



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

JADER SALES DE BRITO JUNIOR

**Análise do comportamento do sistema de microdrenagem em casos de alagamentos:
Simulações hidrológicas em Campina Grande – PB.**

CAMPINA GRANDE - PB

2017

JADER SALES DE BRITO JUNIOR

**Análise do comportamento do sistema de microdrenagem em casos de alagamentos:
Simulações hidrológicas em Campina Grande – PB.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade
Federal de Campina Grande –
UFCG, para encerramento do
componente curricular e
conclusão da graduação em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof (a). Dra. Iana Alexandra Alves Rufino

Coorientadora: M. Sc. Priscila Barros Ramalho Alves

CAMPINA GRANDE – PB

2017

JADER SALES DE BRITO JUNIOR**Análise da influência do sistema de microdrenagem em casos de alagamentos:
Simulações em Campina Grande – PB.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Aprovada em: _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Nota: _____

Dr^a. Iana Alexandra Alves Rufino – Universidade Federal de Campina Grande
(Professora – Orientadora)

Nota: _____

M. Sc. Priscila Barros Ramalho Alves – Universidade Federal de Campina Grande
(Co-orientadora)

Nota: _____

Dr. Ricardo de Aragão – Universidade Federal de Campina Grande
(Professor – Examinador)

Nota: _____

Hiran de Melo Filho – Universidade Federal de Campina Grande
(Examinador)

DEDICATÓRIA

A Cristo, meu criador e redentor.

Aos meus pais, a quem devo tudo o que tenho hoje.

Aos meus avós, com quem espero um dia compartilhar pessoalmente essa conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, a causa e o fim de tudo, do qual deriva todo o conhecimento, que me conduziu em cada passo, e que merece toda honra e glória.

Aos meus pais, que certamente se batalharam muito mais que eu, para que chegasse aqui.

À minha família, que sempre me incentivou, torceu por mim, e me ajudaram em tudo sempre que preciso.

As minhas orientadoras Iana e Priscila, pela disponibilidade, paciência e ensinamentos, sem os quais este trabalho não seria o mesmo.

Aos amigos da UMP IPCG, do discipulado, e que estiveram no convívio próximo em todo esse tempo, que foram instrumentos de Deus e me ajudaram nestes cinco anos com orações e reuniões que sem dúvida foram essenciais para completar essa caminhada.

Aos amigos da universidade, pelo companheirismo e ajuda nas mais diversas situações.

Aos professores da graduação, pelos conhecimentos transmitidos e toda a formação profissional que proporcionaram.

Obrigado!

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Análise da influência do sistema de microdrenagem em casos de alagamentos: Simulações em Campina Grande – PB.

Autor: Jader Sales de Brito Junior

Orientadora: Dr^a. Iana Alexandra Alves Rufino

Coorientadora: M. Sc. Priscila Barros Ramalho Alves

Examinadores: Dr. Ricardo de Aragão

Hiran de Melo Filho

RESUMO

O processo de urbanização do Brasil, acontece, na maioria dos casos, com um planejamento ineficiente para implementação de uma infraestrutura urbana adequada, no qual sistemas como o de drenagem urbana não são projetados para que suportem o desenvolvimento e as mudanças da região. Este é um problema recorrente na urbanização de cidades, como Campina Grande – PB, pois o crescimento atrelado a mudança de utilização do solo e a consequente impermeabilização de boa parte da área da cidade alteram aspectos como o aumento da velocidade de escoamento e o volume de água escoado, afetando de forma negativa a população e o meio ambiente. Devido ao mau planejamento urbano, é possível observar ocupações inadequadas do solo, pessoas alocando-se em espaços propensos à ocorrência de alagamentos, e regiões sem drenagem suficiente de águas pluviais, gerando inundações em diversas áreas da cidade logo após, ou mesmo durante eventos de chuva. Tendo em vista esta problemática, este trabalho buscou investigar possíveis causas que contribuem para a ocorrência de fenômenos como estes, no bairro do centro de Campina Grande – PB, através de simulações e modelagem do tipo chuva-vazão, e a observar de como o sistema de microdrenagem atua durante e após ocorrência de eventos chuvosos. Para tanto, foi utilizado o software *SWMM – Storm Water Management Model*¹, que torna possível a análise de todo o sistema de drenagem de águas pluviais a partir de simulações hidrológicas. Para a observação dos resultados, as simulações foram realizadas em dois cenários: o de uso atual do solo da microbacia, e o de impermeabilização máxima permitida por legislação. Os resultados mostraram que, semelhante ao observado na realidade, parte da região em estudo apresenta níveis indesejados de escoamento, e os elementos de drenagem apresentaram comportamentos críticos,

¹ Software desenvolvido pela EPA – United States Environmental Protection Agency

principalmente quanto à velocidade de escoamento da água. Portanto, foram propostas medidas que visam minimizar o impacto que pode ser causado devido à insuficiência do atual sistema de microdrenagem, bem como foi salientada a necessidade de uma revisão do planejamento da infraestrutura urbana do município, criando novos instrumentos que possibilitem uma gestão mais eficiente da drenagem urbana e dos recursos hídricos como um todo.

Palavras-chave: Drenagem Urbana; Planejamento Urbano; Águas Pluviais; Microdrenagem; Alagamentos.

ABSTRACT

The urbanization process in Brazil is, in most cases, with an inefficient planning for implementation of an adequate urban infrastructure, in which systems such as urban drainage are not designed to support the development and changes of the region. This is a recurrent problem in urbanization of cities, such as Campina Grande – PB, for the growth linked to land use change and the consequent waterproofing of a good part of the city area alter aspects such as the increase of the flow speed and the volume of drained water, negatively affecting the population and the environment. Due to poor urban planning, it is possible to observe inadequate land occupations, people being placed in areas prone to flooding, and regions without sufficient rainwater drainage, generating floods in several areas of the city soon after, or even during rainy events. Considering this problem, this work sought to investigate possible causes that contribute to the occurrence of phenomena such as these in the center part of Campina Grande – PB, through simulations and rainfall-flow rate modeling, and to observe how the micro-drainage urban system acts during and after the occurrence of rainy events. In order to do so, SWMM - Storm Water Management Model software was used, which makes it possible the analysis of the entire rainwater drainage system through hydrological simulations. To observe the results, the simulations were carried out in two scenarios: the current use of the microbasin soil, and the maximum waterproofing allowed by legislation. The results showed that, similar to what is observed in reality, part of the region under study presents undesired levels of flow, and the drainage elements presented critical behavior, mainly in relation to water flow velocity. Therefore, measures that aim to minimize the impact that can be caused due to the insufficiency of the current microdrainage system were proposed, as well as the need for a revision of the urban infrastructure planning of the city, creating new instruments that allow a more efficient management of the urban drainage and water resources as a whole.

Key words: Urban Drainage; Urban Planning; Rainfall Water; Microdrainage; Flooding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de Habitações destruídas no Nordeste do País – Distribuição Anual. Fonte: UFSC-CEPED, 2016	3
Figura 2 - Efeito da urbanização sobre a vazão máxima. Fonte: Leopold (1986) citado por Porto <i>et al.</i> (2007) ..	10
Figura 3 - Consequências da urbanização. Fonte: Porto <i>et al.</i> (2007)	10
Figura 4 - O modelo dentro das fases de um estudo. Fonte: Tucci (1998)	17
Figura 5 - Fluxograma dos Modelos Hidrológico . Fonte: Tucci (1998).....	19
Figura 6 - Organograma da Metodologia Utilizada . Fonte: Elaborada pelo Autor.....	24
Figura 7 - Loteamento da Área de estudo; A) Perímetro Urbano de Campina Grande; B) Bairro Centro; C) Divisão por Lotes da Área. Fonte: Elaborada Pelo Autor	17
Figura 8 – Região em estudo. Fonte: Google Earth Pro	25
Figura 9 – Escoamento Superficial de uma Bacia Rural e Urbanizada. Fonte: Tucci (2007).....	26
Figura 10 - Mapa de Susceptibilidade a Alagamentos na Região de Campina Grande. Fonte: Adaptado de Alves (2017)	26
Figura 11 – Mapa com áreas edificadas e não edificadas de parte da microbacia do Prado. Fonte: Elaborada Pelo Autor.....	28
Figura 12 – Registros do estado dos elementos de microdrenagem de Campina Grande. Fonte: Autor, Setembro de 2017	30
Figura 13 – Formas de posicionamento das bocas de lobo; A) Situação recomendada; B) Situação não recomendada. Fonte: Adaptado de Hiroshi (2003).....	31
Figura 14 – Direções de fluxo majoritária das quadras do Prado. Fonte: Adaptado de Alves (2017)	34
Figura 15 – Gráficos do comportamento das precipitações ao longo do tempo com TR de 2 anos e TR de 5 anos em mm. Fonte: Elaborada com o auxílio do SWMM 5.1	39
Figura 16 – Mapa da simulação concluído após a coleta de dados. Fonte: Elaborada com o auxílio do SWMM 5.1	40
Figura 17 – Fluxograma das simulações realizadas para análise de resultados. Fonte: Elaborada pelo Autor.....	41
Figura 18 – Resultados para o Cenário 1, TR 2 anos; A) Escoamento superficial das quadras; B) Escoamento nos nós e velocidade nos condutos	43
Figura 19 – Resultados para o Cenário 1, TR 5 anos; A) Escoamento superficial das quadras; B) Escoamento nos nós e velocidade nos condutos	44
Figura 20 – Resultados para o Cenário 2, TR 2 anos; A) Escoamento superficial das quadras; B) Escoamento nos nós e velocidade nos condutos	46
Figura 21 – Resultados para o Cenário 2, TR 2 anos; A) Escoamento superficial das quadras; B) Escoamento nos nós e velocidade nos condutos	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – População residente, distribuição percentual da população residente, por sexo, razão de sexo e taxa de urbanização, com indicação do coeficiente de variação, segundo as Grandes Regiões, as Unidades da Federação e as Regiões Metropolitanas – 2015. Fonte: IBGE. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2015	1
Tabela 2 – Variação do balanço hídrico com a urbanização num clima temperado, em % da precipitação total . Fonte: Tucci (1998).....	8
Tabela 3 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas . Fonte Porto <i>et al.</i> (2016)	11
Tabela 4 – Comparação de modelos Hidrológicos. Fonte: Collodel (2009)	20
Tabela 5 – Caracterização da População por Situação do Domicílio e Sexo. Fonte: IBGE, Censo Demográfico 2010.....	25
Tabela 6 – Parâmetro necessários para as simulações no SWMM. Fonte: Alves (2017)	32
Tabela 7 – Valores dos coeficientes de Manning. Fonte: Rossman (2012).....	33
Tabela 8 – Valores de DI, DP e AINC. Fonte: Adaptado de Nóbrega (2012).....	34
Tabela 9 – Valores utilizados para a Equação de Horton. Fonte: Paixão <i>et al.</i> (2009).....	35
Tabela 10 – Tempos de retorno para diferentes finalidades de projeto. Fonte: Tucci e Bertoni (2003).....	36
Tabela 11 – Coeficientes da curva IDF em Campina Grande – PB. Fonte: Aragão (2000)	37
Tabela 12 – Valores da precipitação acumulada em mm. Fonte: Elaborada Pelo Autor	38
Tabela 13 – Quadro síntese dos resultados	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPA – Environmental Protection Agency
GIS – Geographic Information Systems
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LID – Low Impact Development
SDU – Sistema de drenagem urbana
SIG – Sistemas de Informações Geográficas
PMCG – Prefeitura Municipal de Campina Grande
PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico
SWMM – Storm Water Management Model

LISTA DE EQUAÇÕES

- (1) Largura do retângulo equivalente
- (2) Coeficiente de Compacidade
- (3) Largura da quadra
- (4) Equação de Horton
- (5) Equação da curva IDF
- (6) Fórmula de Kirpich

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. OBJETIVO GERAL	5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3. REFERENCIAL TEÓRICO	6
3.1 URBANIZAÇÃO E GERAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL	6
3.2 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA (SDU)	11
3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS	15
3.3.1 A modelagem no contexto da urbanização e os modelos precipitação-vazão	15
3.3.2 O software SWMM	21
4. METODOLOGIA	23
4.1 DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
4.1.1 Cenário 1: Uso presente do solo	28
4.1.2 Cenário 2: Uso do solo com ocupação máxima permitida pela legislação	29
4.1.3 Caracterização da microdrenagem da região	29
4.2 SIMULAÇÕES: PARÂMETROS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO	31
4.2.1 Dados das quadras em estudo	31
4.2.2 Dados de infiltração e precipitação	35
4.2.3 Dados da microdrenagem da área de estudo	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1 CENÁRIO 1: OCUPAÇÃO PRESENTE DO SOLO	42
5.2 CENÁRIO 2: LIMITE MÁXIMO DE OCUPAÇÃO DO LOTE PERMITIDO PELA LEGISLAÇÃO	45
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1. INTRODUÇÃO

Em países em desenvolvimento como o Brasil, de modo geral, a urbanização se dá de forma acelerada, o que acarreta um não planejamento de vários aspectos da infraestrutura urbana, sendo um deles os sistemas de drenagem urbano. Segundo indica o IBGE, o estado da Paraíba tem passado por este processo nos últimos anos, atingindo em 2015, um percentual de 80% de urbanização da população (Tabela 1). Este fenômeno traz consigo a impermeabilização do solo, que impede que as águas provenientes de chuva infiltrem para camadas profundas, gerando um maior volume de água a ser drenado, e consequentes riscos de enchentes e inundações.

Tabela 1 - População residente, distribuição percentual da população residente, por sexo, razão de sexo e taxa de urbanização, com indicação do coeficiente de variação, segundo as Grandes Regiões, as Unidades da Federação e as Regiões Metropolitanas - 2015

Grandes Regiões, Unidades da Federação e Regiões Metropolitanas	População residente (1 000 pessoas)	Razão de sexo (%)		Taxa de urbanização (%)	
		Razão	CV (%)	Taxa	CV (%)
Brasil	204 860	94.3	0.3	84.7	0.4
Nordeste	56 641	93.8	0.5	73.1	1.2
Paraíba	3 976	90.8	2.3	80.0	3.2

Fonte: IBGE. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2015.

Nos dois últimos séculos, muitos cursos d'água foram modificados com intuito de escoar rapidamente as águas, drenar baixadas úmidas e ampliar áreas para assentamento. A velocidade das águas aumentou devido à impermeabilização do solo, e as intervenções objetivaram apenas os aspectos setoriais e não aqueles culturais, sanitários, ecológicos, urbanísticos e paisagísticos (FURTINI *et al.*, 2005). Segundo Tucci (2000), as enchentes urbanas têm sido uma das grandes calamidades a que a população brasileira tem estado

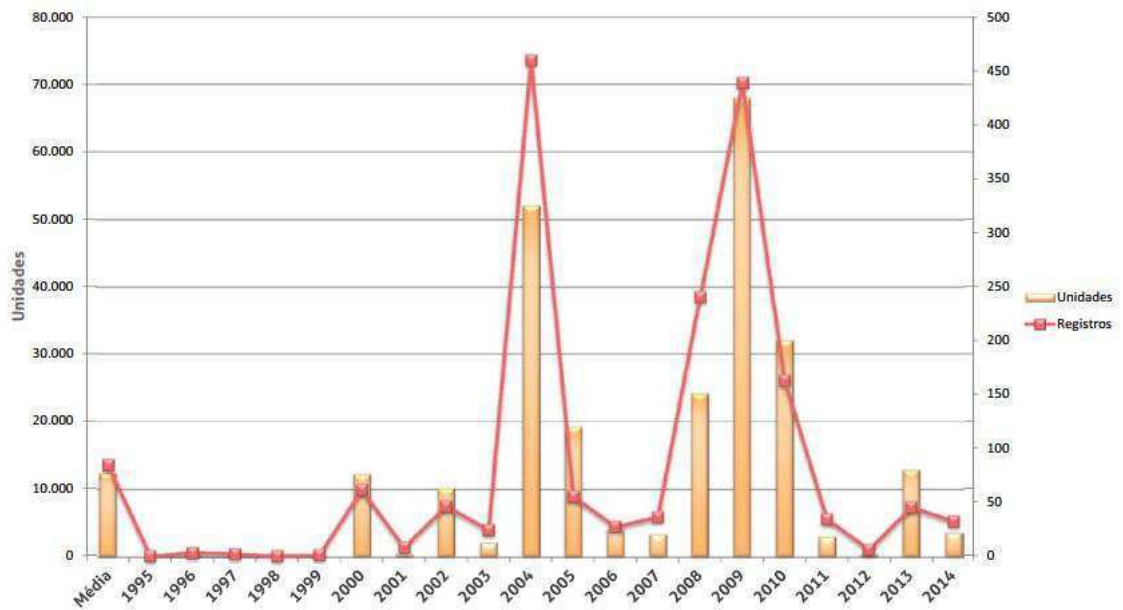
sujeita como resultado de ocupação inadequada do leito maior dos rios e urbanização das cidades.

Parkinson (2003) afirma que quando não há um planejamento da expansão urbana e fiscalização eficaz, ocorre a ocupação dos leitos dos corpos d'água urbanos. A população que aí se aloja fica, então, sujeita inundações. No caso de ocupação do leito do rio por população de baixa renda, há uma dificuldade adicional: a desocupação é feita, via de regra, subsidiada pelo poder público, o que a inviabiliza.

A preocupação com os riscos de eventos catastróficos devido ao mal dimensionamento de um sistema de drenagem é também uma questão de interesse internacional. Zhu *et al.* (2016) cita vários eventos de chuva que resultaram em grandes danos socioeconômicos, tais como o ocorrido no Paquistão em 2012, onde choveu 460 *mm* no intervalo de 24h, provocando 79 mortes e afetando mais de 1,9 milhões de pessoas. Na Argélia, bem como em muitos outros países africanos, os gerenciadores dos sistemas de drenagem urbana estão enfrentando grandes desafios. Esta situação é resultado da gestão apressada de um rápido desenvolvimento urbano. Por muito tempo, os sistemas de drenagem urbana (SDU) foram projetados com o propósito único de suprir necessidades básicas da população em termos de transporte de águas pluviais e residuais. Conseqüentemente muitos projetos foram implementados sem nenhuma estratégia geral ou coordenação. Recursos foram destinados para a construção de infraestrutura, mas sem levar em conta as restrições das gestões futuras e nem mensurar precisamente o desenvolvimento do serviço de drenagem urbana (BENZERRA *et al.*, 2012).

No contexto nacional, as enchentes urbanas são uma problemática crônica que afetam desde as regiões mais desenvolvidas do País, a exemplo de Sul e Sudeste, até áreas em desenvolvimento observadas no Nordeste, como mostra a figura 1 em que, segundo Marcelino (2008), 60% dos danos causados por desastres naturais no Brasil, tem como causa as inundações. São bem conhecidos; as inundações, no mínimo, interrompem o trânsito de veículos, e em casos piores, podem destruir prédios e outras construções. Estes problemas afetam majoritariamente as comunidades de baixa renda, devido principalmente à localização das residências (MACHADO *et al.*, 2005).

Figura 1 – Gráfico de Habitações destruídas no Nordeste do País – Distribuição Anual.



Fonte: UFSC-CEPED, 2016

Os problemas de drenagem urbana nas grandes e médias cidades brasileiras que ainda experimentam grande expansão mostram-se calamitosos. A frequência e a gravidade das inundações em algumas cidades e regiões metropolitanas demonstram a necessidade de procurar soluções alternativas estruturais e não estruturais e mesmo de conhecer melhor a fenomenologia climatológica, ambiental, hidrológica e hidráulica do problema, além dos seus componentes sociais com relação à habitação, saúde, saneamento e os demais aspectos, inclusive político-institucionais (CANHOLI, 2014).

Tucci (2000) afirma que o desenvolvimento urbano brasileiro tem produzido um aumento caótico na frequência das inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água e, a medida que a cidade se urbaniza, ocorre o aumento das vazões máximas devido à impermeabilização e canalização. Esse processo infelizmente não está sendo contido, mas sendo ampliado a medida que os limites urbanos aumentam ou a densificação se torna intensa.

O acúmulo de sedimentos que ocorre constantemente nos elementos de microdrenagem é frequentemente a causa dos entupimentos e do mal funcionamento durante os eventos chuvosos. Além disso, a degradação do sistema de drenagem tem uma grande relação com a coleta de lixo.

Em contraste ao que muitas vezes se observa, a Lei 11.445/07, também conhecida como “Lei do Saneamento”, estabelece diretrizes de como deve funcionar o saneamento básico no país, dentre elas a separação entre águas pluviais drenadas e a destinação do esgoto sanitário, que deve ser encaminhado a uma estação de tratamento.

No Brasil, existem instrumentos que orientem o destino das águas urbanas, como a Lei 9.433/97 (também conhecida como a “Lei das Águas”) e a Lei 11.445 – que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Entretanto, ainda existem lacunas no nível das municipalidades que não permitem, de forma eficaz, a integração das bacias hidrográficas e das águas urbanas em seus instrumentos de planejamento. Os códigos de obras e planos diretores geralmente não suprem as necessidades [de direcionamento para o desenvolvimento da infraestrutura] das cidades o que torna indispensável a implementação de leis específicas para a problemática da gestão das águas urbanas (ALVES, 2017).

O Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB, 2014) de Campina Grande mostra que existem alguns trechos críticos na macrodrenagem em épocas de chuvas de alta intensidade, o que comprova a problemática pela qual passa a cidade. Além disto, segundo o IBGE (2010), apenas 19,4% dos domicílios urbanos em vias públicas da cidade possuem urbanização adequada (presença, entre outros, dos elementos de drenagem necessários às vias). Tais fatos, quando somados à densidade populacional de mais de 640 habitantes por quilômetro quadrado, apontam para um sério risco de danos a uma parcela significativa da população em ocasiões de chuvas cuja rede de drenagem não suporte e sugerem que é necessário um estudo das características dos elementos de drenagem de regiões críticas do município que possa auxiliar o poder público na tomada de decisão e destinação de recursos para solucionar os problemas advindos da falta de infraestrutura.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento dos elementos que constituem a microdrenagem de uma fração urbana de Campina Grande a partir de simulações através da ferramenta computacional *Storm Water Management Model – SWMM*.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar se os elementos de drenagem presentes na região em estudo são quantitativamente suficientes para suportar chuvas de média a alta frequência;

- Investigar o comportamento dos elementos de microdrenagem em resposta às chuvas de projeto recomendadas para este sistema a partir de uma análise em cenários com o atual uso do solo e com a ocupação máxima permitida pela legislação do município.

- Diagnosticar, em caso de insuficiência da capacidade de drenagem da rede, as fontes e causas da deficiência do sistema.

- A partir dos resultados obtidos nas simulações, propor possíveis mudanças e recomendações para um planejamento e implantação de uma microdrenagem mais eficiente, frente aos possíveis problemas observados.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 URBANIZAÇÃO E GERAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O processo de urbanização acarreta inúmeras alterações ambientais, modificando o funcionamento do ciclo hidrológico, provocando frequentes enchentes, decorrentes da diminuição da infiltração de água no solo (AGOSTINHO & POLETO, 2012). Os avanços da urbanização podem comprometer os fatores do ambiente [como capacidade de infiltração, rugosidade característica e tempo de saturação do solo], que se modificam profundamente em suas condições naturais e, dessa forma, à medida que se expandem as cidades o próprio homem vê suas possibilidades de existência ameaçadas pela forma desordenada pela qual traduz a sua ocupação (PANIZZI, 2000). Assim, vê-se a pavimentação e construção das cidades tornando menor a possibilidade de infiltração das águas das chuvas no solo, dificultando a formação do ciclo das águas; vê-se a saturação de canalizações e esgotos; vê-se a drenagem das áreas que poderiam representar bacias de captação; entre outros aspectos que dificultam e comprometem a infraestrutura da cidade.

Com a urbanização, verificam-se alterações na rede de drenagem natural, que é substituída por estruturas artificiais, aumentos na extensão de áreas impermeáveis e mudanças de microclima local. Tais alterações provocam maior volume de água pluvial escoada mais rapidamente, gerando o segundo dos maiores problemas hidrológicos: o controle de enchentes (TUCCI, 2000).

A ocupação urbana não controlada no Brasil mostra-se como causa principal de problemas ligados ao escoamento natural das águas, resultando em aumentos em enchentes, dado o crescimento do volume escoado e a redução do amortecimento natural da bacia (CRUZ & TUCCI, 2000).

Tsuyuguchi (2015) afirma que o crescimento urbano acarreta uma série de impactos sobre o ciclo hidrológico, através do aumento da demanda de água, formação de ilhas de calor, poluição das águas, redução das vegetações e conseqüentemente da evapotranspiração e do destino modificado da água precipitada. Atuando sobre o sistema de drenagem, observa-se o aumento do volume de escoamento e da vazão de pico devido a fatores como a impermeabilização do solo e a canalização e retificação de riachos. Em

decorrência, há inúmeros registros de enchentes, inundações e desastres provocados pela insuficiência ou inadequação do sistema de drenagem, além de outras problemáticas ligadas, por exemplo, ao carreamento de sedimentos, redução da recarga hídrica e contaminação da água.

Rufino (2004), ao discorrer sobre as modificações pelas quais passam as regiões que se encontram em processo de urbanização, conclui que a ocupação urbana mal planejada provoca mudanças nas características físicas das bacias hidrográficas e conseqüentemente de todo o ciclo hidrológico de uma região, e também que a relação ambiente natural e ambiente construído é interativa e quando qualquer uma das partes sofre impactos, seja de ordem ambiental, estrutural ou socioeconômica, os efeitos ocorrerão também sobre os demais segmentos urbanos.

O desenvolvimento urbano modifica a cobertura vegetal provocando vários efeitos que alteram os componentes do ciclo hidrológico natural. Com a urbanização, a cobertura da bacia é alterada para pavimentos impermeáveis e são introduzidos condutos para escoamento pluvial gerando alterações no referido ciclo, das quais podem-se citar (TUCCI, 1998):

- a) Redução da infiltração do solo;
- b) Aumento do escoamento superficial;
- c) Redução do escoamento subterrâneo
- d) Redução da evapotranspiração.

A proporção em que os valores destas alterações variam dependem das condições de cada localidade em função do tipo de solo, cobertura e rocha, pluviosidade e clima. Para uma localidade onde a cobertura é rochosa e impermeável provavelmente as alterações relativas serão menores. No entanto, para bacias onde o escoamento superficial é insignificante o impacto poderá ser maior (TUCCI, 1998). A tabela 2 apresenta um exemplo quantitativo da variação do balanço hídrico com a urbanização para um clima temperado.

Tabela 2 – Variação do balanço hídrico com a urbanização num clima temperado, em % da precipitação total

Elementos do balanço	Pré-urbano %	Urbano %
Evapotranspiração	40	25
Escoamento superficial	10	43
Escoamento subterrâneo	50	32
Escoamento total	60	75

Fonte: Tucci (1998)

Canholi (2014) salienta que a urbanização caótica e o uso inadequado do solo provocam a redução da capacidade de armazenamento natural dos deflúvios e estes, por sua vez, demandarão outros locais para ocupar. Historicamente, os engenheiros responsáveis pela drenagem urbana tentaram solucionar o problema da perda do armazenamento natural, provocando o aumento da velocidade dos escoamentos com obras de canalização.

O processo de expansão urbana no Brasil é acompanhado por ações municipais que usualmente não incluem prevenções com o impacto sobre a drenagem. Como o país encontra-se num estágio em que não existe regulação no controle da ampliação das vazões de cheia devido à urbanização, a tendência é dos prejuízos aumentarem em taxas exponenciais (CAMPANA & TUCCI, 2000).

Segundo Morita (2014), muitos aspectos contribuem para o risco de inundação em bacias urbanas. Fatores hidrológicos causam rápido escoamento superficial e a descarga do volume de água cresce com o aumento de áreas impermeáveis. Populações e construções concentradas também são aspectos sociais importantes na análise dos riscos de inundações. A presença de grandes áreas impermeáveis não necessariamente representa riscos de alagamento sozinhas, porém é um fator que pode afetar o risco de acúmulo do volume de chuva de uma área urbana específica. Ainda segundo Morita (2014), as áreas sujeitas a alagamentos observadas em simulações diminuem ao se observar menores áreas impermeáveis.

Tucci e Genz (1995) citado por Cruz *et al.* (2007) afirma que a urbanização descontrolada das cidades brasileiras tem provocado, dentre outros impactos, o agravamento das enchentes naturais e a ampliação de sua frequência, além de criar novos pontos de alagamento. Estes impactos provêm da crescente impermeabilização do solo

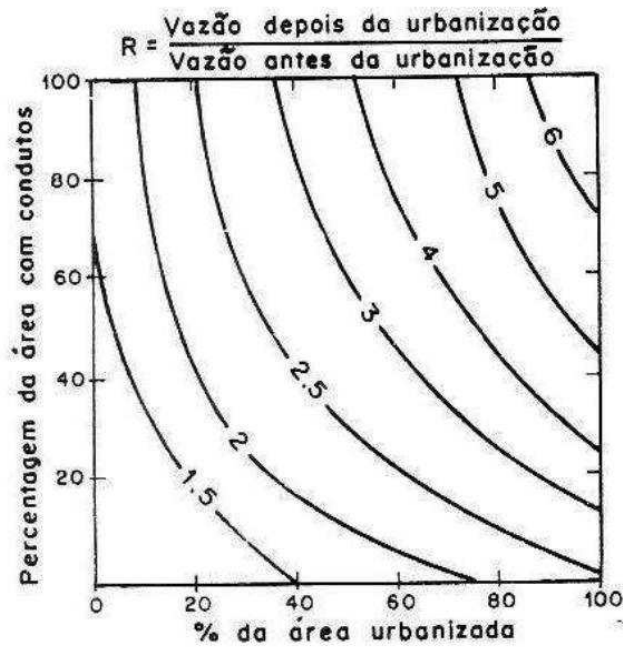
com aumento do volume pluvial escoado e redução de amortecimento, causando aumentos nas vazões máximas. Em outro estudo, Tucci (2000) relacionou o aumento do volume de escoamento superficial em bacia urbanas em função da porcentagem de impermeabilização e observou que superfícies impermeabilizadas em 7, 20, 60 e 80% produziram, respectivamente, aumentos aproximados de 2, 3, 6 e 8 vezes no volume de escoamento.

Porto *et al.* (2007) cita que a ocupação da bacia hidrográfica tende a ocorrer no sentido de jusante para montante, e quando o poder público não controla a urbanização indisciplinada das cabeceiras da bacia ou não amplia a capacidade de macrodrenagem, a frequência das enchentes aumenta significativamente, provocando a desvalorização de propriedades e prejuízos periódicos. Nesse processo, a população localizada a jusante, sofre as piores consequências, em razão da ocupação a montante.

As consequências da urbanização que mais diretamente interferem com a drenagem urbana são as alterações do escoamento superficial direto e cita alguns prejuízos que o crescimento acelerado e caótico das populações urbanas no Brasil podem trazer, dos quais pode-se destacar: a proliferação de loteamentos executados sem condições adequadas; ocupação de áreas impróprias; proliferação de favelas e invasões; ocupação extensa e adensada dificultando a construção de canalizações e eliminando áreas de armazenamento (PORTO *et al.*, 2007). As alterações no escoamento superficial podem ser dramáticas, como mostra a figura 2. Para casos extremos, verifica-se que o pico da cheia numa bacia urbanizada pode chegar a ser 6 vezes maior do que o pico desta mesma bacia em condições naturais.

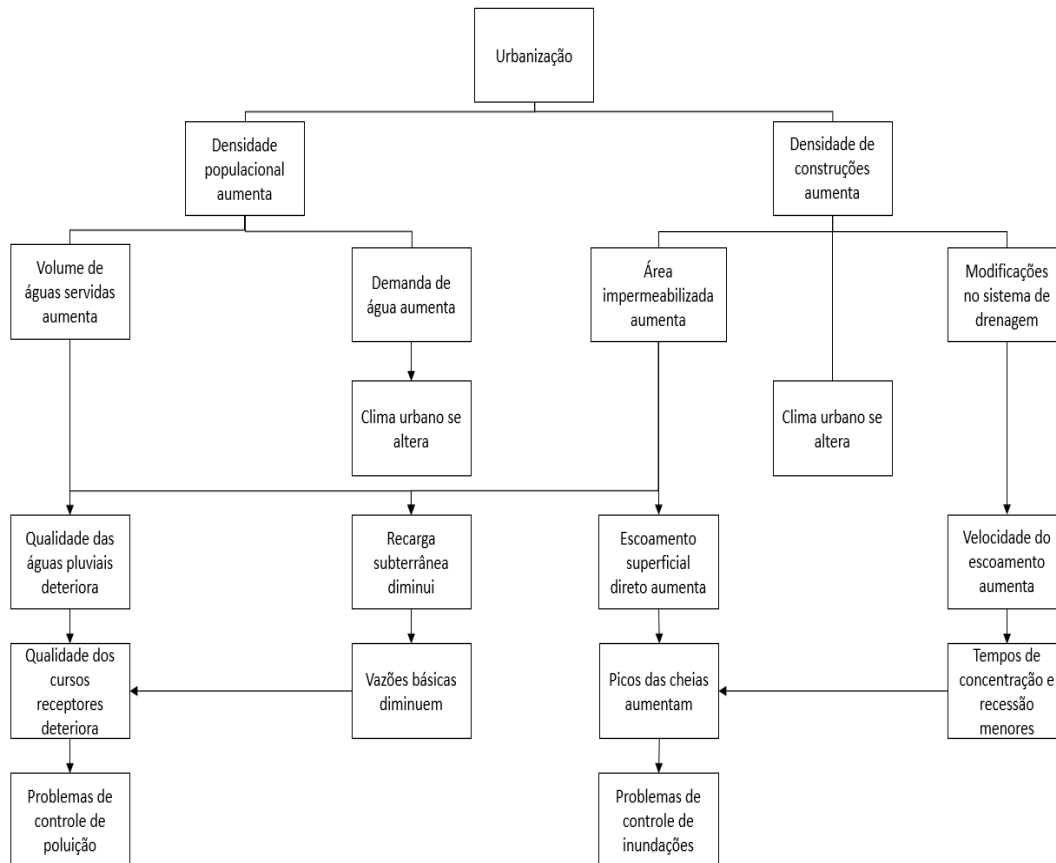
A figura 3 apresenta um panorama de como se inter-relacionam os diversos processos que ocorrem em uma área urbana e a tabela 3 explicita as relações de causa e efeito.

Figura 2 – Efeito da urbanização sobre a vazão máxima



Fonte: Leopold (1965) citado por Porto (2007)

Figura 3 – Consequências da urbanização



Fonte: Porto *et al.* (2007)

Tabela 3 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas

CAUSAS	EFEITOS
Impermeabilização	Maiores picos e vazões
Redes de Drenagem	Maiores picos a jusante
Lixo	Degradação da qualidade da água
	Entupimento de bueiros e galerias
Redes de esgotos deficientes	Degradação da qualidade da água
	Molestias de veiculação hídrica
	Inundações: consequências mais sérias
Desmatamento e	Maiores picos e volumes
Desenvolvimento Indisciplinado	Mais erosão
	Assoreamento em canais e galerias
Ocupação das várzeas	Maiores prejuízos
	Maiores picos
	Maiores custos de utilidades públicas

Fonte: Porto *et al.* (2007)

Os efeitos citados como consequência do processo de urbanização e mudança do tipo de uso do solo em áreas em desenvolvimento são ratificados pelos resultados de trabalhos como os de Santos (2015) e Alves (2017), que demonstram estas consequências através de simulações hidrológicas que levam em conta parâmetros representativos das características decorrentes da urbanização no meio estudado.

3.2 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA (SDU)

Para Pinto & Pinheiro (2006), um sistema de drenagem deve ser entendido como o conjunto da infraestrutura existente em uma cidade para realizar a coleta, o transporte e o lançamento final das águas superficiais. Inclui ainda a hidrografia e os talweges. É constituído por uma série de medidas que visam a minimizar os riscos a que estão expostas as populações, diminuindo os prejuízos causados pelas inundações e possibilitando o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e ambientalmente sustentável. Os sistemas de drenagem urbana são sistemas preventivos de inundações, principalmente nas áreas mais baixas das comunidades sujeitas a alagamentos ou marginais aos cursos d'água.

A principal causa das enchentes deve-se à ocupação desordenada do solo, não só no território municipal como também a montante em toda a área da bacia de contribuição, e ao sistema de drenagem urbana que transfere os escoamentos para jusante, sem qualquer

preocupação com a retenção de volumes escoados. Um sistema de drenagem eficiente é o que drena os escoamentos sem produzir impactos nem no local nem a jusante (PINTO e PINHEIRO, 2006).

Tucci (2002) também afirma que a drenagem urbana pode ser entendida como um conjunto de elementos que visa reduzir os riscos que as populações estão sujeitas e os prejuízos causados por inundações, promovendo o desenvolvimento urbano de forma harmônica e sustentável.

Devido ao aumento do número de ocorrências de inundações e alagamentos em meios urbanos, e também à facilidade com que a informação chega ao conhecimento da população nos dias atuais, os SDU's tem sido alvo de pesquisas (KANG *et al.*, 2016; KARAMOUZ *et al.*, 2011) e debates que trazem várias definições e caracterizações, tanto sobre sua estrutura, como a área de abrangência, como deve ser entendido, entre outras. Portanto é necessário que, no estudo deste sistema, sejam observadas algumas definições e caracterizações.

A drenagem urbana inicia-se em edificações com os coletores de águas pluviais ligados à rede pública, na drenagem superficial das sarjetas que recebe a parcela superficial das ruas, calçadas, pátios e outras áreas impermeáveis ou permeáveis que geraram escoamento superficial. O escoamento proveniente das sarjetas, que entra na rede através dos bueiros, e o proveniente dos coletores residenciais são drenados pelos condutos pluviais que alimentam os condutos secundários até os principais sistemas compostos de pequenos rios (arroyos, riachos ou ribeirões) que compõem a macrodrenagem urbana (PORTO *et al.*, 2007).

O Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB, 2014) de Campina Grande define o sistema de drenagem urbana como sendo dividido em duas partes: microdrenagem e macrodrenagem. O primeiro é a parte estrutural responsável pelo escoamento superficial para as galerias ou canais do meio urbano, fazem parte desse sistema as redes coletoras de águas pluviais, sarjetas, sarjetões, galerias, bocas coletoras, poços de visita, caixas mortas e guias. Já o segundo é responsável pelo escoamento final das águas pluviais provenientes do sistema de microdrenagem, o qual pode ser formado por canais naturais ou artificiais, galerias de grandes dimensões e estruturas auxiliares.

Ao citar a terminologia de um sistema de drenagem e seus diversos componentes, Porto *et al.* (2007) diz que os principais termos utilizados no dimensionamento de um sistema pluvial são:

- Galeria: canalizações públicas destinadas a conduzir as águas pluviais provenientes das bocas de lobo e das ligações privadas;
- Poço de visita: dispositivos localizados em pontos convenientes do sistema de galerias para permitir o seguinte: mudança de direção, declividade e diâmetro; inspeção e limpeza das canalizações;
- Trecho: Porções de galerias situadas entre dois poços de visita;
- Bocas de lobo: dispositivos localizados em pontos convenientes nas sarjetas para captação de águas pluviais;
- Tubos de ligação: são canalizações destinadas a conduzir as águas pluviais captadas nas bocas de lobo para as galerias ou para os poços de visita;
- Meio-fio: elementos de pedra ou concreto, colocados entre o passeio e a via pública, paralelamente ao eixo da rua e com sua face superior no mesmo nível do passeio;
- Sarjetas: faixas de via pública, paralelas e vizinhas ao meio-fio. A calha formada é a receptora das águas pluviais que incidem sobre as vias públicas e que para elas escoam;
- Sarjetões: calhas localizadas nos cruzamentos das vias públicas, formadas pela sua própria pavimentação e destinadas a orientar o fluxo das águas que escoam pelas sarjetas;
- Conduitos forçados: obras destinadas à condução das águas superficiais coletadas de maneira segura e eficiente, sem preencher completamente a seção transversal dos condutos;
- Estações de bombeamento: conjunto de obras e equipamentos destinados a retirar água de um canal de drenagem, quando não mais houver condição de escoamento por gravidade, para um outro canal em nível mais elevado ou receptor final da drenagem em estudo.

Conquanto as caracterizações e definições dos tipos de medidas e características dos elementos de drenagem urbana torne mais claro o entendimento do funcionamento do sistema, Silveira (2001) alerta que é impossível reduzir o controle da drenagem urbana a uma simples prescrição de medidas estruturais e não estruturais onde o primeiro deve exercer controle através de trabalhos físicos de engenharia, e o último através de medidas administrativas afetando o espaço físico, e adaptações com o objetivo de tornar viável a vida com fenômenos hidrológicos naturais. E também salienta que, geralmente, os dois

tipos principais de inundações urbanas são: (1) inundações localizadas, geradas no próprio meio urbano, que são encaminhadas pelas ruas, canalizações de águas pluviais e riachos; e (2) inundações em áreas ribeirinhas, que afetam as áreas urbanas e são causadas por enchentes de rios ou lagos próximos à cidade. Medidas de controle estrutural ou não estrutural devem ser integradas no planejamento do ambiente de áreas urbanas e não são, portanto, simplesmente um problema de engenharia e planejamento administrativo. Entretanto, a abordagem isolada das medidas de controle de drenagem urbana é útil para uma melhor definição de sua função na busca de soluções técnicas que irão abranger o planejamento ambiental.

Em várias regiões do Brasil podem ser observadas falhas que mostram a insuficiência da capacidade da rede de drenagem após eventos de chuva que, em tese, deveriam ser capazes de suportar. Tsuyuguchi (2015) cita que isso se deve não somente ao aumento do escoamento provocado pela impermeabilização, mas também à implementação do sistema de drenagem de forma desarticulada, havendo, por exemplo, a execução de obras em desacordo com o projeto, ou até mesmo, diante da inexistência do mesmo. Essa é uma das razões para a falta de registro de redes de drenagem, atividade esta que compete primeiramente aos órgãos administrativos municipais. E tais práticas se repetem também devido à necessidade dessa informação para elaborar diagnósticos e traçar ações.

O PMSB de Campina Grande cita a importância dos serviços de drenagem, contrastando com a atenção que lhe é dado ao citar que o crescimento urbano não planejado das grandes cidades tem gerado diversos impactos para a população, bem como para o meio ambiente. Esses impactos, no âmbito da drenagem urbana, deterioram a qualidade de vida da população, pois acarretam na incidência de enchentes, desmoronamentos e alagamentos nos núcleos urbano. O documento do PMSB também apresenta alguns princípios elaborados por Tucci e Genz (1995), que auxiliam na gestão da drenagem urbana:

- Os impactos de quaisquer medidas não devem ser transferidos para jusante;
- Propor medidas de controle para o conjunto da bacia;
- Controle permanente na ocupação do solo e áreas de risco;
- Educação ambiental qualificada para o técnico, população e poder público;
- Competência técnico-administrativa dos órgãos públicos gestores e
- Atualização de normas brasileiras sobre drenagem urbana.

Ao discorrer sobre a gestão das águas, de um modo geral, Panizzi (2000) afirma que a urbanização deve crescer junto com os sistemas de gestão das águas, de forma que parte dos problemas possam ser antecipados e parte dos problemas possam ser equacionados, mesmo depois que ocorrem. Trata-se então de trabalhar em, pelo menos, duas direções: na previsão e antecipação dos problemas, via planejamento urbano e no equacionamento dos problemas, via gerenciamento das águas em geral e do seu adequado escoamento urbano, princípios que se aplicam especialmente à gestão e planejamento dos sistemas de drenagem urbanos.

Para Tucci (2000), repensar o desenvolvimento da drenagem urbana através de soluções adequadas deve ser um esforço conjunto da sociedade organizada através das entidades públicas para regulamentar e planejar o seu desenvolvimento com apoio de tecnologias desenvolvidas para a nossa realidade através das universidades e centros de pesquisas que desenvolvam os modelos e parâmetro utilizados pelas empresas através da reciclagem dos projetistas.

3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

3.3.1 A modelagem no contexto da urbanização e os modelos precipitação-vazão

Com a evolução da tecnologia, modelos hidrológicos e softwares que permitem a simulação da realidade a partir da modelagem foram desenvolvidos, aperfeiçoados, e hoje são usados em larga escala para o desenvolvimento de pesquisas e análises do comportamento de vários sistemas hidrológicos. Dentre as várias funções que alguns programas dispõem, estão as simulações hidrológicas, a previsão do escoamento a partir das características da bacia em estudo e da precipitação, e o consequente auxílio na avaliação do sistema de drenagem urbano.

Para Souza (2014), uma bacia urbana é composta de vários tipos de usos do solo que produzem diferentes volumes de escoamento, tempo de pico e vazão. A modelagem de bacias hidrográficas permite a integração de todas estas características variadas. Assim, os modelos hidrológicos de águas pluviais urbanas devem ser capazes de simular os fluxos e o transporte de poluentes em áreas impermeáveis e permeáveis através de canais e redes de tubulação.

Segundo Fan & Collischonn (2013), um modelo hidrológico é uma representação matemática de um sistema hídrico.

A complexidade dos processos de qualidade da água e fluxo em ambiente urbano é a razão para a constante evolução desses modelos de bacias hidrográficas urbanas. A dificuldade de implementar modelos sofisticados e coletar dados em tempo real em um ambiente com transientes muito rápidos requer a criação de modelos mais operacionais, que também podem ser utilizados como modelos de planejamento, ou acoplados a outro já utilizado (SOUZA, 2014).

Seibt (2013) afirma que, de maneira geral, um modelo hidrológico é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Os parâmetros mantêm seu valor inalterado durante todo o processo estudado. Assim, um parâmetro possui o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que ele não possa variar espacialmente. Dessa forma, é possível afirmar que modelos hidrológicos são ferramentas desenvolvidas para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas.

A necessidade de planejamento urbano exige, muitas vezes, o prévio conhecimento dos efeitos da urbanização, com a alteração do uso e ocupação do solo da bacia, assim como a avaliação de alternativas de intervenções propostas. Isso só pode ser obtido de forma indireta, mediante simulações de modelos (CANHOLI, 2014).

Ao discorrer sobre a utilidade dos modelos hidrológicos, Schuster (2014) afirma que os modelos hidrológicos podem ser utilizados em aplicações nas diferentes fases do gerenciamento dos recursos hídricos e para projetos em diversas áreas do desenvolvimento de uma sociedade, como a expansão urbana, o transporte, energia, produção agrícola e controle de impactos. Diversos tipos de projetos que envolvem recursos hídricos podem se apoiar em modelos hidrológicos para as fases de planejamento, concepção e controle. Os modelos de transformação precipitação-vazão apresentam diversas aplicações como: previsão de cheias, definição de cheias de projeto, operação de hidrelétricas, estimativa da vazão para navegação, entre outros, bem como modelos de escoamento em cursos d'água podem simular a qualidade da água nos rios, estimativa do calado e operação de barragens e determinação de áreas de várzea e de remanso em canais.

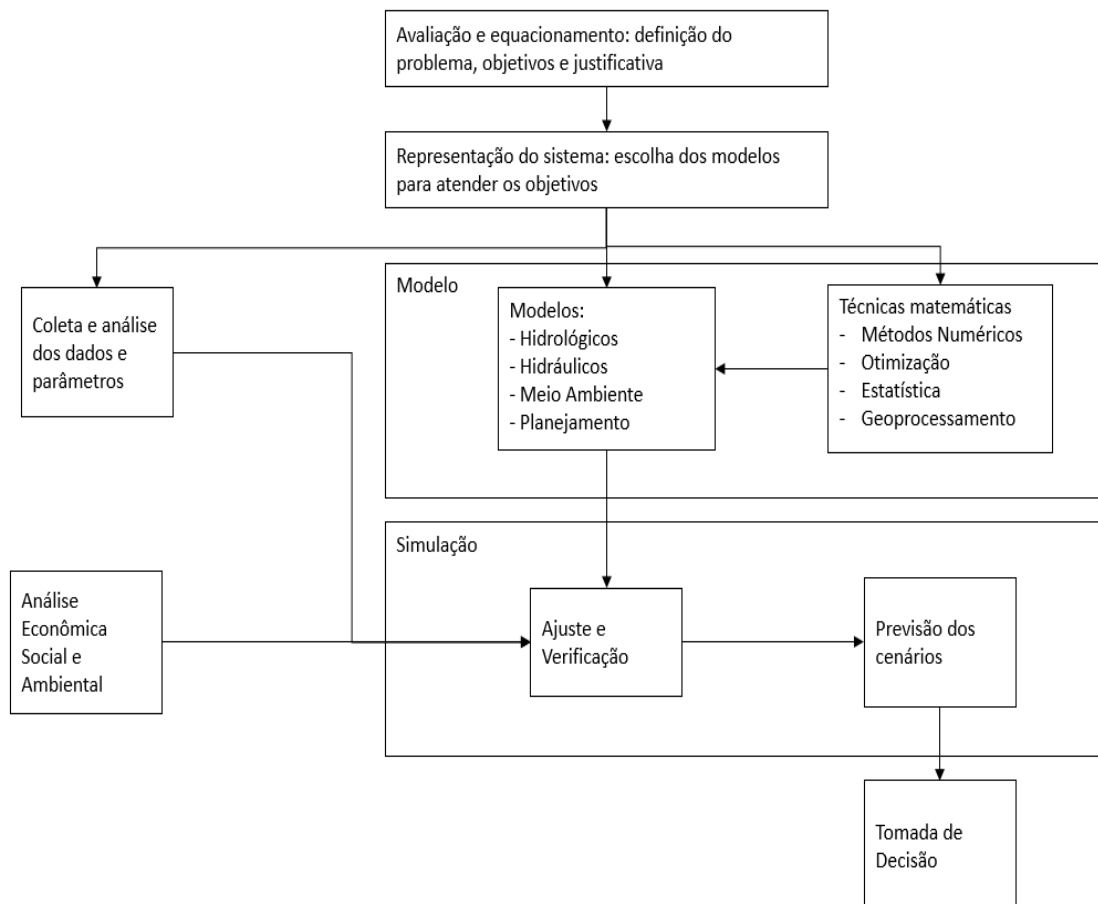
Para um perfeito entendimento do funcionamento dos modelos em questão, é importante definição de algumas terminologias:

- Fenômeno: é um processo físico, que produz alteração de estado no sistema;

- Variável: é um valor que descreve quantitativamente um fenômeno, variando no espaço e no tempo;
- Parâmetro: é um valor que caracteriza o sistema, o parâmetro também pode variar com o espaço e o tempo;
- Simulação: é o processo de utilização do modelo.

A figura 4 ajuda na compreensão das fases de estudo em que o modelo está inserido.

Figura 4 – O modelo dentro das fases de um estudo



Fonte: Tucci (1998).

Caracterizando as possíveis formas de utilização de um modelo, Seibt (2013) salienta que uma das aplicações dos modelos é servir para a melhor compreensão do comportamento dos fenômenos hidrológicos na bacia, entendendo os elementos e a sensibilidade das variações para bacias com diferentes características. Outros aproveitamentos envolvem previsão de vazão em tempo real, efeitos resultantes da modificação do uso do solo e ainda, como antevistas de cenários de planejamento,

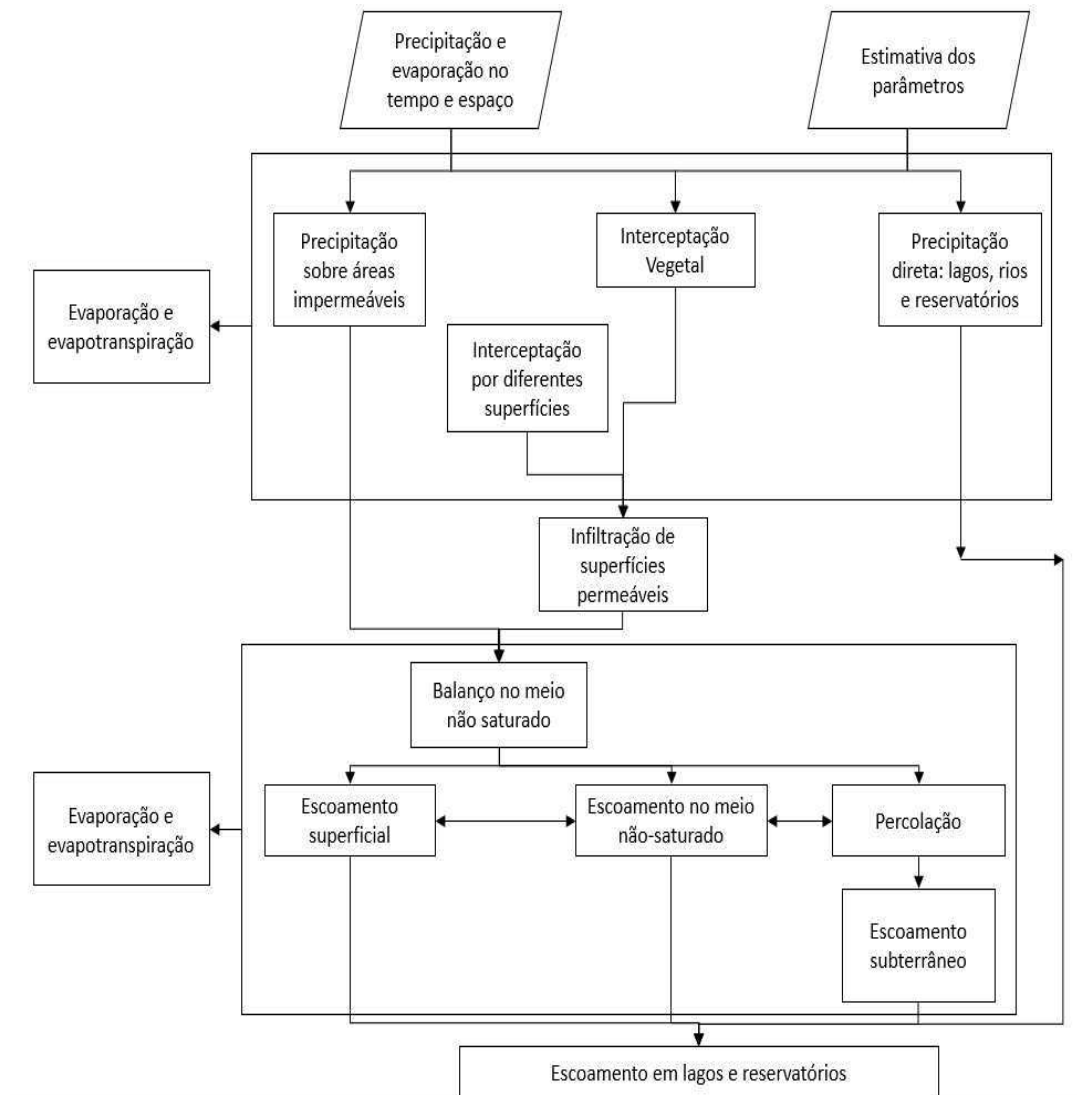
abrangendo a realização de prevenções, considerando as implicações de planos alternativos.

Assim, conclui-se que é notória a importância da escolha de um modelo e de um software que torne possível a representação do maior número possível de características observadas da bacia que se pretende analisar.

A parte do ciclo hidrológico que compreende a precipitação e a vazão pode ser representada por um modelo precipitação-vazão, que descreve a distribuição da precipitação no espaço, escoamento superficial, e outras características presentes no percurso da água na bacia hidrográfica. A figura 5 mostra tanto as características quanto a forma como elas se inserem no fluxograma de um modelo hidrológico.

Schuster (2014) afirma que os modelos de transformação precipitação-vazão podem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressões do solo, o fluxo através do solo pela infiltração e percolação, o escoamento subsuperficial e superficial laminar e nos cursos d'água. Os aspectos mais importantes para a escolha do modelo hidrológico a ser utilizado são os objetivos da utilização, as limitações do modelo na representação dos processos e a qualidade e quantidade das informações utilizadas em conjunto com o modelo. Os modelos de transformação chuva-vazão representam a porção do ciclo hidrológico entre a precipitação que sobre uma bacia hidrográfica e a vazão que escoar em um rio. Estes modelos surgiram com a necessidade de se gerar séries de vazões a partir de dados de precipitação, que são mais facilmente obtidos.

Figura 5 – Fluxograma dos Modelos Hidrológicos



Fonte: Tucci (1998)

Hoje, existem vários programas que realizam simulações hidrológicas utilizando-se dos modelos precipitação-vazão, os quais podem ser utilizados para a verificação da eficiência de sistemas de micro e macrodrenagem. A tabela 4 apresenta alguns programas de simulações mostrando comparativamente suas características.

Tabela 4 – Comparação de modelos Hidrológicos

CAPACIDADES DE SIMULAÇÃO	MODELOS		
	STORM	IPHSI	SWMM
Múltiplas sub-bacias	-	X	X
Entrada de diversos hietogramas	-	X	X
Evaporação	X	-	X
Degelo	X	-	X
Escoamento de base	-	X	X
Escoamento de superfície de áreas impermeáveis	X	X	X
Escoamento de superfície de áreas permeáveis	X	X	X
Áreas diretamente conectadas	-	-	X
Balanço hídrico entre eventos	X	X	X
Escoamento em sarjetas	X	-	X
Propagação em galerias	X	X	X
Múltiplas seções transversais	-	-	X
Escoamento sob pressão	-	-	X
Derivação	X	X	X
Estações elevatórias	-	-	X
Armazenamento	X	X	X
Cálculo de nível	-	X	X
Cálculo de velocidades	-	X	X
Simulação contínua	X	X	X
Escolha do passo de tempo	-	X	X
Cálculo de projetos	-	X	X
Código computacional disponível	X	X	X

Fonte: Collodel (2009)

Além disso, Souza (2014) descreve e compara alguns modelos que permitem simular quantidade e qualidade d'água em ambientes urbanos:

- STORM (Hydrologic Engineering Center, 1977) foi desenvolvido por U.S. Army Corps of Engineers. É capaz de simular o escoamento e cargas poluentes provenientes de bacias hidrográficas urbanas e rurais, em resposta à precipitação. É um modelo contínuo, com passo de tempo horário, mas pode ser utilizado para eventos.
- Wallingford Model (Bettess *et al.*, 1978; Price, 1978; Price e Kidd, 1978) é um conjunto de modelos desenvolvidos no Instituto de Pesquisa Hidráulica, Wallingford, Reino Unido. Ele inclui um modelo chuva-vazão, um modelo simples e completo de roteamento dinâmico e um módulo de qualidade da água.

- QUAL2E– UNCAS (Brown e Barnwell, 1987) é um modelo da EPA desenvolvido para simular a qualidade da água, concebido como uma ferramenta de planejamento, podendo simular o transporte de poluentes.
- WQRRS (Hydrologic Engineering Center, 1978), também desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, foi projetado para simular a quantidade e qualidade da água do modelo dentro de uma bacia. É composto por três módulos independentes: módulo de reservatório, módulo de fluxo hidráulico e o módulo de qualidade de fluxo, que podem ser acoplados, se necessário.

3.3.2 O software SWMM

O *Storm Water Management Model* – SWMM é um software que permite simulações hidrológicas do tipo chuva-vazão (ou precipitação-vazão), e pode ser utilizado para simulação de um evento chuvoso isolado, bem como para eventos de longo prazo.

Desenvolvido em 1971, sofreu, desde então, diversas atualizações; é amplamente utilizado em várias partes do mundo para o planejamento, análises e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais em áreas urbanas, sistemas coletores de águas residuárias, com muitas aplicações, também, em áreas não urbanas (Rossman, 2012). Segundo Oppelt citado por Rossman (2012), o SWMM é um programa computacional que pode analisar o impacto do escoamento superficial e avaliar a efetividade de estratégias de mitigação. Ao citar as características e resultados de suas simulações, Zhu *et al.* (2016) afirma que o SWMM pode ser considerado um dos melhores modelos hidrológicos.

Alves (2017) descreve o SWMM como um modelo hidrológico dinâmico que simula hidrogramas resultantes e possui diferentes aplicações como: sistemas de drenagem para controle de inundações, percepção dos problemas de controle de inundações e qualidade de água, fontes de geração dos poluentes para estudos de redução.

Algumas das aplicações típicas que manual do SWMM Brasil atribui ao programa são:

- Concepção e dimensionamento de componentes da rede de drenagem para o controle de inundações;
- Dimensionamento de estruturas de retenção e acessórios para o controle de inundações e a proteção da qualidade das águas;
- Delimitação de zonas de inundação em leitos naturais;
- Concepção de estratégias de controle para minimizar o transbordamento de

sistemas unitários e mistos;

- Avaliação do impacto de contribuições e infiltrações sobre o transbordamento de sistemas de drenagem de águas residuárias.

Ao caracterizar o funcionamento do SWMM, Souza (2014) afirma que o SWMM representa o comportamento de um sistema de drenagem através de uma série de fluxos de água entre os principais compartimentos do ambiente, que são: o atmosférico, onde ocorre precipitação e depósito dos poluentes sobre a superfície do solo; que recebe a precipitação sob a forma de chuva ou neve; o compartimento de transporte que exporta o fluxo de água por meio da infiltração por meio de escoamento superficial e carreamento de poluentes; águas subterrâneas que recebe a infiltração da superfície do solo, podendo transferir parte da mesma para o compartimento de transporte.

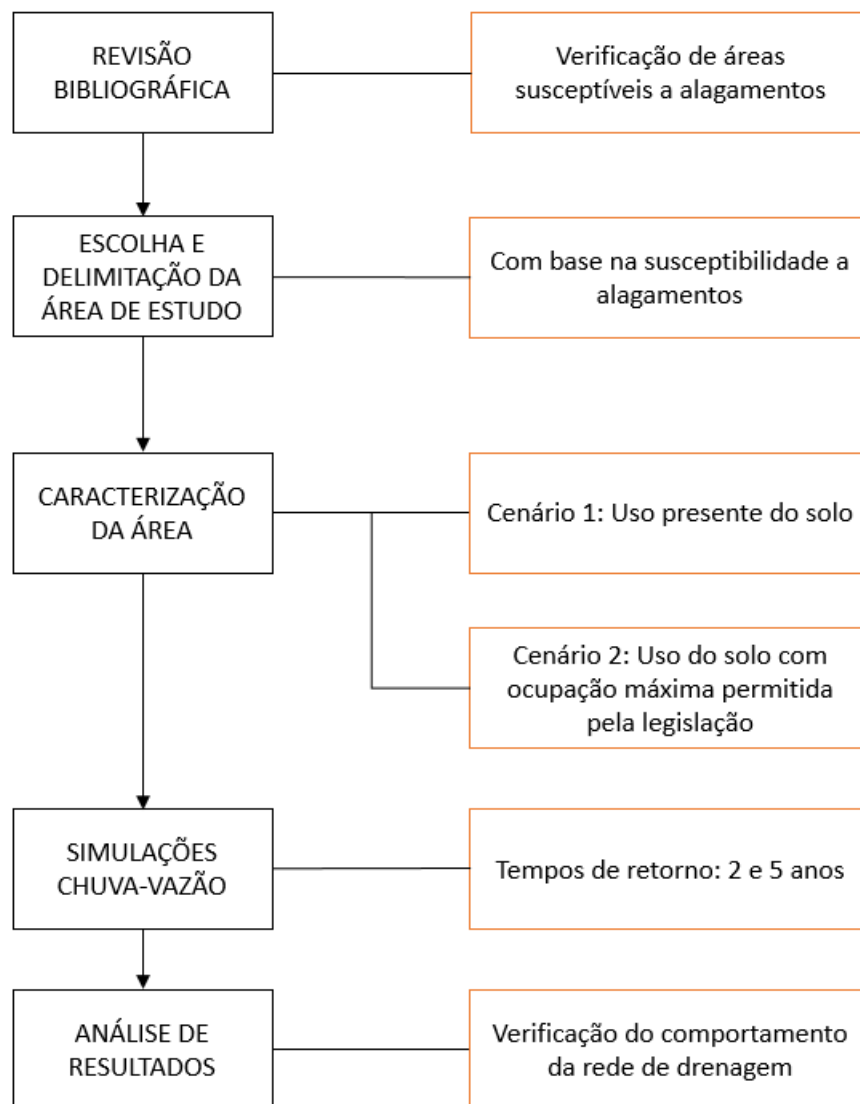
O SWMM também permite a introdução de controles de LID – Low Impact Development Practices que são representados pela combinação de camadas verticais, cujas propriedades são definidas por unidades de área. O SWMM pode modelar diferentes tipos genéricos de LID, dentre eles: células de bioretenção, pavimento poroso, trincheira de infiltração, cisternas e valas vegetadas, que podem ser combinadas numa mesma sub-bacia.

Tendo em vista as possíveis aplicações e características deste software, sua versão 5.1.012 foi escolhida para a realização das simulações visando realizar as verificações pretendidas. Nele, a bacia hidrográfica é representada por várias sub-bacias ligadas por canais através dos quais ocorre o escoamento. Os dados necessários à realização da simulação são: precipitação, dimensões da sub-bacia, coeficientes de rugosidade de Manning, declividade do terreno, áreas impermeáveis, dados do armazenamento em depressões e parâmetros de infiltrações.

4. METODOLOGIA

Visando atingir os objetivos do trabalho foi criado um roteiro que pode-se dividir em seis etapas, sendo elas: (i) revisão bibliográfica; (ii) escolha e delimitação das áreas de estudo; (iii) caracterização das áreas de estudo; (iv) simulações de chuva-vazão; (v) análise dos resultados e verificação da eficiência do sistema; (vi) avaliação de riscos e danos na região em estudo. Este processo é caracterizado pela figura 9 abaixo.

Figura 6 – Organograma da Metodologia Utilizada



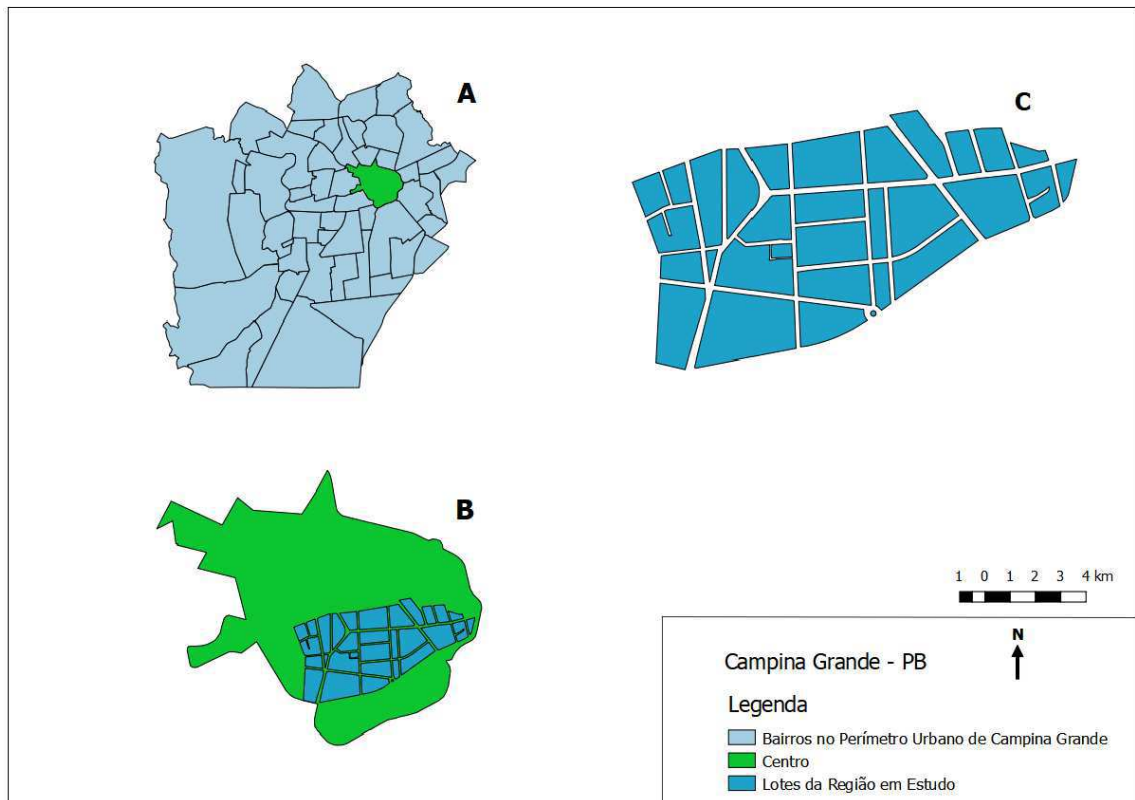
Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.1 DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A partir das bacias estudadas por Alves (2017), observou-se uma região com alto risco de inundação (segundo os critérios de Alves, 2017), e escolheu-se uma das áreas centrais de Campina Grande, que abrange aproximadamente 39.9 hectares densamente ocupados, em que é possível perceber a frequente ocorrência de alagamentos após eventos de chuva que deveriam ser suportados pelo sistema de drenagem local.

Além disso, no referido trabalho não foram considerados elementos de microdrenagem, neste sentido, a metodologia proposta no presente estudo, insere a influência destes elementos nos estudos de drenagem já desenvolvidos.

Figura 7 – Loteamento da Área de estudo; A) Perímetro Urbano de Campina Grande; B) Bairro Centro; C) Divisão por Lotes da Área



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 8 – Região em Estudo



Fonte: Google Earth Pro

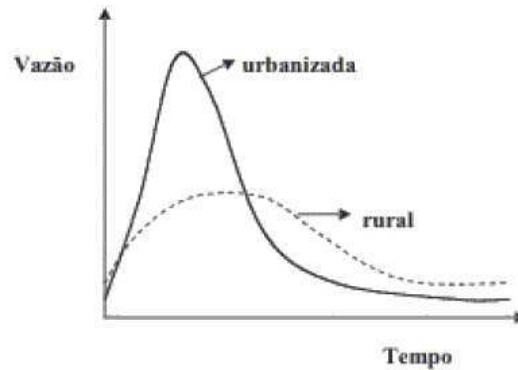
Nas últimas três décadas, Campina Grande tem passado por uma urbanização intensa, podendo-se observar considerável aumento da população em sua área urbana. Segundo o IBGE, este número passou de pouco mais de 300 mil a mais de 365 mil entre os anos de 1991 e 2010 como mostra a tabela 5. Esta característica, além de apontar para o processo acelerado de ocupação urbana que pode ser observado na cidade, mostra mais um motivo pelo qual a cidade, bem como sua região mais densamente ocupada, possui altos índices de escoamento superficial pois, como mostra a figura 10, a transição de um meio rural (ou não-urbanizado) para um meio urbanizado, devido à mudança na utilização do solo, causa aumento do pico de vazão escoada juntamente com a diminuição do tempo que se leva para que este ponto seja atingido.

Tabela 5 – Caracterização da População por Situação do Domicílio e Sexo

População residente, por situação do domicílio e sexo - 2010		
	Urbana	Rural
Total	367209	18004
Homens	173191	9014
Mulheres	194018	8990

Fonte: IBGE, Censo Demográfico 2010.

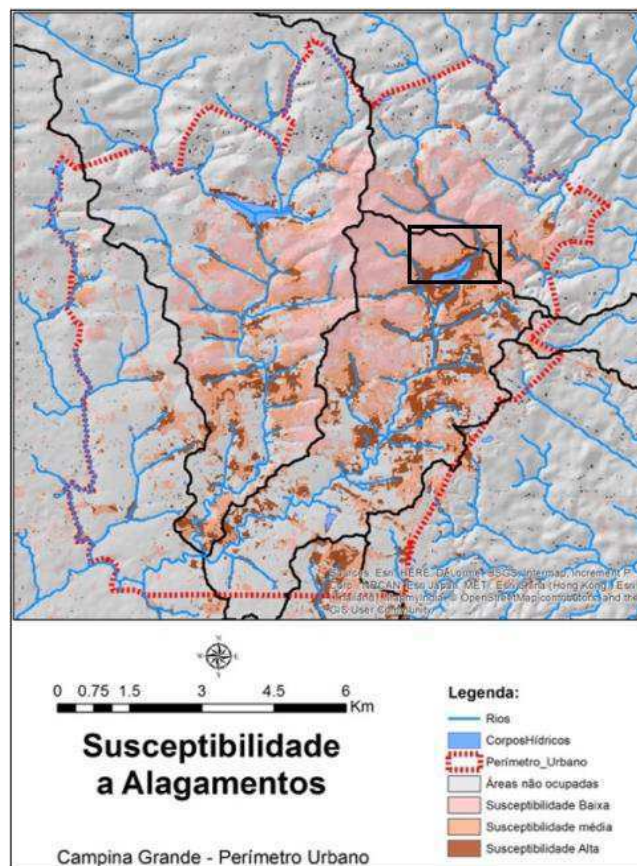
Figura 9 – Escoamento Superficial de uma Bacia Rural e Urbanizada



Fonte: Tucci (2007)

Segundo Alves (2017) a área citada apresenta alto índice de urbanização e impermeabilização do solo, cenário propício à alagamentos e inundações, o que acarretou em sua classificação como média a altamente susceptível a alagamentos.

Figura 10 – Mapa de Susceptibilidade a Alagamentos na Região de Campina Grande



Fonte: Adaptado de Alves (2017)

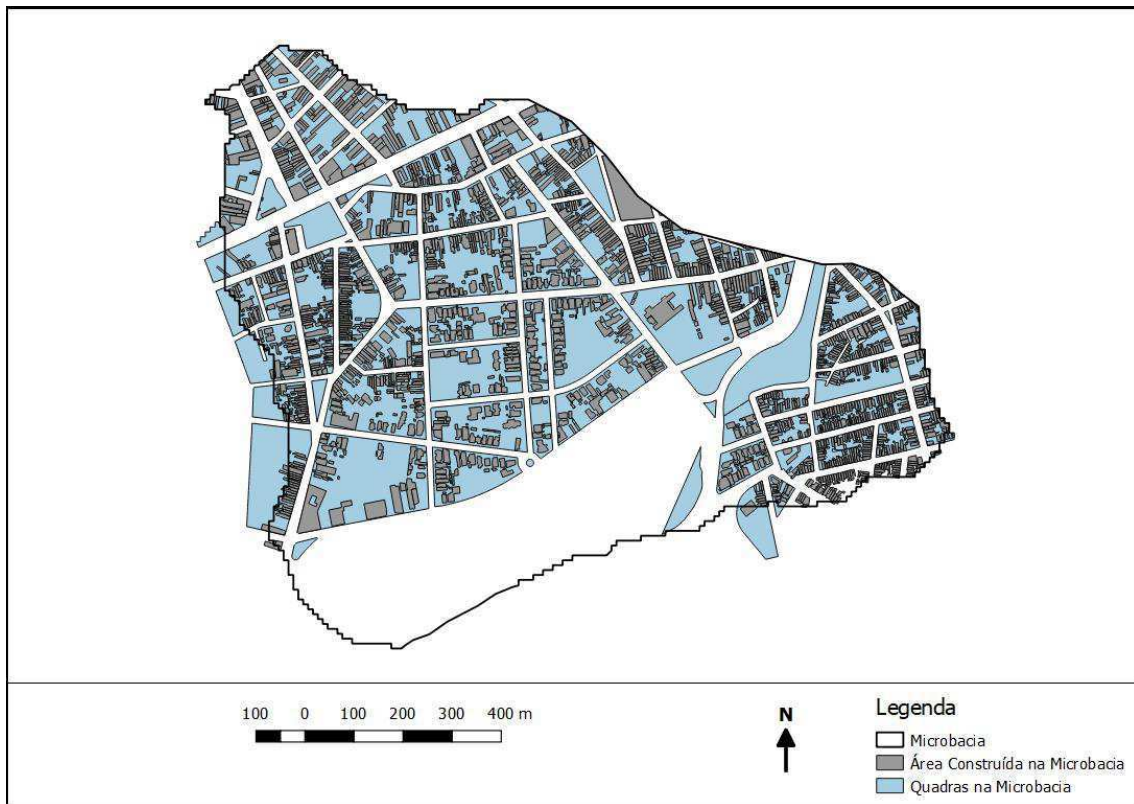
Rufino *et al.* (2015) mostram que a cidade de Campina Grande apesar de não enfrentar ainda graves problemas de alagamentos, já apresenta congestionamentos e problemas diversos de mobilidade urbana, típicos de cidades de médio porte. Estes problemas são agravados em períodos chuvosos, tanto pela ineficiência do sistema de drenagem existente, quanto pelo aumento da velocidade de escoamento das águas de chuva que tendem a escoar rapidamente para áreas mais baixas e planas, as quais também já se encontram impermeabilizadas por causa do crescimento acelerado da cidade. A análise e quantificação do processo de urbanização por bacia é de relevante importância ao planejamento da drenagem devido ao fato da impermeabilização interferir fortemente sobre o escoamento de águas pluviais.

O Plano Diretor da cidade classifica a área urbana de quatro diferentes formas: Zona de Expansão Urbana, Ocupação Dirigida, Qualificação Urbana e Recuperação Urbana, sendo toda a região central estudada classificada como de Qualificação Urbana, que é caracterizada como de uso múltiplo, sendo possível a intensificação do uso e ocupação do solo, em virtude de as condições físicas serem propícias e da existência de infraestrutura urbana consolidada. Tais características apontam, novamente, para uma situação propícia às cheias urbanas.

Quanto ao uso do solo, Alves (2017), por meio do uso de programas de programas que permitem o georreferenciamento, análise e classificação de diversos aspectos de áreas do meio urbano, classificou as quadras da microbacia em estudo como sendo mistas, por terem uso predominantemente dividido em residencial, comercial e institucional.

A partir da visualização de mapas temáticos, com dados em formato *shapefile* fornecidos pela PMCG e atualizados por Alves (2017), também é possível perceber a densidade da ocupação a que a microbacia está sujeita.

Figura 11 – Mapa com áreas edificadas e não edificadas de parte da microbacia do Prado



Fonte: Elaborada pelo Autor

Após o estudo das características da região em análise, elaboraram-se os cenários a que serão submetidas as simulações.

4.1.1 Cenário 1: Uso presente do solo

Este cenário tem como base o parâmetro real de utilização do solo observado em campo e dados adquiridos através da PMCG no que tange ao uso e nível de impermeabilização do solo, bem como o percentual de área impermeabilizada. Além disso, são levadas em consideração outras características das quadras para a realização das simulações, a saber: a área, largura, perímetro e declividade.

4.1.2 Cenário 2: Uso do solo com ocupação máxima permitida pela legislação

Para fins de comparação e mensuração do comportamento do sistema de microdrenagem em um cenário futuro, foi considerado o percentual máximo de impermeabilização do solo estabelecido pela legislação. O Código de Obras de Campina Grande prevê uma taxa de permeabilidade mínima de 20% da área do território, sendo assim a máxima taxa de impermeabilização de 80%. Tendo tal restrição em vista, foi considerada esta diferença com relação ao cenário 1: que todas os percentuais de área impermeável das quadras em estudo seriam de 80%.

4.1.3 Caracterização da microdrenagem da região

Estudos de caso previamente realizados em diversas áreas urbanizadas de Campina Grande (SANTOS, 2015; TSUYUGUCHI, 2015; ALVES, 2017; SANTOS *et al.*, 2017) e também especificamente na microbacia analisada neste trabalho caracterizam a microdrenagem da cidade como insuficiente para as chuvas de projeto a que são designados os sistemas de microdrenagem, apontando como algumas das causas principais deste problema a falta de um planejamento urbano sustentável, o alto grau de adensamento populacional sem uma política de incentivo às medidas compensatórias voltada não apenas para espaços públicos, mas também a empreendedores e moradores da cidade, bem como a mentalidade de desenvolvimento do sistema de drenagem urbana carente de conceitos como o da implantação de LID (Low Impact Development), que sugere o desenvolvimento com medidas que diminuam o impacto de novas construções à infraestrutura encontrada no local, presente em países mais desenvolvidos (ALVES, 2017).

A partir de visitas a campo, também foi observado que a infraestrutura responsável pela drenagem de águas pluviais, apesar de numerosa, apresenta problemas que vão além da poluição superficial advinda da presença da população que circula diariamente no local, chegando a ser possível observar, conforme mostra a figura 12:

- O acúmulo de lixo e sedimentos nos elementos de microdrenagem com pedras e pequenos blocos de pavimentos, juntamente com a situação precária ou inexistente da manutenção destes elementos;

- O escoamento ao longo da rede em dias não chuvosos, o que caracteriza a interferência do sistema de esgotamento sanitário das edificações vizinhas ao sistema de drenagem;

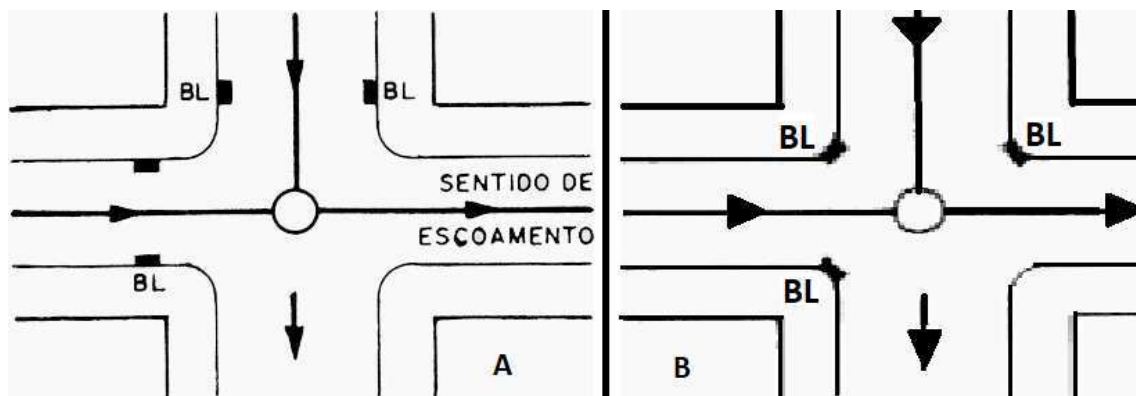
- A ausência ou má execução de um projeto detalhado da rede de drenagem urbana, dado o posicionamento incorreto das bocas de lobo nas vias, como mostra a figura 13, acarretando a ineficiência da atuação do sistema.

Figura 12 – Registros do estado dos elementos de microdrenagem de Campina Grande



Fonte: Autor, Setembro de 2017.

Figura 13 – Formas de posicionamento das bocas de lobo; A) Situação recomendada; B) Situação não recomendada



Fonte: Adaptado de Hiroshi (2003)

Após a caracterização da região, bem como a validação das informações verificadas através de visitas a campo, prosseguiu-se para a síntese dos dados necessários às simulações hidrológicas.

4.2 SIMULAÇÕES: PARÂMETROS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO

O SWMM (*Storm Water Management Model*) necessita de parâmetros físicos – características da microbacia e quadras – e hidrológicos – características da precipitação a ser utilizada no modelo – para a realização de simulações chuva-vazão. Uma vez inseridos os dados necessários, o software permite analisar quantitativa e qualitativamente o comportamento de cada sub-bacia em diferentes aspectos: quantidade de volume escoado, velocidade de escoamento, volume precipitado, entre outras características, juntamente com a resposta dos elementos de drenagem à precipitação.

Os dados de entrada para os dois cenários propostos neste trabalho são de obtenção idêntica, com exceção da área impermeabilizada de cada quadra. A seguir é detalhado o processo de síntese das características essenciais para a simulação.

4.2.1 Dados das quadras em estudo

As quadras – ou sub-bacias – são os elementos em que se subdivide uma microbacia na forma de processamento de dados do SWMM, sendo necessário informar

todos os dados requeridos de cada sub-bacia para a execução da simulação. Nas palavras de Rossman (2012), os objetos Sub-bacias são unidades hidrológicas de terreno cuja topografia e elementos do sistema de drenagem conduzem os escoamento diretamente para um único ponto de descarga; o usuário do programa divide a área de estudo em um número adequado de sub-bacias e identifica o ponto de saída de cada uma delas.

Estes dados estão sintetizados na tabela 6:

Tabela 6 – Parâmetro necessários para as simulações no SWMM

PARÂMETROS	SIGLA	UNIDADE
Área da quadra	S	ac
Largura da quadra	W	ft
Declividade da quadra	S	%
Áreas impermeáveis	AI	%
Coefficiente de rugosidade de Manning - Impermeáveis	NI	-
Coefficiente de rugosidade de Manning - Permeáveis	NP	-
Capacidade de armazenamento em depressões - Impermeáveis	DI	in
Capacidade de armazenamento em depressões - Permeáveis	DP	in
Áreas impermeáveis não conectadas	AINC	%

Fonte: Alves (2017)

Os dados geométricos das quadras, como área, perímetro, largura e declividade são aqueles medidos nos lotes representados na simulação. Estes dados, juntamente com o percentual de áreas impermeáveis e declividade média de cada sub-bacia foram obtidos com o auxílio de técnicas de processamento de dados georreferenciados no programa *QuantumGis*² versão 2.14.19 a partir de arquivos do tipo shapefile disponibilizados pela PMCG e atualizados por autores que realizaram estudos de caso anteriormente, como Alves (2017), Souza (2015) e Tsuyuguchi (2015).

O coeficiente de rugosidade de Manning diz respeito a facilidade – ou dificuldade – que determinada superfície oferece para que um fluido escoe sobre ela. Por meio de visitas a campo, visualização da área estudada pelo Google Earth e pela ortofoto de

² Projeto da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), disponível para download em: <<https://www.qgis.org/en/site/>>.

Campina Grande, percebeu-se pouca mudança entre os tipos de superfície observados, sendo caracterizado majoritariamente por áreas cobertas com telhados cerâmicos, asfalto liso e solos com vegetação natural. Este coeficiente tem grande variabilidade entre diferentes materiais, portanto foram utilizados valores recomendados pelo manual do SWMM para os tipos de superfície mais comumente encontradas conforme mostra a tabela 7:

Tabela 7 – Valores dos coeficientes de Manning

TIPO DE SUPERFÍCIE	COEFICIENTE
Asfalto liso	0,011
Concreto	0,012
Cerâmica	0,015
Superfície cimentada com pedregulhos	0,024
Solos com vegetação natural	0,04 – 0,08
Solo exposto	0,03

Fonte: Rossman (2012)

O parâmetro W representa uma característica geométrica da quadra e é definido pela relação entre a área do lote e a largura do retângulo equivalente. Feitosa (2015) descreve este parâmetro como a largura representativa da sub-bacia. O valor deste fator foi calculado de acordo com a equação abaixo (GARCIA, 2005):

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

$$kc = 0,282 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

$$W = \frac{A}{le} \quad (3)$$

Em que: le = largura do retângulo equivalente;

kc = coeficiente de compacidade;

A = área da quadra;

P = perímetro da quadra;

As capacidades de armazenamento em depressões de áreas permeáveis e impermeáveis – DI e DP – são entendidas pelo software como a profundidade de armazenamento cujo tipo de área possui. Estes parâmetros, juntamente com o de áreas impermeáveis não conectadas – AINC – que diz respeito às áreas impermeáveis sem capacidade de armazenamento de águas pluviais, foram calibrados por Nóbrega (2012) para a cidade de Campina Grande.

Tabela 8 – Valores de DI, DP e AINC

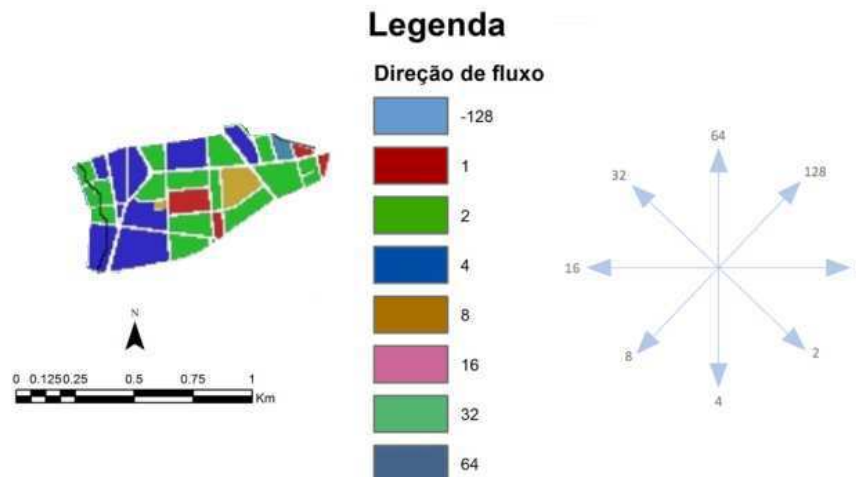
PARÂMETROS	VALORES
Capacidade de armazenamento em depressões - Impermeáveis	1,01mm
Capacidade de armazenamento em depressões - Permeáveis	5,08 mm
Áreas impermeáveis não conectadas	10%

Fonte: Adaptado de Nóbrega (2012)

Seguindo o citado anteriormente, as quadras – entendidas como sub-bacias no SWMM – seguem o princípio hidrológico de que cada bacia deve ter apenas um exutório, podendo ser este um nó (entendido como boca de lobo) ou mesmo uma outra sub-bacia. Assim, é necessário direcionar o fluxo do escoamento de cada quadra e nó para que sejam realizadas as simulações.

Os dados de direção de fluxo na bacia foram obtidos por Alves (2017) através de um processo de delimitação automática de bacia hidrográfica desenvolvido no ambiente ArcGIS, juntamente com as extensões *Spatial Analyst e Hydrology Modeling* (ESRI) e estão sintetizados no mapa da figura 14.

Figura 14 – Direções de fluxo majoritária das quadras do Prado



Fonte: Adaptado de Alves (2017)

4.2.2 Dados de infiltração e precipitação

O software utilizado para as simulações dispõe de três métodos para a inserção dos dados de infiltração de água no solo, que são: as Equações de *Horton*, o *Método de Green-Ampt* e o *Método SCS*. Cada forma necessita de dados para calibração da simulação, sendo necessário ao usuário escolher um dos métodos e realizar o input nos dados que o método requer. Para tanto, devido à proximidade geográfica, bem como a carência de dados para a região em estudo, foram utilizados os dados obtidos por Paixão *et al.* (2009) que através de uma pesquisa em Lagoa Seca – PB, município vizinho a Campina Grande, desenvolveram uma pesquisa que encontrou os valores de capacidade de infiltração inicial (mm/h), final (mm/h) e constante de decaimento (1/h) para a Equação de Horton.

O gráfico da equação de Horton mostra que a infiltração é maior na parte inicial e cresce cada vez menos ao longo do tempo, chegando assim a um patamar constante. Para a síntese gráfica do método, Horton propõe a seguinte relação:

$$f_p = f_f + (f_o - f_f) \times e^{-kt} \quad (4)$$

Em que: f_p = taxa de infiltração no tempo (cm/h);

f_f = taxa de infiltração mínima (cm/h);

f_o = taxa de infiltração inicial (cm/h);

k = constante da exponencial;

t = tempo médio do intervalo

Após os testes realizados na pesquisa supracitada, os autores obtiveram os parâmetros presentes na tabela abaixo, utilizados neste trabalho:

Tabela 9 – Valores utilizados para a Equação de *Horton*

CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO INICIAL (mm/h)	CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO FINAL (mm/h)	CONSTANTE DE DECAIMENTO (1/h)
396,10	7,10	2,677

Fonte: Paixão *et al.* (2009)

Os dados da chuva a serem utilizados pela simulação no software baseia-se no conceito de tempo de recorrência – ou tempo de retorno, que segundo Collischonn e Dornelles (2013) também pode ser definido como uma probabilidade de que esse evento venha a ser igualado ou superado em um ano qualquer.

Os tempos de retorno para as diferentes finalidades de projeto foram definidos por Tucci e Bertoni (2003), que definiram este parâmetro para a microdrenagem, macrodrenagem e zoneamento de áreas ribeirinhas conforme mostrado na tabela 10. Para este trabalho foram utilizados os tempos de retorno de dois e cinco anos pois o tipo de sistema que se estuda, é majoritariamente residencial e comercial.

Tabela 10 – Tempos de retorno para diferentes finalidades de projeto

SISTEMA	CARACTERÍSTICA	INTERVALO (Anos)	VALOR USUAL (Anos)
Microdrenagem	Residencial/ Comercial	2 – 5	2
	Prédios Públicos	2 – 5	5
	Aeroporto	2 – 5	5
	Áreas comerciais e avenidas	5 – 10	5
	5 – 10	5 – 10	10
Macrodrenagem	10 – 25	10 – 25	10
Zoneamento de áreas ribeirinhas	5 - 100	5 - 100	100

Fonte: Tucci e Bertoni (2003)

A simulação hidrológica permite a análise através de mapas em momentos “imediatamente após” e “com diferentes tempos de recuperação” depois da chuva, e portanto, é possível verificar o comportamento das quadras analisadas no decorrer do tempo. Tendo isso em vista, outro importante conceito, fundamental para a análise dos resultados das simulações, é o de tempo de recuperação de uma bacia, que é definido por Santos (2015) como o tempo necessário para que ela retorne a suas condições iniciais antes de ocorrer a precipitação.

No que diz respeito à calibração dos dados de precipitação no programa, é preciso inseri-los no modelo requerido pelo SWMM, que é em forma de uma série temporal de chuva. De acordo com o processamento destes dados, o software determinará características como vazão e volume escoado tanto nas quadras como nos elementos de drenagem nele inseridos.

Neste sentido, é necessária uma estimativa de dados de precipitação ao longo do tempo para o input no software. Para esta finalidade utilizou-se a equação geral da curva IDF de Campina Grande, cujos parâmetros necessários foram calculados por Aragão (2000) através da equação genérica de intensidade. Os dados obtidos nesta pesquisa estão indicados na tabela 11, bem como a equação genérica para curvas IDF está representada abaixo:

Tabela 11 – Coeficientes da curva IDF em Campina Grande – PB

K	B	n	m
334	5	0,596	0,227

Fonte: Aragão (2000)

Equação da curva IDF:

$$i = \frac{K \times T_r^m}{(t+b)^n} \quad (5)$$

Em que: i = intensidade em mm/h;

T_r = tempo de retorno em anos;

t = duração da chuva em minutos;

K, b, m, n são os parâmetros locais obtidos por Aragão (2000)

A partir da equação com os parâmetros calibrados, foram gerados os valores da precipitação acumulada em mm no SWMM utilizando um passo (intervalo de tempo que o programa usa para visualização da situação durante e após a chuva) de 5 minutos. Estes valores e os gráficos que caracterizam o comportamento da precipitação no tempo estão na tabela 12 e figura 15 respectivamente.

O tempo de concentração (t_c) é o tempo que leva para que o escoamento chegue até o exutório, a partir do ponto hidráulicamente mais distante. Segundo Collischonn & Dornelles (2013), a duração de uma chuva de projeto deve ser definida de forma a garantir que toda a bacia esteja contribuindo ao mesmo tempo com o escoamento que chega ao exutório da bacia. Por esse motivo, a duração da chuva de projeto deve ser igual ou superior ao tempo de concentração da bacia.

Para o cálculo do tempo de concentração da bacia em estudo, foi utilizada a fórmula de Kirpich, representada abaixo, que determina este parâmetro a partir de uma relação entre comprimento e declividade do talvegue da bacia. Os dados necessários à

obtenção do tempo foram obtidos a partir do processamento de dados fornecidos pela PMCG e Tsuyuguchi (2015) no programa *QuantumGis*.

Fórmula de Kirpich:

$$tc = 0,019 \times L^{0,77} / S^{0,385} \quad (6)$$

Em que: tc = tempo de concentração em minutos;

L = comprimento do talvegue em metros;

S = declividade do talvegue em m/m.

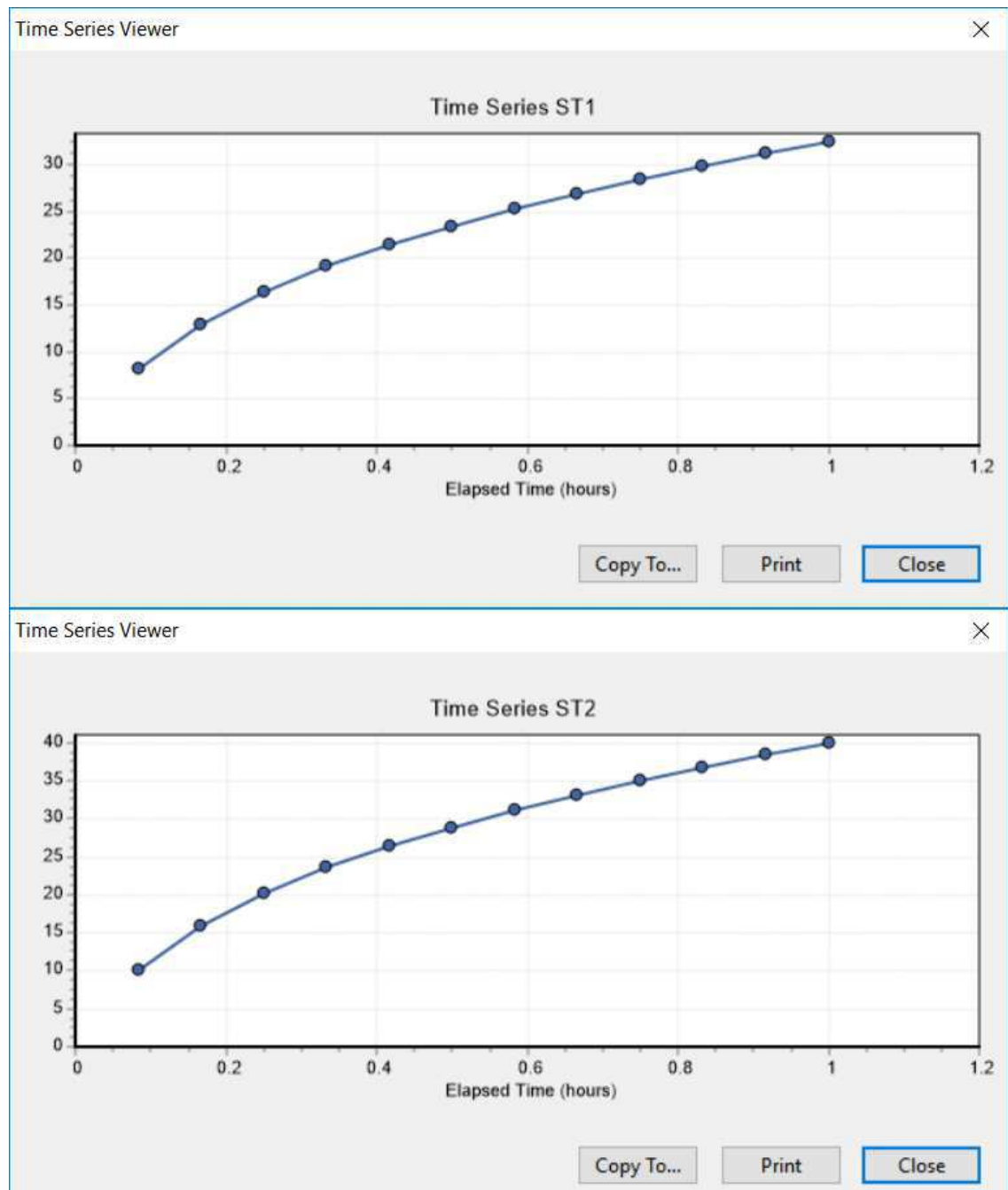
O resultado obtido foi de aproximadamente 30 minutos. Então, foi definido o tempo de concentração como sendo uma hora, maior do que o tempo de calculado para que toda a bacia contribuísse para o exutório.

Tabela 12 – Valores da precipitação acumulada em mm

Tempo (minutos)	Precipitação acumulada para TR de 2 anos (mm)	Precipitação acumulada para TR de 5 anos (mm)
5	8.26	10.17
10	12.97	15.97
15	16.39	20.18
20	19.13	23.56
25	21.45	26.41
30	23.48	28.91
35	25.30	31.15
40	26.96	33.19
45	28.48	35.07
50	29.90	36.81
55	31.23	38.45
60	32.48	39.99

Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 15 – Gráficos do comportamento das precipitações ao longo do tempo com TR de 2 anos e TR de 5 anos em mm



Fonte: Elaborada com o auxílio do SWMM 5.1

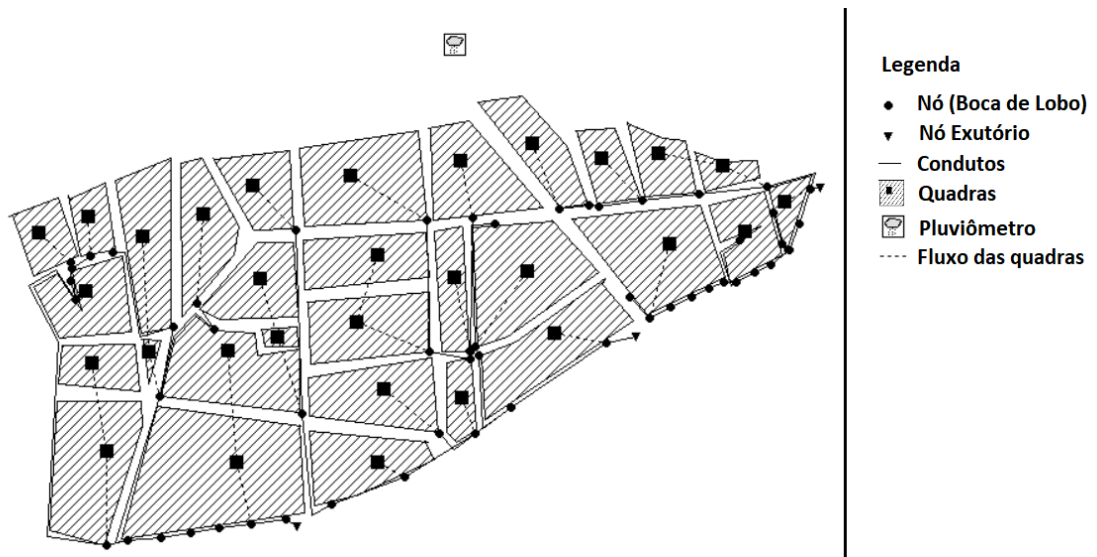
4.2.3 Dados da microdrenagem da área de estudo

Existem três tipos de elementos de microdrenagem disponíveis para inserção e edição de características no SWMM, são eles: os condutos, que podem representar as galerias pluviais, sarjetas e canais; os nós, que representam as bocas de lobo e poços de

visita; e os nós exutórios, que representam o ponto de saída da microdrenagem para um leito ou para a rede de macrodrenagem – no caso deste trabalho, para o açude velho ou canal do Prado.

A obtenção de dados desta etapa se deu através de visitas a campo, onde foram observados os tamanhos e quantidade de bocas de lobo. A partir desta coleta de dados foi realizado o input dos nós no SWMM, caracterizando o mapa da simulação como disposto na figura 16. Para a inserção das características geométricas individuais de cada nó, o programa dispõe a opção “*Ponded Area*”, que representa a área de alagamento, em metros quadrados, acima do nó quando o conduto a ele ligado entra em sobrecarga, sendo assim diferenciado cada nó (neste caso a boca de lobo) de acordo com seu tamanho, inserido nesta configuração.

Figura 16 – Mapa da simulação concluído após a coleta de dados



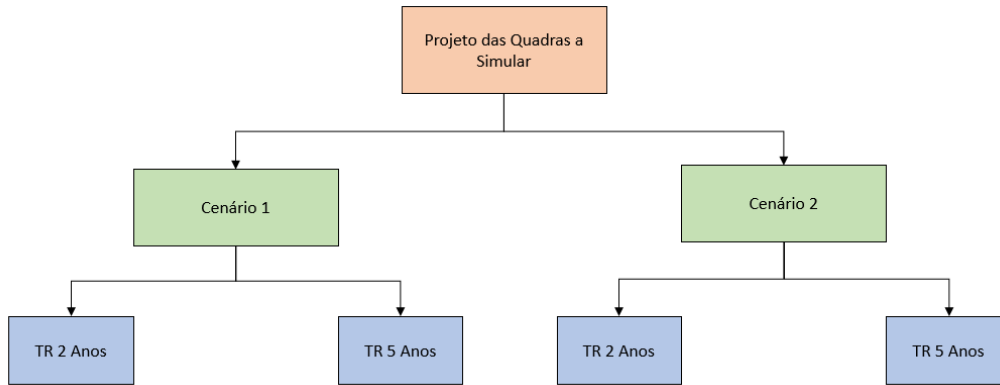
Fonte: Elaborada pelo Autor com auxílio do SWMM 5.1

Devido à impossibilidade de obtenção dos projetos de drenagem da área em estudo, os dados de declividade, dimensões internas e profundidade de assentamento dos condutos foram adotados de acordo com a NBR 9649/1986 e manual do SWMM (2015).

Para a obtenção do comprimento dos condutos presentes na simulação foi utilizada a ferramenta “*auto-length*” do programa que, a partir do georreferenciamento da imagem utilizada para a criação do mapa das quadras com coordenadas UTM, calcula automaticamente o comprimento dos condutos como sendo a distância entre os dois nós a ele ligados.

Para um melhor entendimento das etapas metodológicas segue um fluxograma sintetizando os cenários de realização das simulações na figura 17:

Figura 17 – Fluxograma das simulações realizadas para análise de resultados



Fonte: Elaborada pelo Autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o processo de calibração do modelo em cada cada sub-bacia, foram realizadas as simulações nas quatro situações propostas na terceira linha do fluxograma apresentado na figura 17, cada uma com suas características de utilização do solo e tempo de retorno da precipitação, sendo o tempo de recuperação da microbacia como um todo, o equivalente a 30 minutos.

Para fins de análise da eficiência do sistema de microdrenagem, foram observados alguns parâmetros resultados da simulação no SWMM, que são: (i) escoamento superficial na sub-bacia, (ii) escoamento recebido pelos nós e (iii) velocidade do escoamento nos condutos, sendo o primeiro parâmetro analisado para os 30 minutos após cessar o evento chuvoso, e os dois últimos parâmetros aos 15 minutos de duração da precipitação, pois é o cenário mais crítico observado, e que no caso de novos projetos, deve ser levado em consideração. Ao total, foram representadas 30 quadras, 54 nós (bocas de lobo), 3 nós exutórios e 54 condutos.

5.1 CENÁRIO 1: OCUPAÇÃO PRESENTE DO SOLO

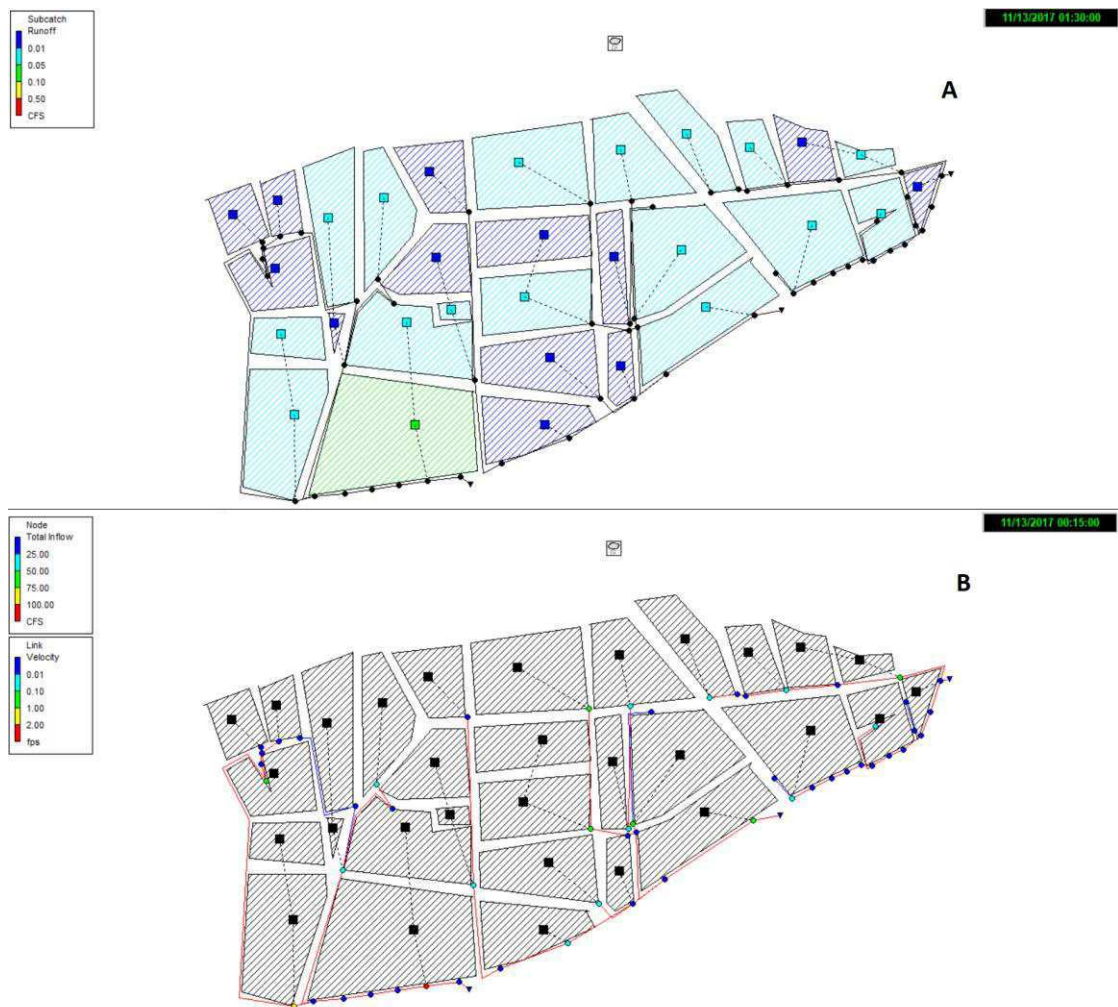
- Simulações para o tempo de retorno de 2 anos:

Nesta situação, cuja precipitação é de menor intensidade, juntamente com menores coeficientes de impermeabilização, conseqüentemente foram observados resultados de menor valor nos parâmetros supracitados.

Em suma, para estas condições de simulação, os parâmetros em análise são descritos abaixo e ilustrados na figura 18:

- Escoamento superficial na sub-bacia: Não apresenta valores altos, sendo possível observar apenas uma quadra com potencial de alagamento;
- Escoamento recebido pelos nós: Apenas um nó está em situação crítica e um na iminência de entrar no caso crítico;
- Velocidade do escoamento nos condutos: A maior parte dos condutos mostra velocidades classificadas como críticas, fato que ocorre, dentre outros fatores, devido a declividade do terreno.

Figura 18 – Resultados para o Cenário 1, TR 2 anos; A) Escoamento superficial das quadras; B) Escoamento nos nós e velocidade nos condutos



Legenda:

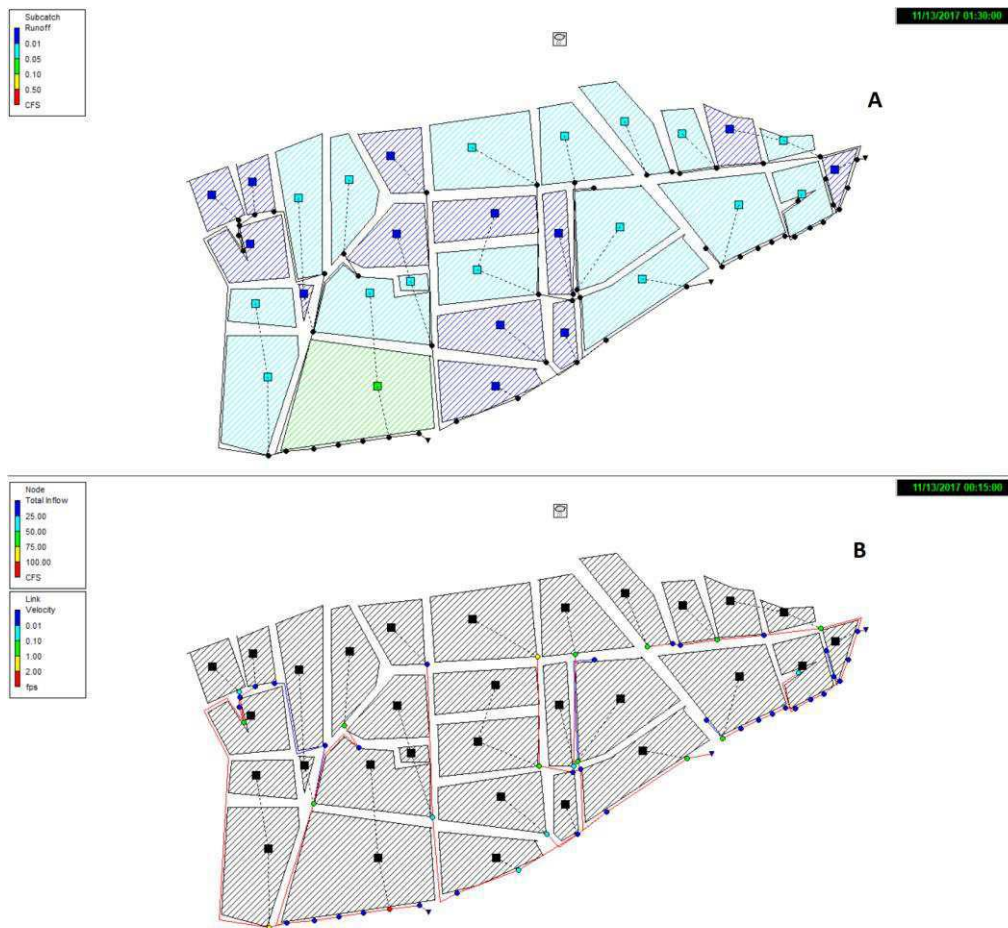
Escoamento das quadras	Escoamento total nos nós	Velocidade nos condutos
Menor que 0.01 pés ³ /s ou 0.0002 m ³ /s	Menor que 25 pés ³ /s ou 0.708 m ³ /s	Menor que 0.01 pés/s ou 0.003 m/s
Entre 0.01 pés ³ /s e 0.05 pés ³ /s ou 0.0002 m ³ /s e 0.001 m ³ /s	Entre 25 pés ³ /s e 50 pés ³ /s ou 0.708 m ³ /s e 1.416 m ³ /s	Entre 0.01 pés/s e 0.1 pés/s ou 0.003 m/s e 0.03 m/s
Entre 0.05 pés ³ /s e 0.10 pés ³ /s ou 0.001 m ³ /s e 0.002 m ³ /s	Entre 50 pés ³ /s e 75 pés ³ /s ou 1.416 m ³ /s e 2.124 m ³ /s	Entre 0.1 pés/s e 1.0 pés/s ou 0.03 m/s e 0.305 m/s
Entre 0.10 pés ³ /s e 0.5 pés ³ /s ou 0.002 m ³ /s e 0.014 m ³ /s	Entre 75 pés ³ /s e 100 pés ³ /s ou 2.124 m ³ /s e 2.832 m ³ /s	Entre 1.0 pés/s e 2.0 pés/s ou 0.305 m/s e 0.610 m/s
Maior que 0.5 pés ³ /s ou 0.014 m ³ /s	Maior que 100 pés ³ /s ou 2.832 m ³ /s	Maior que 2 pés/s ou 0.610 m/s

- Simulações para o tempo de retorno de 5 anos:

Apesar de possuir maior volume de precipitação acumulada durante o tempo da chuva, semelhantemente ao que foi possível observar para o primeiro caso, os resultados observados nos três parâmetros em análise apresentam baixos índices, de forma que os

escoamentos superficiais aumentam, mas não o suficiente para serem classificados diferentemente, a velocidade nos condutos apresenta a mesma classificação, e existem poucas alterações quanto ao escoamento recebido pelos nós, em que é possível ver que apenas mais um nó passou a ser classificado como na iminência do escoamento crítico, o que indica que para o cenário atual de uso do solo, considerando um estado perfeito de conservação, não observado na realidade, o sistema de microdrenagem está moderadamente adequado. Os resultados no mapa gerado pelo SWMM estão ilustrados na figura 19:

Figura 19 – Resultados para o Cenário 1, TR 5 anos; A) Escoamento superficial das quadras; B) Escoamento nos nós e velocidade nos condutos



Legenda:

Escoamento das quadras	Escoamento total nos nós	Velocidade nos condutos
Menor que 0.01 pés ³ /s ou 0.0002 m ³ /s	Menor que 25 pés ³ /s ou 0.708 m ³ /s	Menor que 0.01 pés/s ou 0.003 m/s
Entre 0.01 pés ³ /s e 0.05 pés ³ /s ou 0.0002 m ³ /s e 0.001 m ³ /s	Entre 25 pés ³ /s e 50 pés ³ /s ou 0.708 m ³ /s e 1.416 m ³ /s	Entre 0.01 pés/s e 0.1 pés/s ou 0.003 m/s e 0.03 m/s
Entre 0.05 pés ³ /s e 0.10 pés ³ /s ou 0.001 m ³ /s e 0.002 m ³ /s	Entre 50 pés ³ /s e 75 pés ³ /s ou 1.416 m ³ /s e 2.124 m ³ /s	Entre 0.1 pés/s e 1.0 pés/s ou 0.03 m/s e 0.305 m/s
Entre 0.10 pés ³ /s e 0.5 pés ³ /s ou 0.002 m ³ /s e 0.014 m ³ /s	Entre 75 pés ³ /s e 100 pés ³ /s ou 2.124 m ³ /s e 2.832 m ³ /s	Entre 1.0 pés/s e 2.0 pés/s ou 0.305 m/s e 0.610 m/s
Maior que 0.5 pés ³ /s ou 0.014 m ³ /s	Maior que 100 pés ³ /s ou 2.832 m ³ /s	Maior que 2 pés/s ou 0.610 m/s

5.2 CENÁRIO 2: LIMITE MÁXIMO DE OCUPAÇÃO DO LOTE PERMITIDO PELA LEGISLAÇÃO

- Simulações para o tempo de retorno de 2 anos:

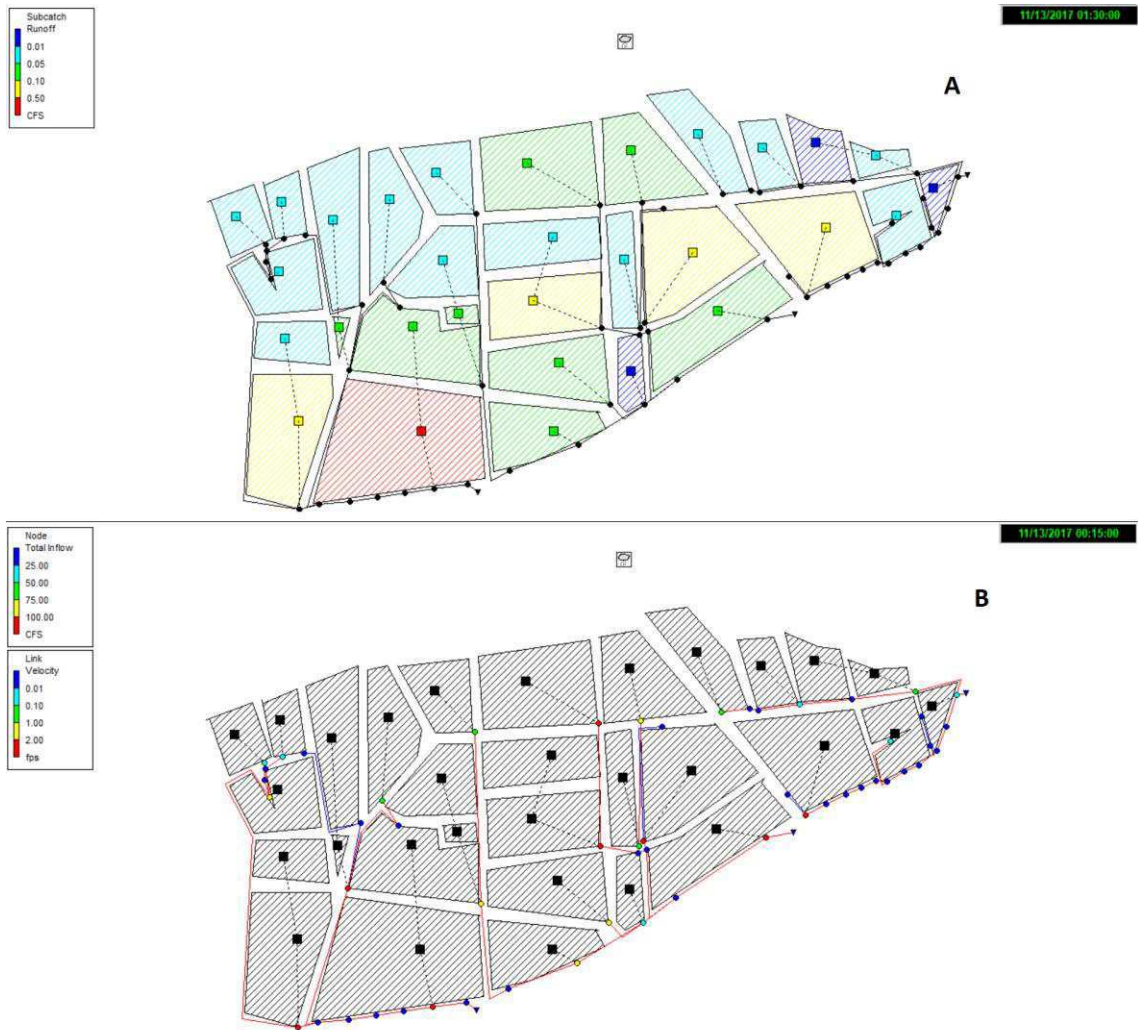
Para o segundo cenário proposto, com o percentual máximo de impermeabilização do solo permitido pela legislação de Campina Grande, é possível observar maiores alterações nos valores dos parâmetros em análise, ilustrados na figura 20, e de forma que pode-se descrever as características destes resultados como:

- Escoamento superficial na sub-bacia: Apresenta valores consideravelmente maiores, em que o escoamento de uma bacia passou a ser crítico e quatro outras se encontram na iminência desta classificação, denotando um cenário com alta possibilidade de alagamento;
- Escoamento recebido pelos nós: Mostra uma brusca alteração com relação ao primeiro cenário, em que pode-se observar um aumento para oito nós em situação crítica e cinco próximos a este caso;
- Velocidade do escoamento nos condutos: Novamente foi observado que a maior parte dos condutos apresenta velocidades críticas de escoamento, não apresentando diferença com relação ao primeiro cenário.

- Simulações para o tempo de retorno de 5 anos:

Da mesma forma que ocorreu para o cenário 1, a diferença entre os dois casos do cenário 2 não é significativa, e novamente, poucas são as alterações nas classificações dos parâmetros analisados. A classificação das quadras quanto ao escoamento superficial nelas observado não mudou, o que também aconteceu para a velocidade nos condutos, que foram classificados da mesma forma. O único parâmetro em que as alterações foram mais sensíveis ao programa foi o de escoamento recebido pelos nós, que mostrou um acréscimo de cinco nós em situação crítica, totalizando treze, e dois nós na iminência desta situação. Os resultados mapeados pelo SWMM estão representados na figura 21.

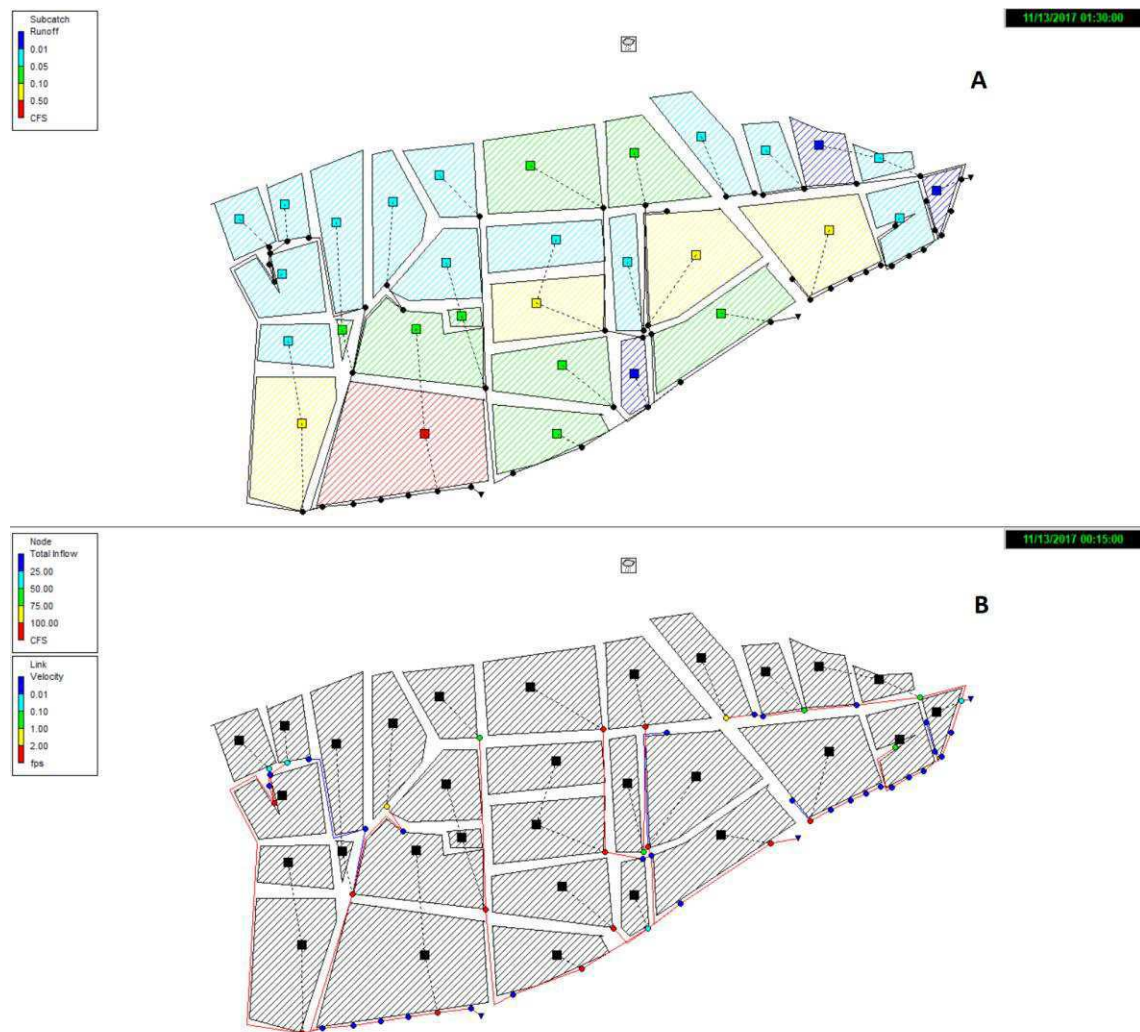
Figura 20 – Resultados para o Cenário 2, TR 2 anos; A) Escoamento superficial das quadras; B) Escoamento nos nós e velocidade nos condutos



Legenda:

Escoamento das quadras	Escoamento total nos nós	Velocidade nos condutos
Menor que 0.01 pés ³ /s ou 0.0002 m ³ /s	Menor que 25 pés ³ /s ou 0.708 m ³ /s	Menor que 0.01 pés/s ou 0.003 m/s
Entre 0.01 pés ³ /s e 0.05 pés ³ /s ou 0.0002 m ³ /s e 0.001 m ³ /s	Entre 25 pés ³ /s e 50 pés ³ /s ou 0.708 m ³ /s e 1.416 m ³ /s	Entre 0.01 pés/s e 0.1 pés/s ou 0.003 m/s e 0.03 m/s
Entre 0.05 pés ³ /s e 0.10 pés ³ /s ou 0.001 m ³ /s e 0.002 m ³ /s	Entre 50 pés ³ /s e 75 pés ³ /s ou 1.416 m ³ /s e 2.124 m ³ /s	Entre 0.1 pés/s e 1.0 pés/s ou 0.03 m/s e 0.305 m/s
Entre 0.10 pés ³ /s e 0.5 pés ³ /s ou 0.002 m ³ /s e 0.014 m ³ /s	Entre 75 pés ³ /s e 100 pés ³ /s ou 2.124 m ³ /s e 2.832 m ³ /s	Entre 1.0 pés/s e 2.0 pés/s ou 0.305 m/s e 0.610 m/s
Maior que 0.5 pés ³ /s ou 0.014 m ³ /s	Maior que 100 pés ³ /s ou 2.832 m ³ /s	Maior que 2 pés/s ou 0.610 m/s

Figura 21 – Resultados para o Cenário 2, TR 2 anos; A) Escoamento superficial das quadras; B) Escoamento nos nós e velocidade nos condutos



Legenda:

Escoamento das quadras	Escoamento total nos nós	Velocidade nos condutos
Menor que 0.01 pés ³ /s ou 0.0002 m ³ /s	Menor que 25 pés ³ /s ou 0.708 m ³ /s	Menor que 0.01 pés/s ou 0.003 m/s
Entre 0.01 pés ³ /s e 0.05 pés ³ /s ou 0.0002 m ³ /s e 0.001 m ³ /s	Entre 25 pés ³ /s e 50 pés ³ /s ou 0.708 m ³ /s e 1.416 m ³ /s	Entre 0.01 pés/s e 0.1 pés/s ou 0.003 m/s e 0.03 m/s
Entre 0.05 pés ³ /s e 0.10 pés ³ /s ou 0.001 m ³ /s e 0.002 m ³ /s	Entre 50 pés ³ /s e 75 pés ³ /s ou 1.416 m ³ /s e 2.124 m ³ /s	Entre 0.1 pés/s e 1.0 pés/s ou 0.03 m/s e 0.305 m/s
Entre 0.10 pés ³ /s e 0.5 pés ³ /s ou 0.002 m ³ /s e 0.014 m ³ /s	Entre 75 pés ³ /s e 100 pés ³ /s ou 2.124 m ³ /s e 2.832 m ³ /s	Entre 1.0 pés/s e 2.0 pés/s ou 0.305 m/s e 0.610 m/s
Maior que 0.5 pés ³ /s ou 0.014 m ³ /s	Maior que 100 pés ³ /s ou 2.832 m ³ /s	Maior que 2 pés/s ou 0.610 m/s

Para melhor visualização, foi elaborado um quadro síntese dos resultados, no qual por motivos de que não houve alteração sob qualquer mudança de cenário ou tempo de retorno da precipitação, não foi incluída a situação dos condutos.

Tabela 13 – Quadro síntese dos resultados

RESULTADOS					
Aos 15 minutos de precipitação			30 minutos após cessar a precipitação		
Nós em situação crítica			Quadras em situação crítica		
Total: 54	TR 2 Anos	TR 5 Anos	Total: 30	TR 2 Anos	TR 5 Anos
Cenário 1	1	1	Cenário 1	0	0
Cenário 2	8	13	Cenário 2	1	1
Nós em situação semi-crítica			Quadras em situação semi-crítica		
Total: 54	TR 2 Anos	TR 5 Anos	Total: 30	TR 2 Anos	TR 5 Anos
Cenário 1	1	2	Cenário 1	0	0
Cenário 2	5	2	Cenário 2	4	4

Percebe-se, ao analisar os resultados apresentados, a representatividade do sistema de microdrenagem no SWMM, bem como a necessidade de um replanejamento do plano de desenvolvimento da drenagem urbana da cidade diante da fragilidade da capacidade da rede de drenagem quando analisada no cenário proposto como limite pela legislação em dias atuais.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou analisar o comportamento de parte da bacia hidrográfica do Riacho do Prado, sendo localizada no bairro do Centro em Campina Grande – PB, e também avaliar a eficiência dos elementos de microdrenagem presentes nesta área lançando mão do uso de técnicas de geoprocessamento, modelagem hidrológica do tipo chuva-vazão e simulações hidrológicas em softwares.

Os dados obtidos dos estudos neste trabalho citados se mostraram essenciais em todas as etapas metodológicas, tanto para calibração do modelo computacional, como para a síntese e representação digital de dados observados em campo.

Através da observação dos resultados, bem como de todo o processo metodológico empregado neste trabalho, percebe-se a utilidade ao planejamento e desenvolvimento da infraestrutura urbana, que um SIG – Sistema de Informações Geográficas, bem como *softwares* que permitem a modelagem hidrológica podem ter. As análises e simulações possibilitadas por estes sistemas, que integram diferentes informações e podem gerar resultados que sem o seu uso, estariam distantes da percepção do planejador, principalmente em um cenário de necessidade de adaptações do sistema de drenagem já projetado e/ou executado. Assim, a utilização destes programas se constituem em uma importante ferramenta de auxílio ao planejamento da infraestrutura urbana e de adaptação de sistemas urbanos frente à mudanças do regime de chuvas como aumento de intensidade da precipitação concentrada causada frequentemente pelo fenômeno “ilha de calor” nas cidades.

Os resultados obtidos a partir das simulações no programa SWMM se mostraram consistentes com os cenários propostos, apresentando mudanças de acordo com o input de dados que foi realizado em cada caso. A partir da análise dos resultados representados em mapas gerados pelo software, foi possível identificar os pontos críticos nos parâmetros estudados, os quais devem receber maior atenção para as conclusões e proposições de medidas para soluções.

A comparação dos índices nos parâmetros observados nos dois cenários propostos mostra que o nível de impermeabilização do solo causado, entre outras coisas, pelo adensamento populacional que se observa no centro da cidade, se constitui em uma grande influência no processo de transformação de chuva em vazão, exercendo mais modificações nos resultados de escoamento superficial e volumes escoados para os nós do que a mudança do tempo de retorno da precipitação. Este fato permite concluir,

primeiramente, que a atual rede de microdrenagem tem capacidade insuficiente de drenar os escoamentos produzidos por precipitações cujos tempos de retorno deveriam ser suportados pelo sistema; e depois, que é essencial uma revisão da taxa de impermeabilização proposta pela legislação da cidade de Campina Grande, analisando a possibilidade de modificação do valor proposto, ou mesmo o incentivo de medidas que compensem o nível de impermeabilização do solo a nível de lote (técnicas compensatórias de drenagem urbana), ou mesmo para cada tipo de uso do solo em determinada área.

As condições observadas nos resultados dos parâmetros de escoamento nos nós e velocidade nos condutos, juntamente com a precariedade do estado físico destes elementos observados em campo e ilustrados neste trabalho, a interferência externa de pontos de esgoto sanitário que contribuem para o escoamento em parte do sistema de drenagem, e a presença visível de sedimentos nos elementos da rede, também se mostram como causa da ineficiência da atual rede de microdrenagem da região, carecendo de medidas que atenuem os índices obtidos com a simulação.

Quando comparados com os resultados obtidos por Alves (2017), que realizou simulações numa área que abrangia todas as quadras objeto deste trabalho, percebe-se alterações que podem ser observadas devido a mudança de aspectos como:

- Área de contribuição: A área simulada pelo referido trabalho compreendeu toda a microbacia que contribui para a região objeto de estudo deste trabalho, enquanto nas simulações aqui observadas, apenas parte da microbacia foi levada em consideração. Esta diferença pode causar mudanças nos escoamentos contribuintes para as quadras representadas neste trabalho, que passam a não receber contribuição dos volumes escoados das quadras à montante;
- Detalhamento da rede de microdrenagem: Devido à evidente inviabilidade de obter dados detalhados a partir de visitas a campo e por parte dos órgãos competentes da microdrenagem, os detalhes dos elementos atualizados no presente trabalho, nos nós e condutos, variam com os utilizados por Alves (2017).
- Direcionamento da contribuição: Devido ao menor grau de detalhamento das estruturas presentes na rede de microdrenagem, é inevitável que a contribuição das quadras seja direcionada de forma diferente para cada caso estudado, pois os escoamentos que eram direcionados de uma quadra para outra devido à ausência de elementos de drenagem, agora contribuem para os nós presentes ao seu redor, causando mudanças tanto no escoamento superficial das sub-bacias à jusante, como no funcionamento do sistema de microdrenagem.

A partir da observação das divergências supracitadas, pode-se concluir que o software utilizado na simulação de ambos os trabalhos é sensível à presença de elementos de microdrenagem em cenários nele simulados, apresentando resultados diferenciados para cada caso conforme a quantidade de elementos nele caracterizados, mostrando maior número de resultados críticos quanto menor for o detalhamento da rede de drenagem.

Analisando então os resultados obtidos pelas simulações do presente trabalho e a situação em que se encontra a parcela da microbacia em estudo, pode-se sugerir algumas medidas a serem implementadas visando uma melhoria no cenário, e diminuição dos casos de alagamentos que ocorrem. São elas:

- O uso, por parte dos órgãos de gestão e planejamento urbano, dos conceitos necessários para o desenvolvimento de sistemas de drenagem urbana sustentáveis, do inglês SUDS (*Sustainable Urban Drainage Systems*), partindo do empreendimento em medidas compensatórias de baixo impacto, até o incentivo a população do uso destas medidas a nível de empreendimento pessoal (que pode ser através de incentivos fiscais ou mesmo de legislação específica).
- O reparo e a manutenção contínua dos componentes da microdrenagem da cidade, visto que à medida que cresce a ocupação populacional, a interferência humana sobre estes componentes também aumenta causando, como observado neste trabalho, danos e modificações na estrutura de vários elementos.
- A revisão do plano diretor do município no tocante à taxa máxima de impermeabilização do solo, adaptando os valores definidos de acordo com a situação de cada parcela da cidade, sendo levados em conta a susceptibilidade a alagamentos de cada área, bem como a influência que este limite pode ter sobre sistemas como o de drenagem, causando, em casos de adoção de índices inadequados a cada área, transtornos à população e ao governo.
- Criação de um plano de drenagem urbana para a cidade, ou de gestão de águas como um todo, e sua incorporação ao plano diretor, que aborde tanto medidas para solucionar os casos de alagamentos observados atualmente na cidade, sejam elas estruturais ou não estruturais, quanto medidas preventivas com relação ao cenário futuro da cidade, realizando simulações com características de previsões de urbanização principalmente em regiões em expansão do município.

Por fim, é necessário salientar que, devido à incompletude de alguns dados, bem como limitações impostas pelo software, alguns fatores podem ser destacados como as incertezas inerentes aos resultados deste trabalho. Estes fatores devem ser observados para que em possíveis estudos futuros, uma análise de incertezas deva ser realizada. Estes podem ser destacados como descrito abaixo:

- A impossibilidade de caracterização do estado danificado dos componentes da drenagem, que diminuem a sua capacidade de projeto, podendo provocar alterações no seu comportamento.
- A não quantificação da presença e influência que a presença de sedimentos (lixo, resíduos sólidos, areia) tem sobre o escoamento na rede de microdrenagem, principalmente em componentes de pequeno diâmetro ou tamanho.
- A falta de acesso a dados projetos de drenagem da prefeitura, que tornam alguns dados de difícil estimativa e portanto, certo grau de imprecisão, como declividade e diâmetro das galerias, tamanho inicial das bocas de lobo e quantidade de poços de visita.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, MARIELE DE SOUZA PARRA; POLETO, CRISTIANO. SISTEMAS SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM URBANA: DISPOSITIVOS. Em: HOLOS Environment. Volume 12, 2012, Páginas 121-131.

ALVES, PRISCILA BARROS RAMALHO. “SIMULAÇÕES DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM: PROPOSTAS EM DUAS MICROBACIAS URBANAS”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

ALVES, PRISCILA BARROS RAMALHO; SANTOS, KARLA AZEVEDO DOS; RUFINO, IANA ALEXANDRA ALVES; FEITOSA, PATRÍCIA HERMÍNIO CUNHA. USO DE MEDIDAS SUSTENTÁVEIS PARA MITIGAÇÃO DE CASOS DE INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS NAS ÁREAS URBANAS: Estudo de Caso em Campina Grande – PB. Em: II Ensur – Anais 2016. Dezembro 2016.

ARAGÃO, R.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S.; GÓIS, R.S.S. Chuvas Intensas no Estado da Paraíba. In: Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, volume 2, p 74-85, 2000.

BENZERRA, ABBAS; CHERRARED, MARZOUK; CHOCAT, BERNARD; CHERQUI, FRÉDÉRIC; ZEKIOUK, TARIK. Decision support for sustainable urban drainage system management: A case study of Jijel, Algeria. In: Journal of Environmental Management. Volume 101, March 2012, Pages 46-53.

CAMPANA, NÉSTOR A.; TUCCI, CARLOS E. M. PREVISÃO DA VAZÃO EM MACROBACIAS URBANAS: Arroio Dilúvio em Porto Alegre. Em: CARLOS E. M. TUCCI; DAVID M. L. DA MOTTA MARQUES (Organizadores). Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2000. Páginas: 53-77.

CANHOLI, ALUÍSIO PARDO. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2º Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CRUZ, MARCOS A. S.; TUCCI, CARLOS E. M. QUANTIFICAÇÃO E CONTROLE DO IMPACTO DA URBANIZAÇÃO EM NÍVEL DE LOTE. Em: CARLOS E. M. TUCCI; DAVID M. L. DA MOTTA MARQUES (Organizadores). Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2000. Páginas: 383-394.

CRUZ, MARCOS A. S.; Souza, CHRISTOPHER FREIRE; TUCCI, CARLOS E. M. CONTROLE DA DRENAGEM URBANA NO BRASIL: AVANÇOS E MECANISMOS PARA SUA SUSTENTABILIDADE. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Pages 1-18, 2007.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. 2013. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Porto Alegre.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. 2013. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistemas de Informação Geográfica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 19 n.1.

FEITOSA, FRANCISCO FÁBIO DE SOUSA. “AVALIAÇÃO DO USO DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO PARA ATENUAÇÃO DE PICOS DE CHEIA UTILIZANDO O SWMM”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2015.

FURTINI, MARCELO BARBOSA; FERREIRA, ELIZABETH; SAMPAIO, FABRÍCIO DE MENEZES TELO. ANÁLISE TEMPORAL DA PERMEABILIDADE DA SUPERFÍCIE URBANA DA SUB-BACIA DO CÓRREGO CENTENÁRIO EM LAVRAS, MG. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 31, n. 4, p. 1145-1154, jul./ago., 2007.

GARCIA, J. I. B. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia do Arroio Cancela. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2005.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>.

KANG, NARAE; KIM, SOOJUN; KIM, YONSOO; NOH, HUISEONG; HONG, SEUNG JIN; KIM, HUNG SOO. Urban Drainage System Improvement for Climate Change Adaptation. In: *Water*. Volume 8, June 2016, Pages 268-283.

KARAMOUZ, MOHAMMAD; HOSSEINPOUR, ANA; NAZIF, SARA. Improvement of Urban Drainage System Performance under Climate Change Impact: Case Study. In: *JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING*. May 2011, Pages 395-412.

HIROSHI. Hidrologia e Drenagem. 2003. 56 f. Apostila de Hidrologia e Drenagem. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MACHADO, MARIA LÉA; NASCIMENTO, NILO; BAPTISTA, MÁRCIO; GONÇALVES, MÁRCIUS; SILVA, ADRIANO; LIMA, JOELMA COSTA DE; DIAS, RODRIGO; SILVA, ANDERSON; MACHADO, ÉBIO; FERNANDES, WILSON. Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia. Em: *REGA*, Volume 2, Junho de 2005, p. 35-52.

MARCELINO, EMERSON VIEIRA. DESASTRES NATURAIS E GEOTECNOLOGIAS: CONCEITOS BÁSICOS. Caderno Didático N°. 1. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.

MORITA, MASARU. Flood Risk Impact Factor for Comparatively Evaluating the Main Causes that Contribute to Flood Risk in Urban Drainage Areas. In: *Water*. Volume 6, January 2014, Pages 253-270.

NÓBREGA, P. V. M. "Análise do Sistema De Drenagem de Campina Grande/Pb para Proteção De Áreas de Risco de Inundação". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

PANIZZI, WRANA MARIA. Prefácio. In: Carlos E. M. Tucci; David M. L. da Motta Marques (Organizadores). Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

PARKINSON, JONATHAN; MILOGRANA, JUSSANÃ; CAMPOS, LUIZA CINTRA; CAMPOS; RAQUEL. Relatório do Workshop em Goiânia-GO. Pages 1-24. Maio de 2003.

PINTO, LUIZA HELENA; PINHEIRO, SÉRGIO AVELINO. Orientações Básicas para drenagem urbana. Fundação Estadual do Meio Ambiente . — Belo Horizonte: FEAM, 2006. 32p.

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico. Secretaria de Planejamento. Diagnóstico da Situação dos Serviços de Saneamento Básico. Campina Grande, 2014.

PORTO, RUBEM L.; FILHO, KAMEL ZAHED; TUCCI, CARLOS E. M.; BIDONE, FRANCISCO. Drenagem Urbana. In: CARLOS E. M. TUCCI; ANDRÉ L. L. [*et al*] (Organizadores). Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4. Ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 2007. Páginas: 805-847.

RUFINO, IANA ALEXANDRA ALVES. Gestão de Recursos Hídricos em Ambientes Urbanos Costeiros: Modelagem e Representação do Conhecimento em Sistemas de Informação Geográfica. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

RUFINO, IANA ALEXANDRA ALVES; SANTOS, RODOLFO CALADO DOS; TSUYUGUCHI, BÁRBARA. Estimativas de taxas de impermeabilização do solo nas bacias urbanas do município de Campina Grande-PB utilizando sensoriamento remoto. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais

no Brasil: 1995 - 2014/ Banco Mundial [Organização Rafael Schadeck] - Florianópolis: CEPED UFSC, 2016. 230 p.

SANTOS, K. A. DOS. Análise multitemporal integrada da permeabilidade do solo nos bairros do Catolé e Sandra Cavalcante em Campina Grande –PB/ Dissertação de Mestrado, UFCG, 2015.

SANTOS, K. A. DOS; RUFINO, IANA ALEXANDRA ALVES; BARROS FILHO, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, p. 943-952, 2017.

SCHUSTER, RAÍZA CRISTÓVÃO. “DESENVOLVIMENTO DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DE TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO E PROPAGAÇÃO DE VAZÃO EM RESERVATÓRIOS”. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

SEIBT, ANA CAROLINA. “MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BOTAFOGO – GOIÂNIA – GO”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, 2013.

SILVEIRA, A L. L., GOLDENFUM, J. A, FENDRICH, R. (2001) Urban drainage control measures. In: Urban drainage in humid tropics. Paris: Unesco. p.125-156.

SOUZA, FERNANDA PEREIRA. “MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA DA SUBBACIA DO LAGO PARANOÁ - BRASÍLIA/DF - E AVALIAÇÃO DE BACIA DE DETENÇÃO”. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2014.

SOUZA, TAYRON JULIANO. “POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA NO MEIO URBANO: O CASO DE CAMPINA GRANDE – PB”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

TSUYUGUCHI, B. B. “Macro drenagem e a ocupação do solo no município de Campina Grande – PB, caracterização, simulação e análises sistêmicas”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

TUCCI, C. E. M. e BERTONI, J. C. B. Inundações Urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, CARLOS E. M. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: Ed. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

TUCCI, CARLOS E. M.; HESPANHOL, IVANILDO; NETTO, OSCAR DE M. CORDEIRO. CENÁRIOS DA GESTÃO DA ÁGUA NO BRASIL: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A “VISÃO MUNDIAL DA ÁGUA”. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 5 n.3 Jul/Set 2000, 31-43.

TUCCI, CARLOS E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4. Ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 2007.

TUCCI, CARLOS E. M.; MARQUES, DAVID M. L. DA MOTTA. Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2000.

TUCCI, CARLOS E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 61-68, 2000.

ZHU, ZHIHUA; CHEN, ZHIHE; CHEN, XIAOHONG; HE, PEIYING. Approach for evaluating inundation in urban drainage systems. In: Science of the Total Environment. Volume 553, February 2016, Pages 1-12.