacional pelo método da projeção geométrica. (Fonte: Arquivo da autora)

5.10. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi aplicada aos principais parâmetros utilizados pelo modelo com o objetivo de verificar a influência exercida por eles no hidrograma de saída do SWMM. A análise de sensibilidade foi realizada com o suporte do Microsoft Excel para os eventos 1 e 2 no ano de 2014. A realização da análise foi efetuada variando-se um parâmetro por vez, de -90 a +90% para o evento1, e de -60 a +60% para o evento 2, enquanto os demais tiveram seus valores iniciais mantidos constantes. Os parâmetros analisados foram: coeficiente de rugosidade de Manning para as áreas impermeáveis e permeáveis, largura das subáreas e porcentagem de áreas impermeáveis. Para o valor inicial da largura das subáreas e % de áreas impermeáveis foi calculado a largura média igual a 260 m e adotado 50% respectivamente. Os valores iniciais dos coeficientes de rugosidade de Manning são aqueles mostrados anteriormente na tabela 6.

6. RESULTADOS

6.1. Uso do solo para os anos de 2005 e 2014

Foram identificadas 131 quadras contendo 2.579 lotes para o ano de 2005 e 2.094 lotes para 2014. Na área, há presença de algumas quadras de grandes dimensões onde funcionam equipamentos urbanos como o Hospital do Coração, Igreja Universal do Reino de Deus, SEBRAE-RN, Supermercado Nordestão, Ministério Público do Trabalho, Corregedoria da Justiça, Concessionárias de veículos e centros comerciais.

O solo é predominantemente impermeabilizado com 12 avenidas revestidas em asfalto e 197 ruas em paralelepípedo para o ano de 2005. Para o ano de 2014 foram 20 avenidas asfaltadas e 189 ruas em paralelepípedo.

A rede viária é formada por três rodovias arteriais, sendo elas a Av. Senador Salgado Filho, Av. Prudente de Moraes e Av. Romualdo Galvão. Essas avenidas fazem a ligação entre os bairros de Petrópolis, Tirol, Barro Vermelho, Lagoa Seca, Lagoa Nova, Candelária e Capim Macio, sendo estes, considerados bairros nobres da Capital.

A caracterização da área, em função dos padrões estabelecidos, resultou nos mapas que representam o uso e ocupação do solo para os dois anos analisados, como mostram as figuras Figura 19Figura 20.

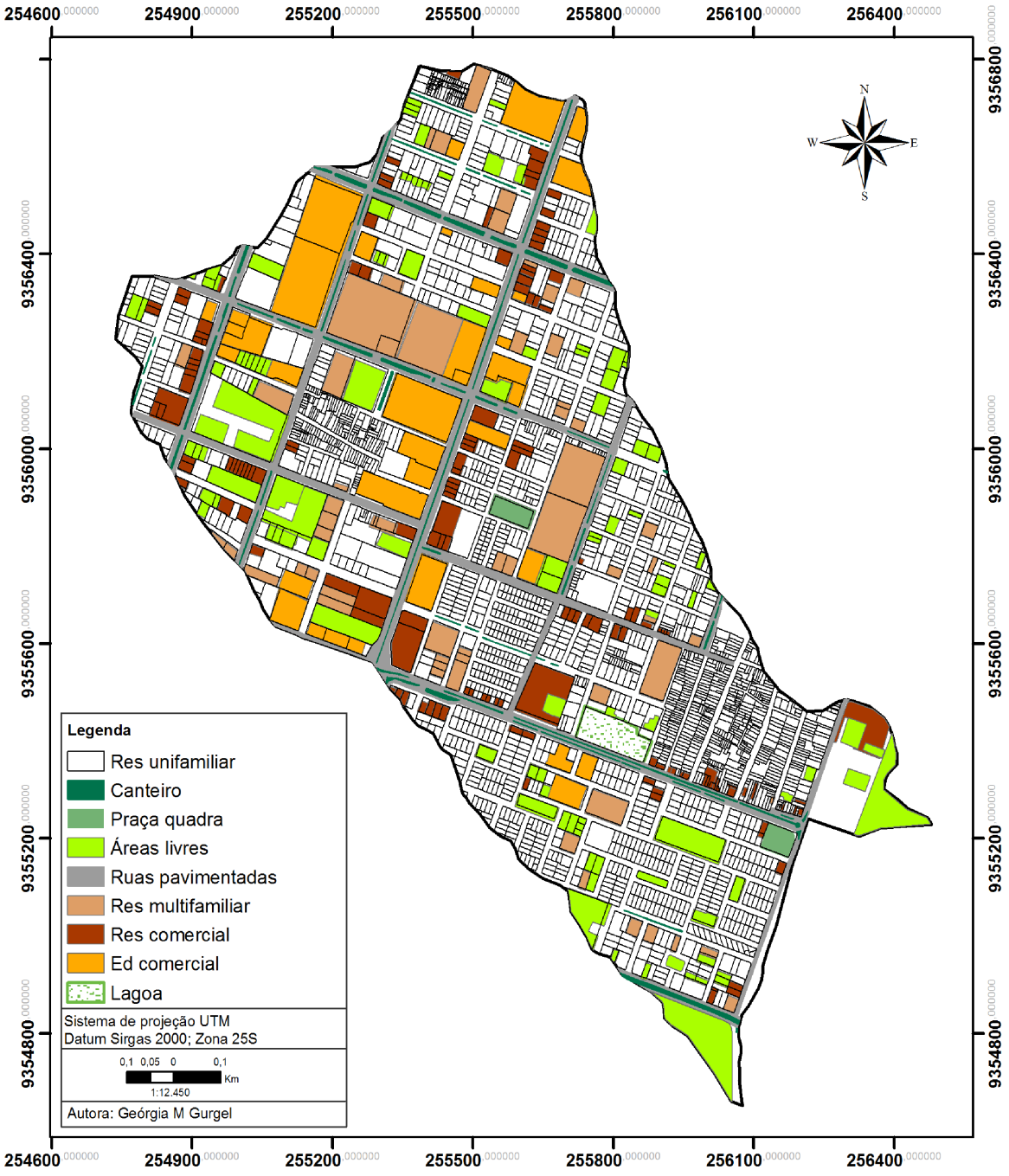


Figura 19. Uso e ocupação do solo para o ano de 2005. (Fonte: Arquivo da autora)

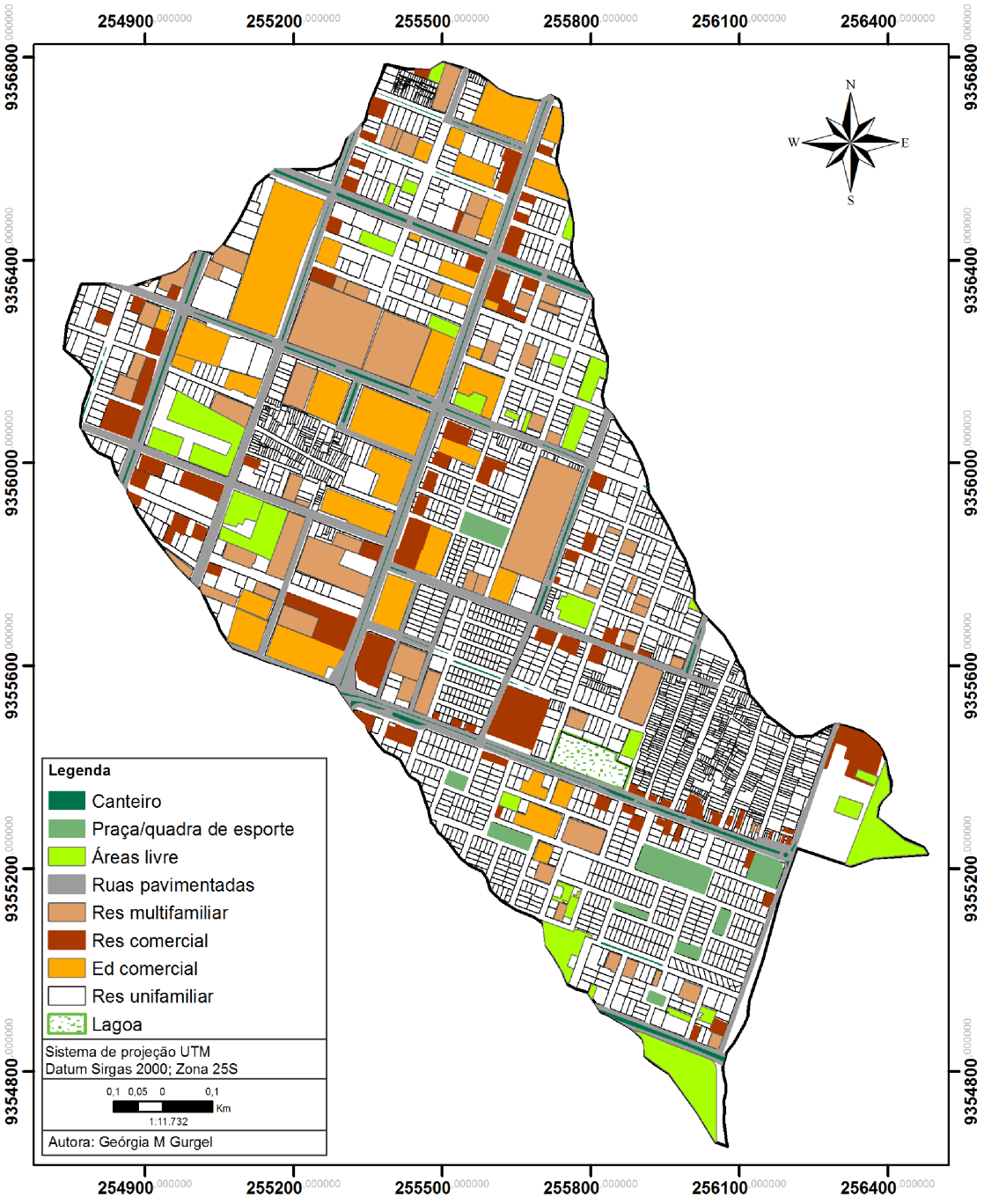


Figura 20. Uso e ocupação do solo para o ano de 2014. (Fonte: Arquivo da autora)

A tabela 8 apresenta as áreas determinadas e seu percentual por padrão de uso e ocupação do solo para os anos de 2005 e 2014.

Tabela 8. Áreas por padrão de uso e ocupação do solo nos anos de 2005 e 2014

Padrões	**2005**		**2014**		**Variação (%)**
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	
Residencial					
Unifamiliar	56,59	50,8	55,08	49,4	-1,4
Multifamiliar	13,26	11,9	15,86	14,2	2,3
Comercial					
Edifício comercial	14,29	12,8	16,99	15,2	2,4
Residência comercial	9,32	8,4	11,47	10,3	1,9
Praça/quadra de	0,77	0,7	2,41	2,2	1,5
Áreas livres	16,20	14,5	8,62	7,7	-6,8
Lagoa	1,03	0,9	1,03	0,9	0,0
Áreas impermeáveis	120,79	86,94	126,86	90,93	4,0
Áreas permeáveis	18,14	13,06	12,65	9,07	-4,0

Fonte: Arquivo da autora

Após o processo de composição da área em função dos padrões adotados, foi possível definir três regiões com padrões morfológicos e tipologias particulares, não apresentando alteração dessas características para os dois anos escolhidos. A Figura 21 apresenta as regiões descritas abaixo.

A região 1, situada a leste da bacia, compreendendo as avenidas Senador Salgado Filho, Romualdo Galvão e Prudente de Moraes, possui desenho urbano formado por quadras e lotes irregulares de grandes dimensões, podendo a quadra atingir aproximadamente 49.150,51 m² e o lote a 20.831,82 m².

A região 2, na parte central da área, apresenta um traçado reticulado de quadras e lotes retangulares com dimensões variadas. O lote padrão encontrado para essa área é cerca de 300m².

A área 3 refere-se a um pequeno trecho do bairro de Nova Descoberta, possui quadras e lotes irregulares com forte presença de vilas, travessas e predomínio de lotes com aproximadamente 200m².

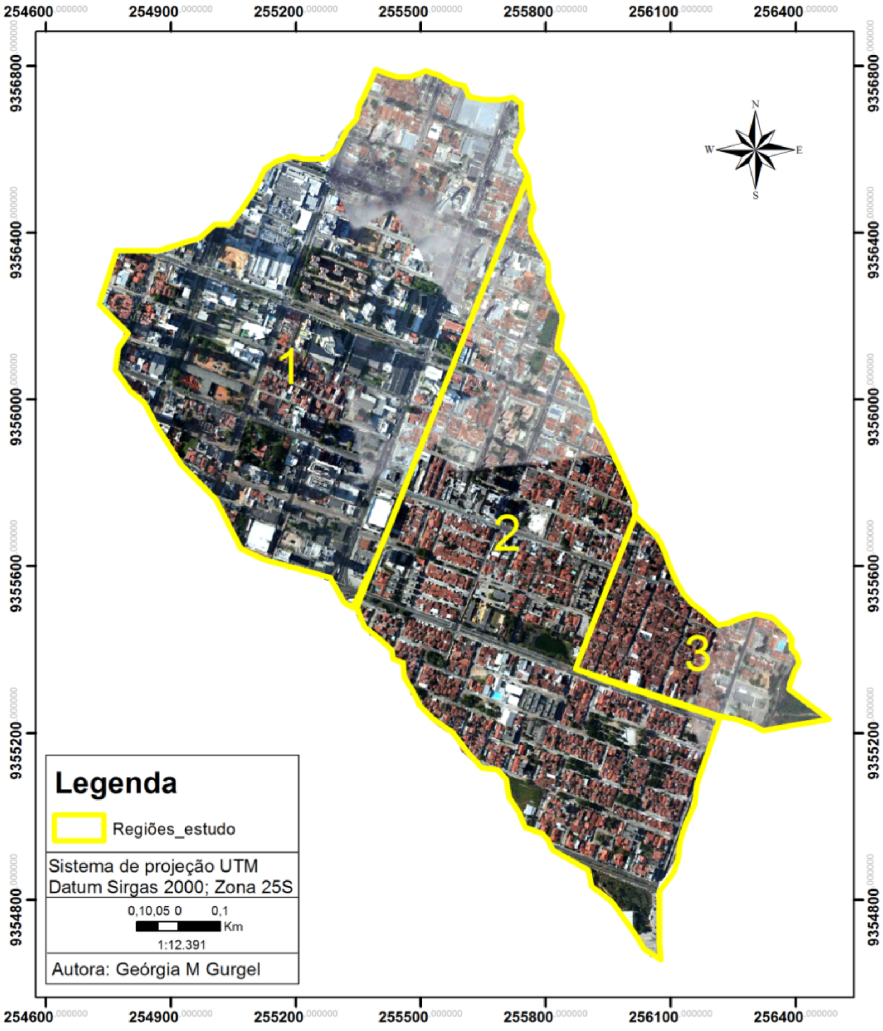


Figura 21. Regiões para análise do processo de urbanização. (Fonte: Arquivo da autora)

6.2. Resultados das simulações com SWMM para os anos de 2005 e 2014

Para os anos de 2005 e 2014, foram obtidos quatro eventos (tabela 9), sendo os eventos 4 e 6, respectivamente, os limites que a lagoa e a rede de drenagem suporta, sem transbordamento de nenhum de seus nós. Já os eventos 5 e 7 geram, respectivamente, transbordamento do primeiro nó da rede de drenagem e da lagoa de infiltração para os dois anos analisados. Os hidrogramas encontram-se na figura 29 do Anexo II.

A tabela 10 mostra os volumes de inundação gerados pela lagoa para os dois eventos analisados, nos anos de 2005 e 2014. Os hidrogramas gerados

pelo modelo SWMM apresentaram mesmos valores de pico iguais a 180 m³/s para o evento 1 aplicado aos anos de 2005 e 2014 (figura 22).

Tabela 9. Eventos obtidos para os anos 2005 e 2014

Evento	Precipitação (mm)	Duração (h)
4	8	12
5	9	12
6	17	12
7	18	12

Fonte: Arquivo da autora

Tabela 10. Volumes de inundação da lagoa para os anos 2005 e 2014

	Evento 5		Evento 1	
	2005	2014	2005	2014
Vol. Inundado da lagoa	2.172	3.446	574.011	588.427

Fonte: Arquivo da autora

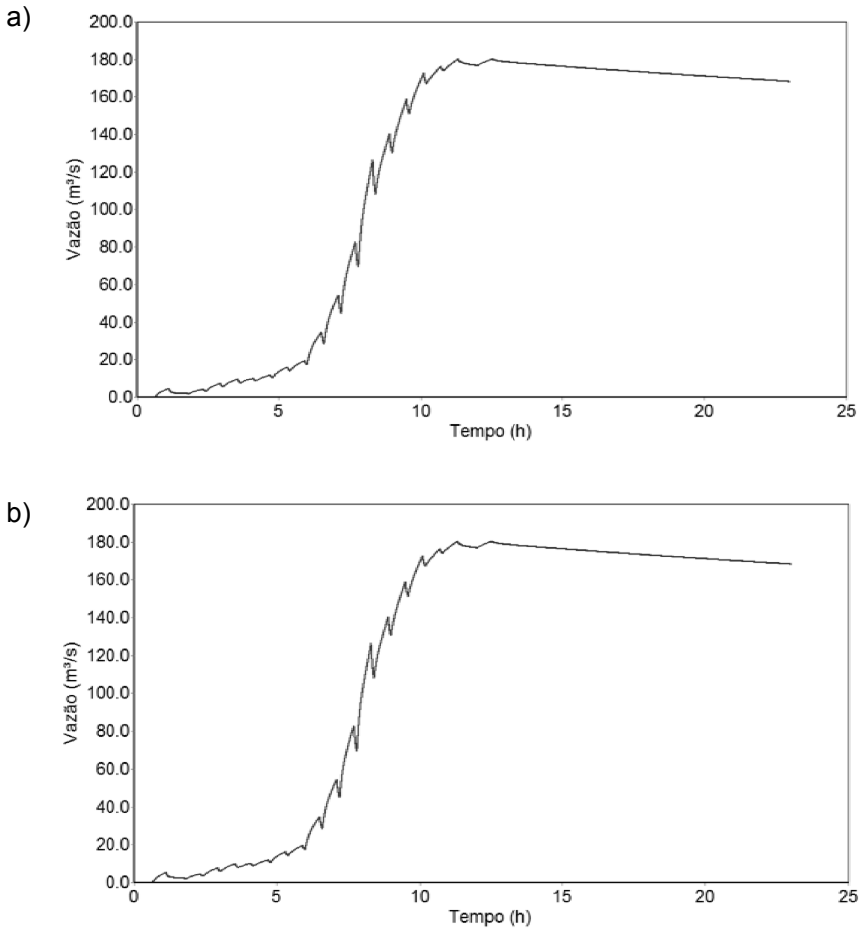


Figura 22. Hidrogramas de saída do SWMM: a) Para o ano de 2005; b) Para o ano de 2014. (Fonte: Arquivo da autora)

Foi observado que os espaçamentos entre os PVs encontram-se dentro dos limites máximos, de 60,00 m, para o caso em que a declividade está compreendida no intervalo 0,004 – 0,01 estabelecidos pelo plano diretor de drenagem de Natal e o espaçamento máximo de 180m para PVs ligados por tubulações com mais de um metro de diâmetro segundo TUCCI(1995).

Os dois anos analisados apresentaram os mesmos nós alagados, totalizando em 47 nós para o evento 1. Na figura 23 é possível identificar os PVs que apresentaram alagamento na simulação.

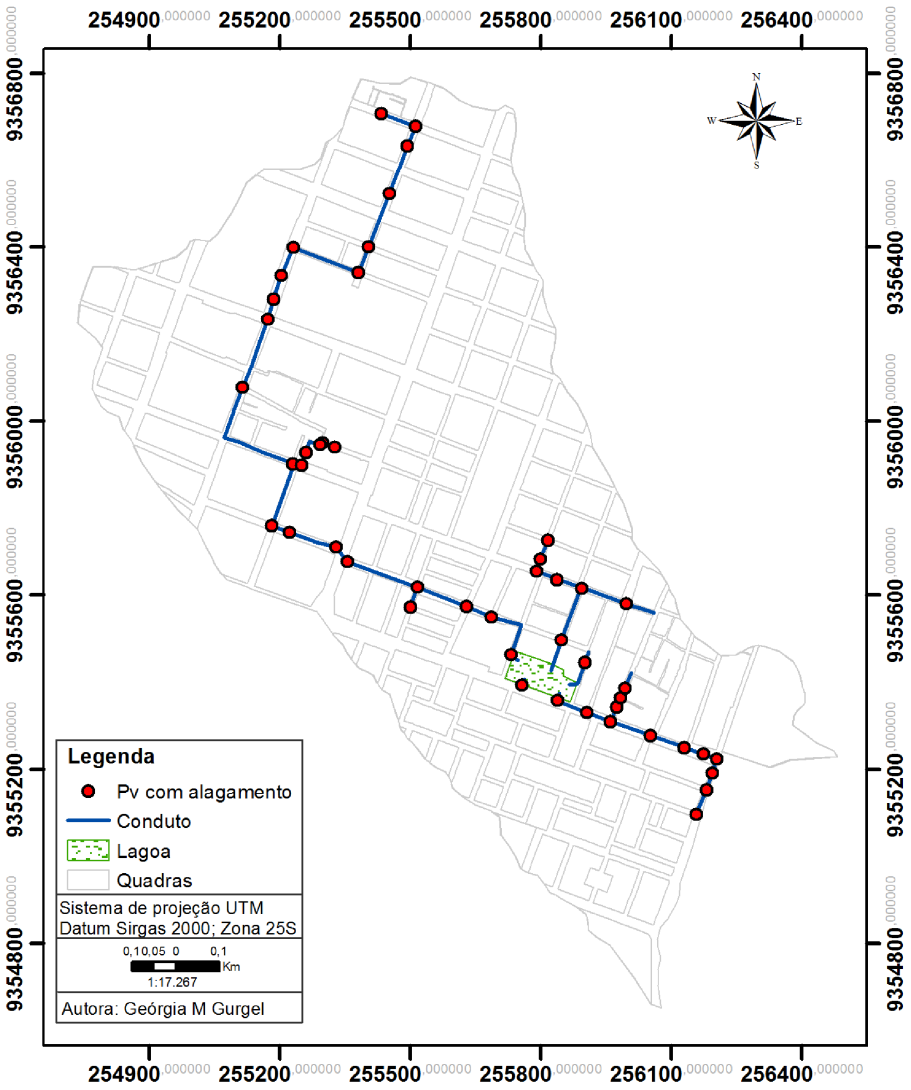


Figura 23. Nós que apresentaram alagamento na simulação para o evento . (Fonte: Arquivo da autora)

A figura 24 mostra o comportamento dos PVs através dos perfis longitudinais da linha d'água para os eventos 1 e 5 simulados para o ano de

2005. Para o ano de 2014 os PVs apresentaram comportamentos similares aos observados em 2005.

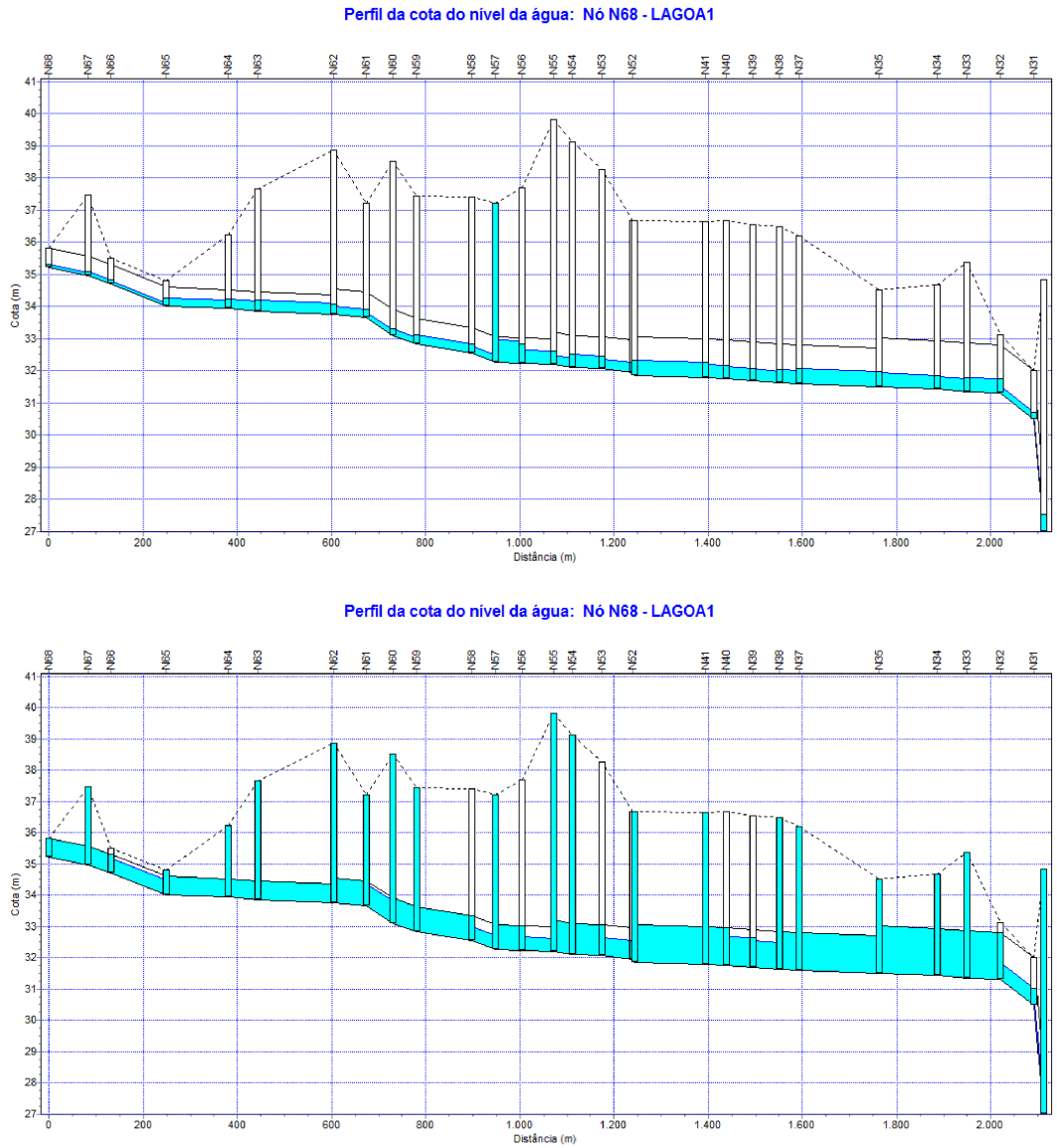


Figura 24. Perfis longitudinais gerados pelo SWMM: a) Perfil longitudinal da linha d'água para o evento 5 no ano de 2005; b) Perfil longitudinal da linha d'água para o evento 1 no ano de 2005. (Fonte: Arquivo da autora)

6.3. Resultados das simulações para os cenários de expansão urbana

As respostas hidrológicas as mudanças de precipitação e ocupação da superfície foram medidas em termos de valor de pico para a vazão gerada por cada cenário, como mostrado na tabela 11.

Tabela 11. Vazão de pico gerada pelo SWMM para cada cenário.

Evento	Total precipitado (mm)	Vazão de pico (m³/s)			
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
2	14,9	8,3	5,26	11,13	7,82
3	9,6	4,49	2,91	6,17	4,27

Fonte: Arquivo da autora

A simulação com o SWMM para cada cenário resultou na quantificação de nós que sofreram alagamento e no comportamento da lagoa para cada evento de precipitação. Na tabela 12 está discriminado o comportamento do sistema para cada cenário proposto.

Tabela 12. Dados obtidos pelo SWMM para cada cenário analisado.

	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	Evento 3	Evento 2	Evento 3	Evento 2	Evento 3	Evento 2	Evento 3	Evento 2
Armazenamento em LID (mm)	-	-	-	-	-	-	2,287	2,287
N° de nós alagados	8	18	4	10	14	22	8	14
Capacidade da lagoa(%)	34	100	38	98	48	100	10	16
Vol. máx. da lagoa (m³)	19340	42897	16263	42221	20413	42897	4367	6938
Vol. inundado da lagoa (m³)	-	2867	-	-	-	2367	-	-

Fonte: Arquivo da autora

Foi elaborado um mapa para representar os pontos críticos onde ocorreram os maiores números de alagamentos de PV e aqueles que sofreram alagamentos em comum nos quatro cenários para os dois eventos analisados, mostrado na Figura 25. Os hidrogramas gerados pelo modelo para cada cenário encontram-se nas Figura 30 e Figura 31 do Anexo II.

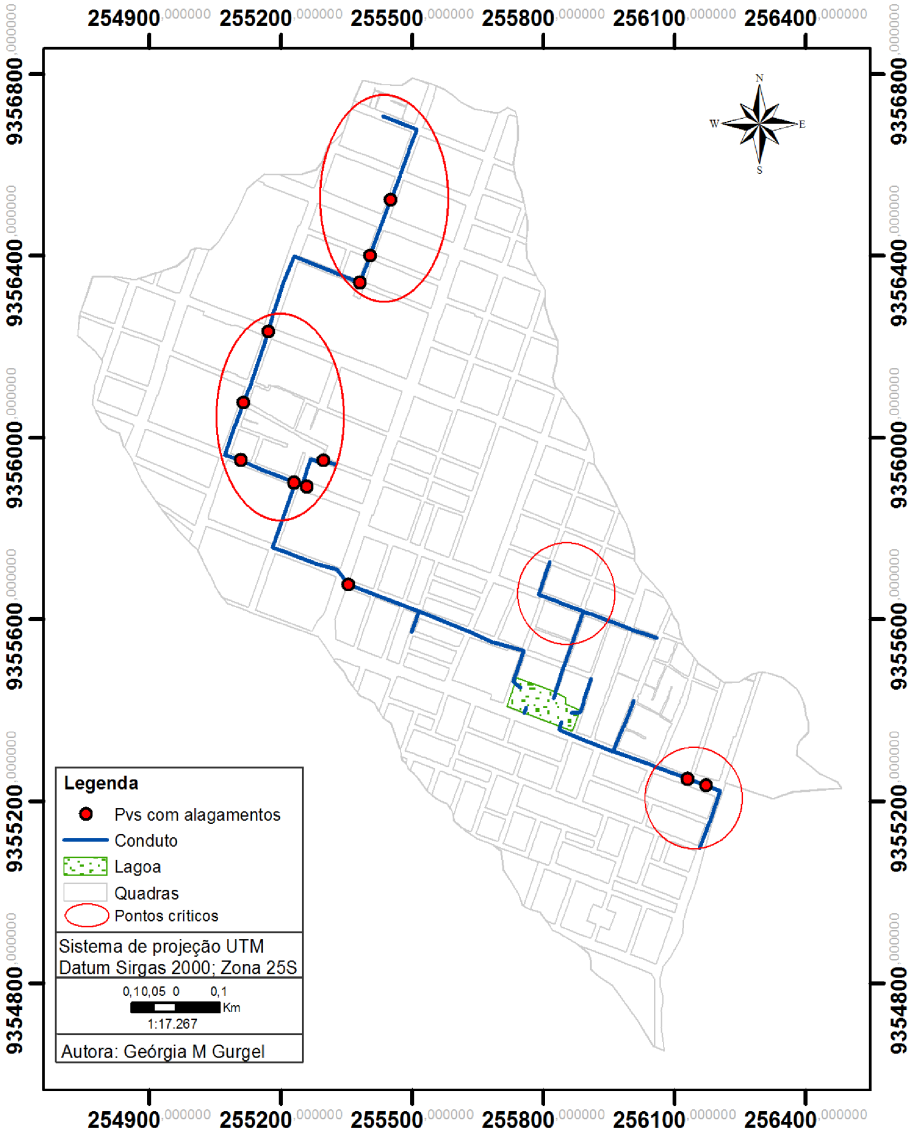


Figura 25. Mapa de pontos críticos de alagamento para os cenários propostos. (Fonte: Arquivo da autora)

6.4. Resultados da análise de sensibilidade para o evento 1

Os parâmetros que apresentaram sensibilidade sobre a vazão de pico foram: número de manning para áreas impermeáveis e permeáveis e a largura das sub-bacias. Sendo o número de manning para áreas impermeáveis o parâmetro mais sensível, chegando a alterar em 652,46 % a vazão de pico (Figura 26).

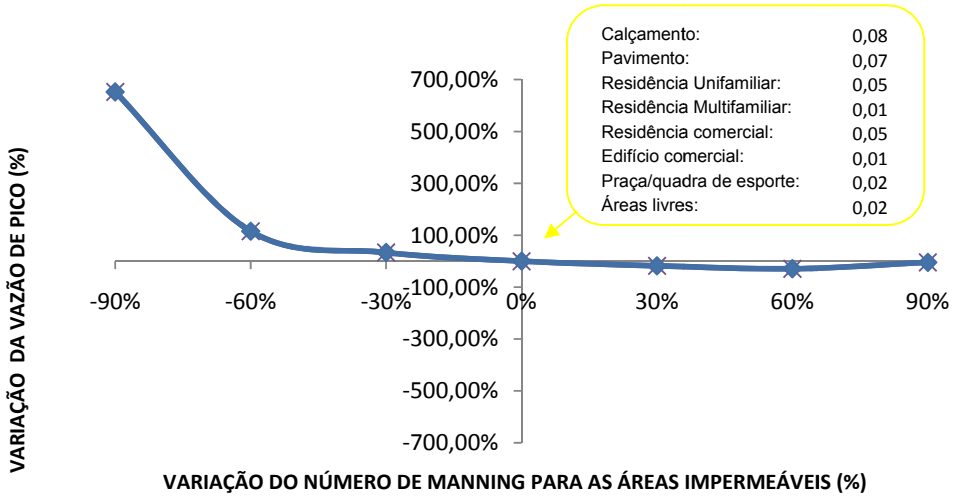


Figura 26. Influência do n° de Manning para áreas impermeáveis na vazão de pico.(Fonte: Arquivo da autora)

O número de Manning para áreas permeáveis foi o segundo maior parâmetro a apresentar influência sobre a vazão, variando em até 123,31%. A largura das sub-bacias apresentou sensibilidade de até 87,43% na vazão de pico. O parâmetro porcentagem de áreas impermeáveis não apresentou grande influência sobre a variação da vazão de pico com variação de 15,14%. A Figura 27 mostra a influência dos parâmetros na vazão de pico como variável dependente.

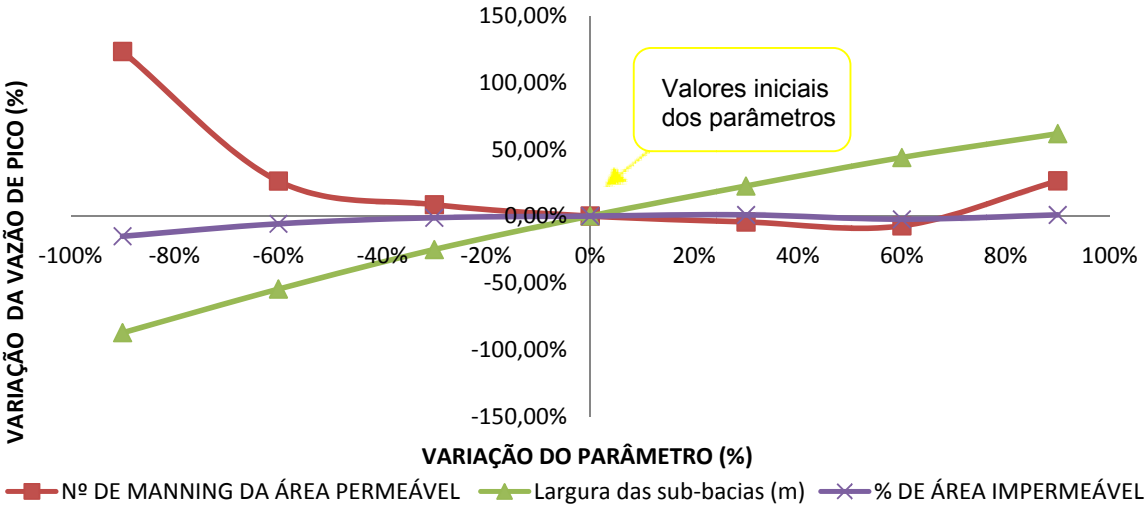


Figura 27. Influência dos parâmetros na vazão de pico. (Fonte: Arquivo da autora)

6.5. Resultados da análise de sensibilidade para o evento 2

Os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade sobre a vazão de pico foram: número de Manning para áreas impermeáveis e a largura das

subáreas, sendo o número de Manning para áreas impermeáveis o parâmetro mais sensível, chegando a alterar em 153,01 % a vazão de pico.

A largura das subáreas foi o segundo maior parâmetro a apresentar influência sobre a vazão, variando em até 55,18%, seguido pelo parâmetro que representa a porcentagem de áreas impermeáveis que apresentou sensibilidade de até 42,47% na vazão de pico. O parâmetro número de Manning para áreas permeáveis não apresentou influência significativa sobre a variação da vazão de pico, com variação máxima de apenas 12,27%. A Figura 28 mostra a influência dos parâmetros na vazão de pico como variável dependente.

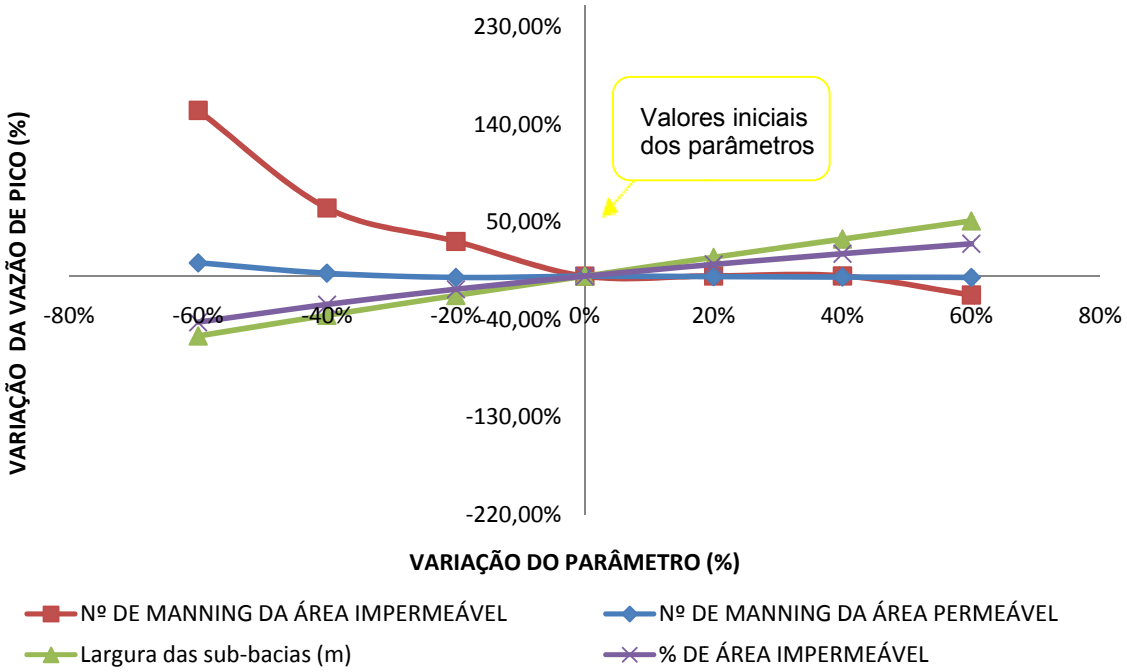


Figura 28. Influência dos parâmetros na vazão de pico. (Fonte: Arquivo da autora)

7. DISCUSSÃO

7.1. Análise do processo de urbanização

Para o ano de 2014 continua o predomínio de residências do tipo unifamiliar com crescente número de construções verticais do tipo Residencial Multifamiliar, se comparado ao ano de 2005. É observada intensa ocupação comercial e progressiva verticalização, com construções de edifícios comerciais, apresentando forte domínio da especulação imobiliária. No ano de

2005 é notória a presença de atividades econômicas as margens das principais avenidas, Av. Senador Salgado Filho, Av. Prudente de Moraes e Av. Romualdo Galvão, devido à presença de estabelecimentos comerciais e de serviços. O fato se repete no ano de 2014, com uma maior presença de edifícios comerciais e residências multifamiliares.

Além desses fatores, a área está inserida na zona adensável, tornando-a atrativa para a construção predial vertical, o que explica o aumento do número de edificações identificadas entre os anos analisados.

Não houve grandes mudanças na região ao sul da área, em relação à área construída, fato este, explicado por se tratar de uma região localizada no entorno do Parque das Dunas com controle de gabarito, no entanto, apresentou pequeno aumento no número de construções residenciais comerciais, demonstrando uma possível concentração futura do crescimento comercial e de serviços na Avenida Cel. Norton Chaves.

O padrão Áreas Livres foi o que demonstrou maior variação no período estudado, sofrendo uma redução de 53% de 2005 a 2014, o que mostra a tendência de ocupação da superfície do solo na área em decorrência da urbanização. Uma pequena parte das áreas antes consideradas como livres passam a ter utilidade para comunidade, tornando-se praças e quadras de esporte no ano de 2014.

7.2. Análise dos parâmetros obtidos nas simulações para os anos de 2005 e 2014

Os sistemas de drenagem simulados para os anos de 2005 e 2014 apresentaram comportamentos similares, com mesmos pontos de alagamento e por suportarem as mesmas chuvas limites sem transbordamento de nó. Isso pode ser explicado em decorrência da elevada ocupação da área já no ano de 2005.

A rede de drenagem apresenta - se ineficiente para os dois anos analisados. Em sua maioria, os PVs encontram-se em baixas cotas topográficas, o que favorece o recebimento de maiores volumes de escoamento gerados pelas subáreas como também o, já existente, grau de impermeabilização do solo que gera altos valores de escoamento.

É evidente que a lagoa não mais suporta eventos de baixa precipitação, atingindo a saturação de sua estrutura e ultrapassando seu volume máximo de armazenamento. Os hidrogramas do sistema, gerados pelo modelo SWMM, também não apresentam diferenças significativas para os anos analisados, não havendo variações das vazões de pico de um ano para outro, isso ocorre em função da similaridade encontrada nas características de ocupação do solo entre os dois anos.

7.3. Análise das simulações para os cenários de expansão urbana

O cenário 2 referente a taxa máxima de ocupação urbana estabelecida pelo plano diretor de Natal, apresentou melhor resultado entre os cenários propostos, com menor vazão de pico, principalmente se comparado ao cenário 1 referente ao ano de 2014, considerado atual, o que mostra o não cumprimento por parte da população do limite máximo de impermeabilização do lote.

No terceiro cenário que representa a área com 100% de impermeabilização do solo foi gerada a maior vazão de pico em comparação aos outros cenários, o que é evidente que a área não mais permite a infiltração nem oferece resistência ao escoamento superficial.

Deve-se chamar a atenção para o cenário atual, que apresenta uma pequena diferença, em termos de percentual impermeável se comparado ao cenário 3. A projeção futura da população comprova que a área apresenta crescimento populacional e, em breve, atingirá o cenário extremo de ocupação do solo, em virtude do processo de urbanização que ainda ocorre na área, agora com maior tendência a verticalização.

O quarto cenário mostrou eficiência na redução da vazão de pico e do escoamento na bacia com a adoção de LID, pavimentos permeáveis para o caso analisado. Essa redução é consequência do aumento da infiltração permitido pela área permeável referente às principais avenidas da área.

Em todos os cenários é notável a presença de pvs que apresentaram alagamento, isso pode ser explicado em relação às dimensões do PV e diâmetro das tubulações que são inferiores a capacidade real de drenagem. A lagoa apresentou inundação nos cenários atual e 100% impermeabilizado para o evento 2, sendo estes os cenários que apresentam maior ocupação de sua

superfície. O aumento da área permeável pela adoção dos pavimentos permeáveis resultou em uma redução significativa do volume armazenado na lagoa em virtude do menor volume escoado, mostrando sua eficácia na redução de alagamentos e no aumento da capacidade do sistema de drenagem.

7.4. Análise de sensibilidade para os eventos 1 e 2

Os coeficientes de rugosidade de Manning para áreas impermeáveis e permeáveis apresentaram comportamentos semelhantes, para os dois eventos, mas em escalas bem distintas. Ao reduzir os valores de tais parâmetros a vazão de pico sofre aumento de seu valor, sendo a variação causada pelo coeficiente para áreas permeáveis, no evento 2, irrelevante. O comportamento inversamente proporcional entre o coeficiente de rugosidade de Manning e a vazão é explicado em função do coeficiente ser inversamente proporcional à vazão de acordo com a equação de Manning, usada pelo SWMM para calcular o escoamento superficial.

Outro parâmetro que demonstrou sensibilidade à vazão de pico para os dois eventos testados foi a largura do escoamento das sub-bacias. A análise de sensibilidade mostrou uma relação proporcional deste parâmetro com a vazão em virtude do SWMM considerar cada subárea como um reservatório não linear e sendo a largura diretamente proporcional à área geradora de escoamento, a partir disso fica claro observar que, quanto maior for a área de contribuição maior será o escoamento gerado.

Um fato interessante observado na análise em relação à porcentagem de área impermeável foi a baixa sensibilidade encontrada deste parâmetro com a variação da vazão de pico para o evento 1. Esse fato pode ser explicado em decorrência, principalmente, da elevada precipitação analisada associada à baixa taxa de infiltração mínima do solo, fazendo com que a porcentagem de impermeabilização do solo passe a não influenciar no escoamento gerado na área.

Para o evento 2 a porcentagem de área impermeável apresentou sensibilidade com a variação da vazão de pico, mas não demonstrou o grau de influência esperado, isso permite afirmar que o sistema analisado se comporta

de maneira que outros parâmetros passam a ter maior influência sobre o escoamento.

8. CONCLUSÕES

Este estudo demonstra que os dois anos analisados encontram- se com suas áreas muito próximas do estado de saturação, em termos de porcentagem de áreas impermeáveis. Para o ano de 2005 é comprovado essa situação pela pequena diferença na porcentagem de áreas impermeáveis quando comparado a 2014, contudo, para as condições atuais, os espaços livres existentes em alguns terrenos ainda não ocupados, presente no fundo dos lotes residenciais, nas quatro praças existentes e nos canteiros funcionam como áreas de absorção das águas pluviais. O aumento no número de edifícios construídos carece atenção das autoridades competentes não apenas em relação ao sistema de drenagem existente, mas também para o aumento da densidade demográfica na área, que no futuro poderá sobrecarregar os sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário.

Com o modelo conceitual desenvolvido para associar os escoamentos e retenções pluviais da área em estudo com alterações de uso e ocupação do solo foi possível testar o sistema de drenagem existente mostrando que o mesmo é incapaz de drenar eventos de baixas precipitações sem gerar alagamentos de PVs e sem transbordamento da lagoa. Há necessidade de modificações no projeto inicial levando em conta as condições atuais de uso e ocupação da área, como também um melhor funcionamento do sistema de macrodrenagem para drenar o volume excedente da lagoa.

Torna-se evidente que o processo de urbanização que ainda ocorre na área, agora com maior tendência de verticalização, teve seu início sem o acompanhamento do sistema de drenagem, isso faz crer, que no futuro tende a piorar se houver novas precipitações elevadas, se o sistema de macrodrenagem não for eficiente e, sobre tudo, se não houver a conscientização da população da necessidade de se adotar medidas localizadas que retenham em seu próprio lote os volumes gerados pela impermeabilização do mesmo, reduzindo o volume lançado no sistema de drenagem, e dos prejuízos causados pelo lançamento de águas servidas na rede de drenagem reduzindo a capacidade de infiltração da lagoa.

O estudo demonstra que o cenário atual encontra-se muito próximo do estado de saturação, em termos de porcentagem de áreas impermeáveis, não distante de apresentar os danos resultantes de maiores alagamentos como mostrado no cenário de ocupação extrema.

Todos os cenários indicam deficiência em algum ponto do sistema de drenagem em conseqüência do alto grau de ocupação da área que supera a capacidade inicial do sistema. Com o estudo ficou claro que a adoção de medidas não estruturais são medidas eficientes na redução de alagamentos e no aumento da capacidade do sistema de drenagem, e que, aliadas a instrumentos de gestão que permitam uma urbanização ordenada são suficientes para conter os impactos gerados pelo crescimento das cidades.

Hà necessidade de uma maior fiscalização sobre as obras realizadas e já existentes na área em relação ao cumprimento dos valores máximos permitidos para a ocupação do solo estabelecidos pelo plano diretor de Natal. Seria interessante a instalação de equipamentos que permitam a calibração do modelo proposto.

9. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. M., MONTEIRO, A. M. V., CÂMARA, G. **Modelos de Simulação e Prognósticos de Mudanças de Uso do Solo Urbano: Instrumento para o Subsídio de Ações e Políticas Urbanas**, 2004.

BRASIL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Gestão de águas pluviais urbanas.** Saneamento para todos: v. 4. Brasília: Ministério das Cidades, 2006. 194 p.

BRASIL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Gestão do território e manejo das águas urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades, 2005. 270 p.

BRASIL. **Lei 10257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade)**. Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. <Disponível em:www.planalto.gov.br/ccivil/LEIS/LEIS_2001/L10257.htm>.Acesso em: 20 Outubro 2013.

BORBA, A. C. A. MEIO AMBIENTE E PLANEJAMENTO: A relação cidade-natureza nos Planos Urbanísticos da cidade de Natal no século XX. Brasil. Dissertação de mestrado, 2007, UFRN. 174 p. Natal/RN

BRITO, F.; HORTA, C, **A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas**. Cedeplar — IUSSP, 2002.

CABRAL, J.J.S.P.; MASCARENHAS, F.B.; CASTRO, M.A.H.; MIGUEZ, M.G.; PEPLAU, G.R.; BEZERRA A.A. (2009). **Modelos Computacionais para Drenagem Urbana.** In: FINEP, PROSAB. (Org.). Manejo de Águas Pluviais urbanas/Antonio Marozzi Righetto (coordenador). 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009, v. 04, cap.3.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICIPIOS (CNM). <Disponível em: http://www.cnm.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=24790:municipio-ente-federado-com-autonomia-na-constituicao-e-primo-pobre-na-vi%E2%80%A6>. Acesso em: 18 de Março de 2014.

COSTA, M. S. **Mobilidade urbana sustentável : um estudo comparativo e as bases de um sistema de gestão para Brasil e Portugal**. Dissertação de Mestrado- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

CRUZI, M. A. S.;SOUZA, C.F. & TUCCI, C. E.M.**Controle da drenagem urbana no brasil: Avanços e mecanismos para sua sustentabilidade.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2007.

CPRM. Pfaltzgraff, Pedro Augusto dos Santos. Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte / Organização Pedro Augusto dos Santos Pfaltzgraff [e] Fernanda Soares de Miranda Torres. Recife,2010.

CONTAGEM DA POPULAÇÃO, 1996. Rio de Janeiro:IBGE, 1997.v.1:Resultados relativos a Sexo da População e Situação da Unidade Domiciliar.p.23, tabela 6

DHALLA, S.; ZIMMER, C. **Low impact development stormwater management: planning and design guide.** Ontário: Toronto and Region Conservation/Credit Valley Conservation, 2010. 300 p.

DELANEZE, M. E.; RIEDEL, P. S.; MARQUES, M. L.; FERREIRA, M. V.; BENTZ, C.M. **Modelagem espacial utilizando autômato celular aplicada à avaliação das mudanças do uso e cobertura da terra no entorno da faixa de dutos Rio de Janeiro** – Belo Horizonte. In: Anais XVSimpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, 2011. Anais, 5909-5916.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO RN (EMPARN). Meteorologia: monitoramento pluviométrico:acumulado de chuvas no ano de 2014. Disponível em: <http://www.emparn.rn.gov.br>. Acesso em: 10 agosto 2015.

FERREIRA, Ângela Lúcia (Cord). **Uma cidade sã e bela: a trajetória do saneamento de Natal (1850 a 1969)**. Natal: IAB/RN; CREA/RN, 2008.

FIGUEIREDO, L.M. **Análise da salubridade do meio urbano com base na utilização de índices ambientais: aplicação na baciade drenagem xii da cidade do natal/rn**, Brasil. Dissertação de mestrado, 2011, UFRN. 97 p. Natal/RN

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.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA. R. C. A.; GOMES, D. C.; D'ELIA, M.; PARIS, M. – **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais.** Banco Mundial / Servmar. 2006.

GUIMARÃES JUNIOR, J. A., RIGHETTO, A. M. – "**Drenagem de bacias fechadas da cidade de Natal**"(Palestra). VI CONFERÊNCIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO. AGÊNCIA REGULADORA DOS SERVIÇOS DE SANEMAMENTO BÁSICO DO MUNICÍPIO DO NATAL – ARSBAN, Dezembro,2013.

HUFF,F. A. **Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois**. Illinois State Water Survey Champaign.1990.18p

GOMES, K. F.; RIGHETTO, A. M.; LIMA, R. R. M.; FREITAS, F. R. S. **DIFFUSE POLLUTION SIMULATION IN A CLOSED URBAN DRAINAGE**. , p. 1–8. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) – **IBGE Cidades: Natal/RN**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 Outubro 2013.

LIMA, R. R. M. **Estudo de manejo de águas pluviais urbanas na cidade Natal-rio**

grande do norte. Brasil. Dissertação de mestrado, 2011, UFRN. 191 p. Natal/RN

LIMA, R. R. M.; RIGHETTO, A.M. **Introdução ao SWMM**. Engenharia de águas urbanas/Marco Aurélio Holanda de Castro, Luisa Fernanda Ribeiro Reis e Antonio Marozzi Righetto (coordenadores). Fortaleza: Expressão Gráfica Editora, 2013, cap. 1.

MARIN, M.C.F.C.; ROSÁRIO, C.S.; RAMOS, F.A.; TAMAROZI, R.**Planejamento do Sistema de Drenagem Urbana: Concepção Ideal versus Prática do Poder Público.** In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.1999, Belo Horizonte - MG:05/99-CD-ROM.

MELLO, Erick de Santana. **Mobilidade urbana sustentável em projetos estruturantes: analise urbanística e ambiental do corredor de transporte da Avenida Bernardo Vieira** Dissertação de mestrado 2008, UFRN. 123f. Natal/RN.

MUMFORD, L. **A cidade na história: suas origens, transformações e perspectivas.** São Paulo:Martins Fontes, 2008.

PDDMA. PLANO DIRETOR DE DRENAGEM E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS – NATAL/RN. **Diagnóstico do Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da cidade do Natal**. Estudos Hidrogeológicos: segundo relatório, 2009.

POMPÊO, C. A.**Drenagem Urbana Sustentável.** Revista Brasileira dos Recursos Hídricos/ABRH, v. 5, n. 1, Porto Alegre, 2000, p. 15 – 23.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Lei Complementar no 082** - **Dispõe sobre o Plano Diretor de Natal e dá outras providências,** 2009, Natal/ RN

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Relatório Ambiental Simplificado (RAS)**: Estádio Arena das Dunas e Áreas de estacionamento. Secretaria Municipal de Planejamento, Fazenda e Tecnologia. Fundação Para o Desenvolvimento Sustentável da Terra Potiguar. Natal, 2009.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Relatório de Impacto no Trafego Urbano (RITUR):** Estádio Arena das Dunas e Áreas de estacionamento. Secretaria Municipal de Planejamento, Fazenda e Tecnologia. Fundação Para o Desenvolvimento Sustentável da Terra Potiguar. Natal, 2009.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Anuário 2010**. Secretaria Municipal de MeioAmbiente e Urbanismo. Departamento de Informação, Pesquisa e Estatística. Natal,2010.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Anuário 2013**. Secretaria Municipal de MeioAmbiente e Urbanismo. Departamento de Informação, Pesquisa e Estatística. Natal,2013.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Instrumentos do ordenamento urbano de Natal**. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo. Departamento de Informação, Pesquisa e Estatística. Natal, 2009.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Bairros de Natal**. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo. Departamento de Informação, Pesquisa e Estatística. Natal, 2010.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DO NATAL. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB). **Ordenamento Urbano de Natal: do Plano Polidrelli ao Plano Diretor 2007**. Natal: Departamento de Informação, Pesquisa e Estatística, 2007.

PRICEWATERHOUSECOOPERS. **Projeto Natal 2014**: Plano Executivo. Natal 2014: é do Brasil, é do mundo. Natal, abril, 2009.

REZENDE, S. C; HELLER, L. **O saneamento no Brasil: políticas e interfaces.** 2. Ed. Ver. e ampl. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2008.

RIGHETTO, A.M.; MOREIRA, L.F.F.; SALES, T.E.A. (2009). **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. In: FINEP, PROSAB. (Org.). Manejo de Águas Pluviais Urbanas/Antonio Marozzi Righetto (coordenador). 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009, v. 04, cap. 1.

RIGHETTO, A. M.; ANDRADE NETO, C. O.; BRITO, L. P.; SALES, T. E. A. de;

MEDEIROS, V. M. A.; FERREIRA, L. C. A.; LIMA, R. R. M., (2009). **Estudo Qualiquantitativo de Manejo de Águas Pluviais em Área de Drenagem Piloto na Cidade deNatal-RN**. In: FINEP, PROSAB. (Org.). Manejo de Águas Pluviais Urbanas/Antonio Marozzi Righetto (coordenador). 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009, v. 04, cap. 6.

RIGHETTO, A. M.**Hidrologia e recursos hídricos**. Departamento de Hidráulica e Saneamento. São Carlos: Editora da EESC/USP,1998, 840 p.

ROCHA, J., SOUSA, P. M. & TENEDÓRIO, J. A. **Geosimulação e análise espacial: redes neuronais e autómatos celulares na previsão de alterações nos padrões de uso e ocupação do solo**. Inforgeo. 2001, Lisboa, Edições Colibri.

ROY, G. G.; SNICKARS F. Citylife: A study of cellular automata in urban dynamics. **Spatial Analytical Perspectives on GIS.** M. Fisher, London, Taylor & Francis, 1996.

SANTOS, M. **A urbanização brasileira.** São Paulo: Edusp, 2005.

SILVA, E. A. **Cenários da Expansão Urbana na Área Metropolitana de Lisboa.** Revista de Estudos Regionais - Região Lisboa e Vale do Tejo,2002,5**,** 23 - 41.

SOUZA, C.F. 2005. **Mecanismos técnico-institucionais para a sustentabilidade da drenagem urbana**.Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre. 174p.

SILVA, S. T. B. **Uso urbano não potável de água de lagoas do sistema de drenagem de natal.** Brasil. Dissertação de mestrado, 2011, UFRN. 126 p. Natal/RN

SPOSITO, Maria Encarnação Beltrão. **Capitalismo e urbanização**. São Paulo: Contexto, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**/ Carlos E. M.Tucci – Ministério das Cidades – Global Water Partnership - Wolrd Bank – Unesco 2005.

TUCCI, C. E. M (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2002. 943 p.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. (Org.). Águas urbanas. In: **Inundações urbanas na América do Sul.** 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 11-44.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. **Controle do impacto da urbanização** In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L; BARROS, M.T. Drenagem Urbana. Porto Alegre. Editora da Universidade. 1995.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. **Drenagem Urbana: Coleção ABRH de Recursos Hídrico**. 5.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1995,428p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1ª ed., Editora da Universidade, 1998, 669 p.

TUCCI, C.E.M. Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Gestão de águas pluviais urbanas** / Tucci, Carlos E.M. – Brasília :Ministério das Cidades, 2006. 194p.(Saneamento para Todos; 4º volume).

WHITE, R.; ENGELEN, G.; ULJEE, I.; LAVALLE, C.; EHRLICH, D. Developing an urban land use simulator for European cities. In: **Proccedings** of the Fifth EC GIS Workshop: GIS of Tomorrow. European Commission Joint Research Centre, 2000.

ANEXO I

Tabela 13. Discretização das subáreas para os conjuntos de quadras

Subárea	Área (ha)	Largura da subárea (m)	Declividade (%)	Subárea	Área (ha)	Largura da subárea (m)	Declividade (%)
1	2,62	389,00	9,64	**34**	3,30	401,23	4,84
2	4,15	392,03	5,86	**35**	3,21	314,18	5,29
3	5,20	474,18	2,61	**36**	0,99	272,14	4,55
4	5,11	463,00	2,04	**37**	0,95	185,83	5,84
5	4,25	257,66	3,00	**38**	1,01	172,68	5,93
6	3,60	193,07	5,20	**39**	2,42	288,87	2,53
7	1,43	233,91	6,47	**40**	2,49	279,25	4,42
8	3,73	336,51	5,09	**41**	2,31	283,59	0,87
9	1,79	292,55	8,71	**42**	2,37	282,18	3,18
10	2,80	282,66	5,19	**43**	2,14	257,20	4,06
11	1,39	264,13	5,17	**44**	2,19	294,88	3,91
12	0,67	233,31	4,47	**45**	2,32	261,35	1,51
13	0,77	153,14	7,33	**46**	2,21	296,65	0,86
14	0,68	232,29	2,44	**47**	2,20	257,55	2,96
15	0,51	125,21	1,18	**48**	2,16	282,71	2,92
16	0,81	189,44	4,45	**49**	2,17	260,10	5,57
17	0,73	149,59	4,84	**50**	2,10	281,84	5,00
18	0,70	167,12	2,06	**51**	1,31	159,25	4,67
19	0,70	170,36	1,10	**52**	1,46	204,20	6,08
20	1,26	221,14	1,34	**53**	2,29	232,46	5,37
21	0,34	105,91	2,42	**54**	2,42	275,41	4,08
22	1,06	217,99	1,14	**55**	1,99	274,38	5,17
23	0,44	120,41	1,85	**56**	2,40	277,39	3,80
24	1,91	236,82	1,30	**57**	2,31	292,25	2,87
25	1,92	275,74	1,16	**58**	2,54	281,01	2,94
26	1,68	214,69	1,96	**59**	2,46	299,75	5,88
27	1,69	241,83	2,01	**60**	4,04	402,96	1,05
28	2,23	256,61	0,73	**61**	2,27	314,60	3,00
29	2,37	299,13	1,32	**62**	0,85	184,18	6,22
30	2,17	221,48	3,58	**63**	1,86	297,04	4,14
31	2,19	223,59	4,12	**64**	3,72	303,16	7,25
32	1,46	198,49	4,67	**65**	3,34	280,24	8,48
33	1,74	287,63	3,83	**66**	2,44	295,59	5,42

Fonte: Arquivo da autora

Tabela 14. Diâmetros dos trechos adotados

nº Conduto	Diâmetro (m)	nº Conduto	Diâmetro (m)	nº Conduto	Diâmetro (m)	nº Conduto	Diâmetro (m)
1	0,60	**18**	0,80	**35**	1,50	**52**	1,00
2	0,80	**19**	0,60	**36**	0,60	**53**	1,00
3	0,80	**20**	0,60	**37**	1,20	**54**	1,00
4	0,80	**21**	0,60	**38**	1,20	**55**	1,00
5	0,80	**22**	0,60	**39**	1,20	**56**	0,80
6	0,80	**23**	0,60	**40**	1,20	**57**	0,80
7	0,80	**24**	0,80	**41**	1,20	**58**	0,80
8	0,80	**25**	0,60	**42**	1,20	**59**	0,80
9	0,80	**26**	0,60	**43**	0,60	**60**	0,80
10	0,80	**27**	0,60	**44**	0,60	**61**	0,80
11	0,60	**28**	0,60	**45**	0,60	**62**	0,80
12	0,60	**29**	0,60	**46**	0,80	**63**	0,60
13	0,60	**30**	0,80	**47**	0,80	**64**	0,60
14	0,60	**31**	1,50	**48**	0,80	**65**	0,60
15	0,80	**32**	1,50	**49**	0,80	**66**	0,60
16	0,80	**33**	1,50	**50**	0,80	**67**	0,60
17	0,80	**34**	1,50	**51**	0,80	**68**	0,60
						69	0,60

Fonte: Arquivo da autora

Tabela 15. Parâmetros hidráulicos para os nós de conexão no SWMM

Nº Nó	Cota do radier (m)	Prof. Máx. (m)	Nº Nó	Cota do radier (m)	Prof. Máx. (m)
1	29,07	2,02	**41**	33,91	2,75
2	29,00	1,64	**42**	33,61	3,05
3	29,00	1,51	**43**	36,25	1,35
4	29,00	1,62	**44**	35,14	1,56
5	28,96	1,68	**45**	35,37	1,65
6	30,23	1,77	**46**	34,55	1,60
7	30,59	1,85	**47**	34,12	1,95
8	30,83	1,93	**48**	34,48	2,10
9	30,26	2,04	**49**	34,30	2,30
10	30,05	1,00	**50**	34,21	2,45
11	34,25	1,75	**51**	34,41	2,25
12	31,35	1,65	**52**	34,91	1,75
13	30,85	1,85	**53**	39,95	3,95
14	30,28	1,85	**54**	38,50	4,50
15	31,31	1,30	**55**	39,80	5,10
16	31,05	1,55	**56**	32,49	5,20
17	31,15	1,85	**57**	32,25	4,95
18	31,58	1,85	**58**	32,54	4,86
19	42,89	1,41	**59**	32,82	4,60
20	41,98	1,52	**60**	33,10	5,40
21	38,40	1,65	**61**	33,25	5,25
22	35,92	1,89	**62**	34,30	4,55
23	32,70	2,10	**63**	34,12	3,50
24	29,49	4,30	**64**	34,03	2,20
25	31,08	1,30	**65**	32,70	1,90
26	30,92	1,38	**66**	34,70	0,80
27	30,93	1,45	**67**	39,06	0,60
28	30,89	1,51	**68**	34,30	1,20
29	31,04	1,76	**69**	32,39	0,00
30	28,66	2,40			
31	30,50	1,50			
32	31,31	1,80			
33	32,96	2,40			
34	32,80	2,30			
35	34,51	2,10			
36	32,90	1,60			
37	33,36	2,90			
38	33,23	3,25			
39	33,40	3,10			
40	33,70	2,90			

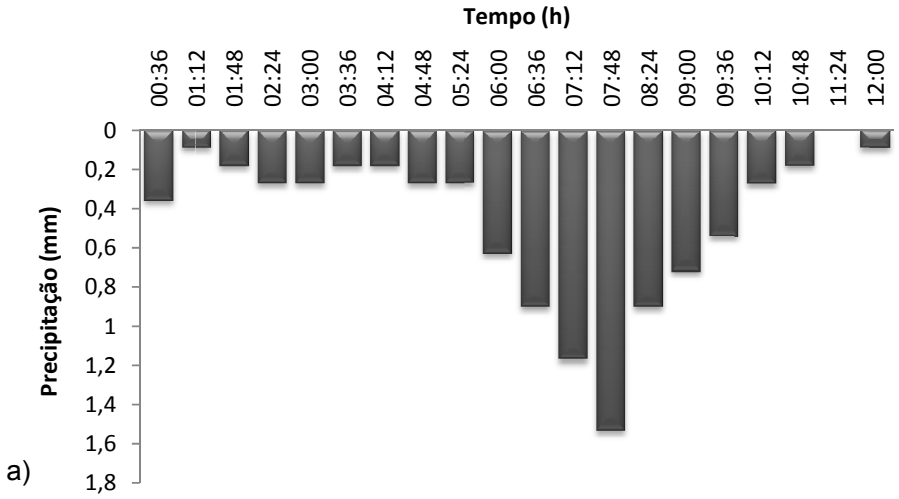
Fonte: Arquivo da autora

Tabela 16. Parâmetros hidráulicos para os trechos no SWMM

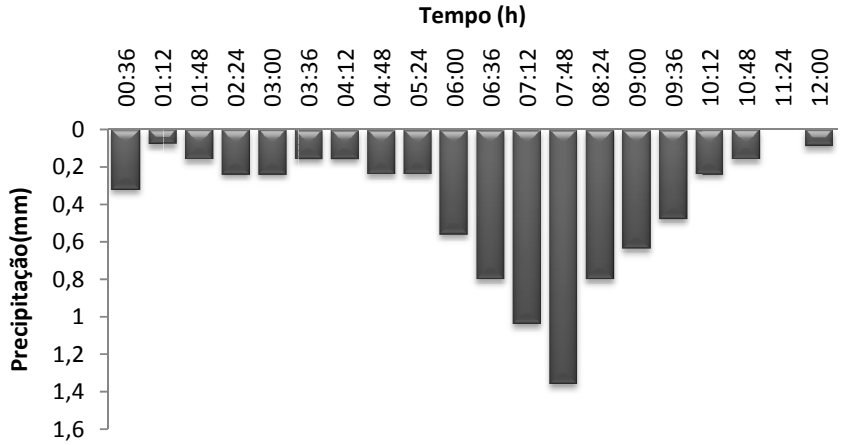
Nº Conduto	Comprimento (m)	Nº Conduto	Comprimento (m)	Nº Conduto	Comprimento (m)
1	61,60	**24**	400,00	**47**	25,52
2	39,62	**25**	31,10	**48**	26,97
3	39,49	**26**	17,92	**49**	29,83
4	33,68	**27**	28,04	**50**	11,75
5	45,42	**28**	400,00	**51**	6,67
6	83,35	**29**	59,63	**52**	3,03
7	96,78	**30**	72,98	**53**	64,62
8	57,83	**31**	21,35	**54**	24,28
9	71,93	**32**	400,00	**55**	38,72
10	9,86	**33**	71,32	**56**	68,22
11	38,47	**34**	62,97	**57**	55,12
12	24,45	**35**	122,00	**58**	49,98
13	22,28	**36**	48,68	**59**	117,25
14	36,57	**37**	171,46	**60**	49,85
15	25,63	**38**	41,56	**61**	57,23
16	26,04	**39**	55,07	**62**	68,72
17	25,53	**40**	58,16	**63**	161,08
18	19,19	**41**	43,49	**64**	63,62
19	34,48	**42**	151,14	**65**	131,35
20	28,03	**43**	38,56	**66**	117,26
21	52,65	**44**	78,99	**67**	47,71
22	46,37	**45**	30,11	**68**	84,62
23	18,84	**46**	7,96	**69**	13,36

Fonte: Arquivo da autora

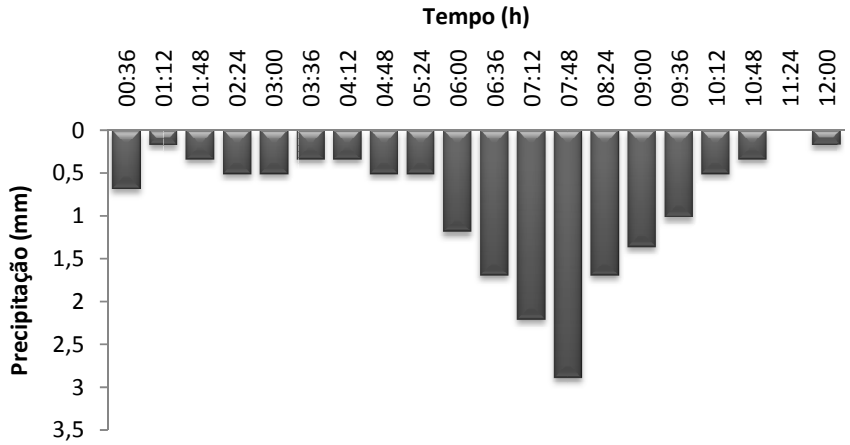
ANEXO II


Tempo (h)
00:36
01:12
01:48
02:24
03:00
03:36
04:12
04:48
05:24
06:00
06:36
07:12
07:48
08:24
09:00
09:36
10:12
10:48
11:24
12:00
Precipitação (mm)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8

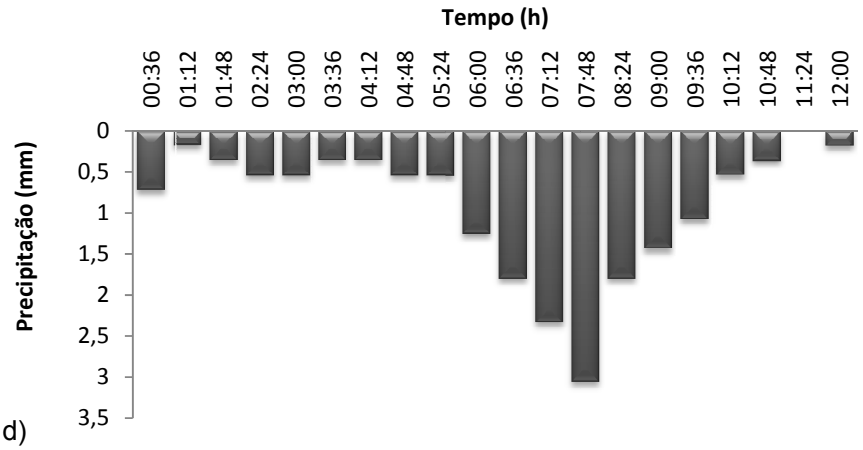
a)


Tempo (h)
00:36
01:12
01:48
02:24
03:00
03:36
04:12
04:48
05:24
06:00
06:36
07:12
07:48
08:24
09:00
09:36
10:12
10:48
11:24
12:00
Precipitação(mm)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6

b)

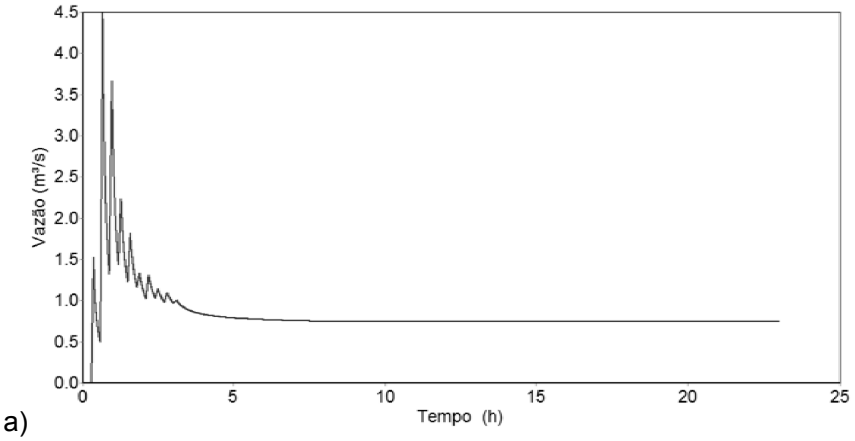

Tempo (h)
00:36
01:12
01:48
02:24
03:00
03:36
04:12
04:48
05:24
06:00
06:36
07:12
07:48
08:24
09:00
09:36
10:12
10:48
11:24
12:00
Precipitação (mm)
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5

c)

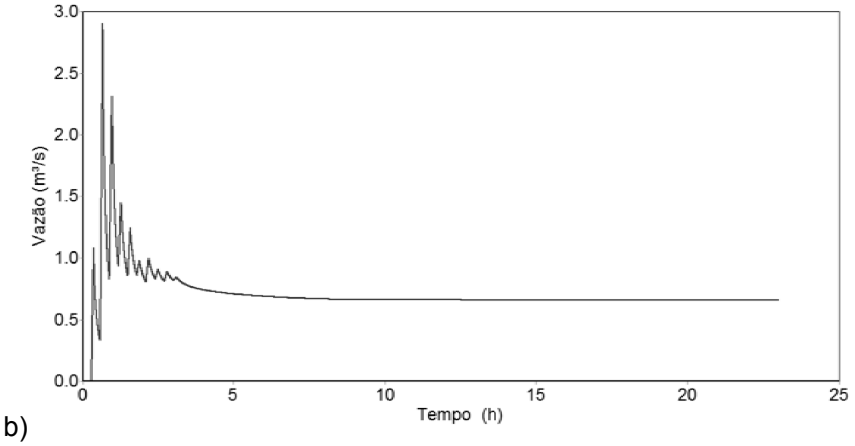


d)

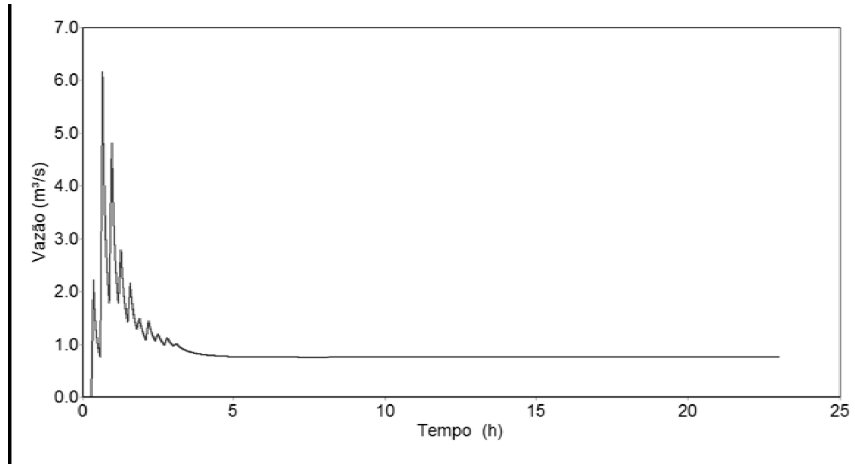
Figura 29. Gráfico da desagregação pelo método de Huff: a) Evento 4; b) Evento 5; c) Evento 6; d) Evento 7 .(Fonte: Arquivo da autora)



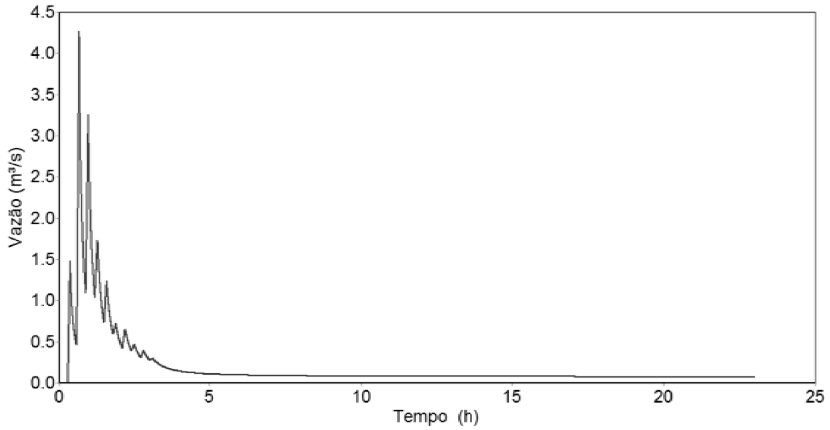
a)



b)

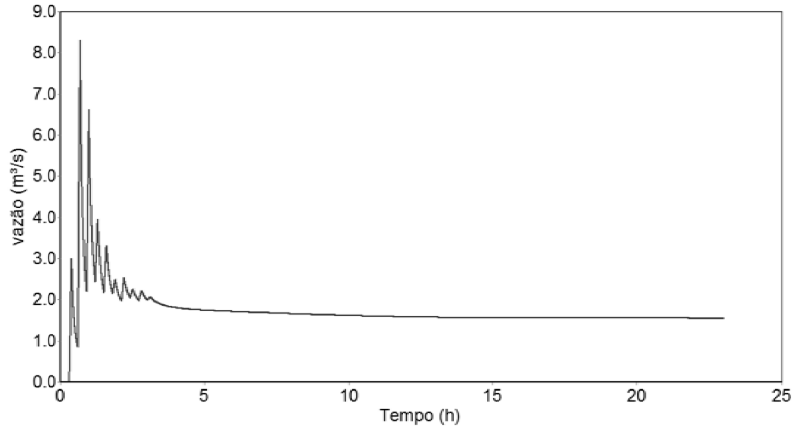


c)

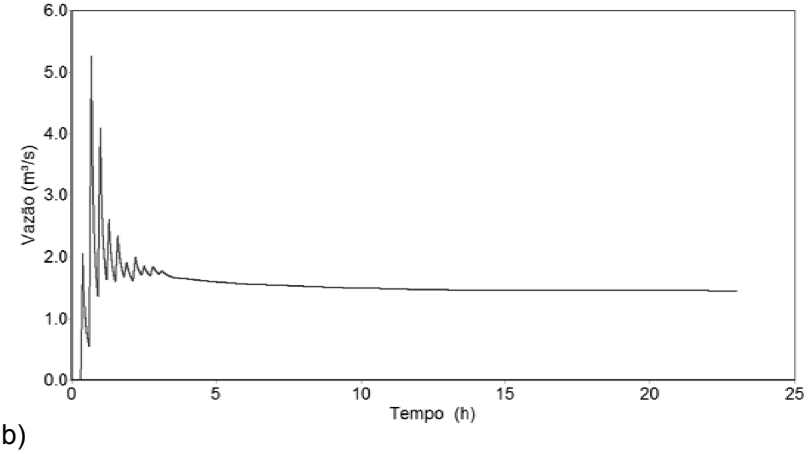


d)

Figura 30. Hidrogramas gerados pelo SWMM para cada cenário e precipitação de 9,6: a) Cenário1; b) Cenário 2; Cenário 3; Cenario4. (Fonte: Arquivo da autora)



a)



b)

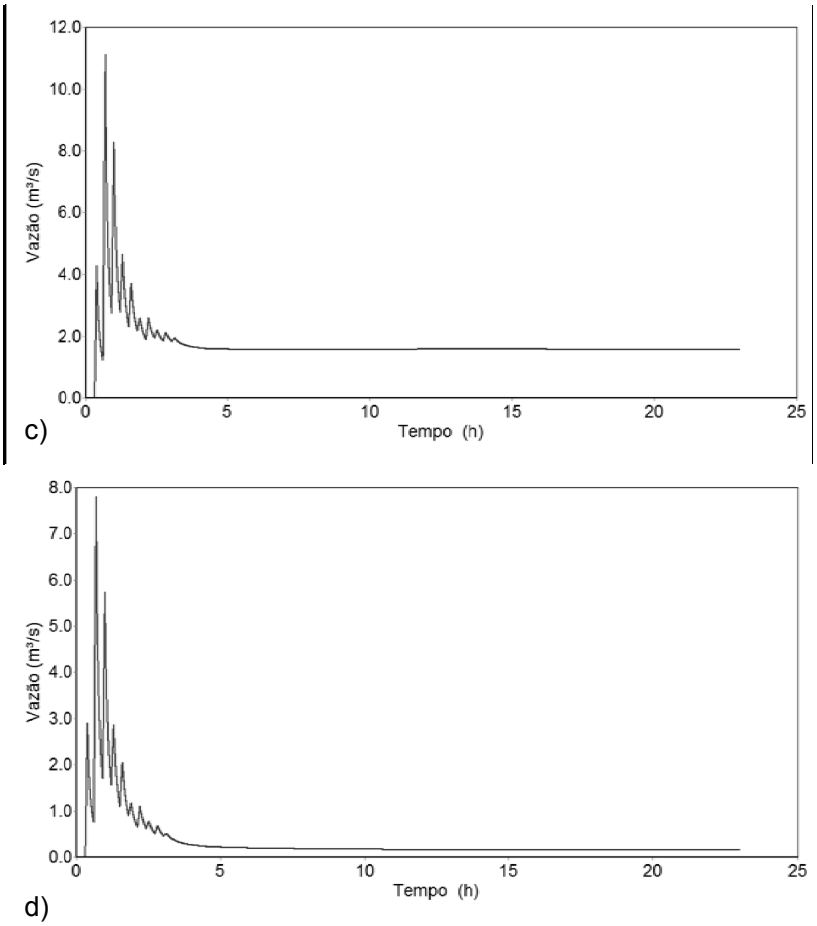


Figura 31. Hidrogramas gerados pelo SWMM para cada cenário e precipitação de 14,9: a) Cenário1; b) Cenário 2; Cenário 3; Cenario4. (Fonte: Arquivo da autora)