



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

**SIMULAÇÕES DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS
SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM: PROPOSTAS EM DUAS
MICROBACIAS URBANAS**

Priscila Barros Ramalho Alves

Campina Grande - PB
Fevereiro de 2017

Priscila Barros Ramalho Alves

**SIMULAÇÕES DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS SUSTENTÁVEIS DE
DRENAGEM: PROPOSTAS EM DUAS MICROBACIAS URBANAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

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

Prof (a). Dra. Patrícia Hermínio Cunha Feitosa

Campina Grande-PB

Fevereiro de 2017

FOLHA DE APROVAÇÃO


Priscila Barros Ramalho Alves

SIMULAÇÕES DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM: PROPOSTAS EM DUAS MICROBACIAS URBANAS

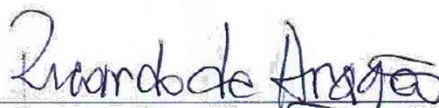
Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental



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



Prof.^a Dr.^a Patrícia Hermínio Cunha Feitosa
(Coorientadora – Universidade Federal de Campina Grande)



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



Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz
(Examinador Externo – Universidade Federal da Paraíba)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A447e Alves, Priscila Barros Ramalho.
Simulações de medidas compensatórias sustentáveis de drenagem :
propostas em duas microbacias urbanas / Priscila Barros Ramalho Alves. –
Campina Grande, 2017.

130 f. il. : color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e
Recursos Naturais, 2017.

"Orientação: Profa. Dra. Iana Alexandra Alves Rufino, Profa. Dra.
Patrícia Hermínio Cunha Feitosa".

Referências.

1. Simulação Hidrológica. 2. Drenagem Urbana. 3. Medidas
Compensatórias de Baixo Impacto. 4. Sustentabilidade. I. Rufino, Iana
Alexandra Alves. II. Feitosa, Patrícia Hermínio Cunha. III. Título.

CDU 556.18(043)

DEDICATÓRIA

A Jesus Cristo, meu Salvador.
Aos meus pais, meus maiores incentivadores.
Ao meu esposo André, o amor da minha vida!

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por Sua misericórdia, amor e graça. Por me guiar em todos os passos dessa caminhada e me fortalecer nos momentos mais difíceis, quando nem eu achei que conseguiria. Que toda honra e glória sejam dadas a Ele!

Aos meus pais, Robson e Dorinha, por seus exemplos, incentivos, motivações e paciência, a eles dedico todas as minhas conquistas. Palavras não são suficientes para demonstrar meu amor por vocês.

Ao meu esposo André, meu amor, por estar sempre presente, me apoiando em todos os planos, por sua paciência e compreensão e, claro, pelo seu amor que irá perdurar até o fim das nossas vidas. Como é bom partilhar de tudo contigo!!

À minha irmã Rafaela, pelas conversas, apoio e enorme incentivo durante a minha caminhada. Você é um presente de Deus na minha vida! Te amo!

À toda a minha família, os Barros, Ramalho e Alves, que acompanharam meu esforço nesses dois anos e sempre torceram por mim.

A minha orientadora Profa. Iana Alexandra, por mais do que sua orientação, mas pelos seus ensinamentos, ajuda, amizade e acima de tudo pela paciência para comigo. A minha orientadora Profa. Patrícia Hermínio, por toda a ajuda, disponibilidade e confiança no desenvolvimento dessa pesquisa. Vocês foram presentes de Deus para mim!

Aos professores Adriano Rolim da Paz e Ricardo de Aragão, que aceitaram participar da banca examinadora. A todos os professores da graduação e pós-graduação de Engenharia Civil, por todas as oportunidades e pelos conhecimentos transmitidos.

A todos do LabHid II, nosso “lab doce lab” BU, que me auxiliaram em todas as etapas desse trabalho. Aos professores Carlos Galvão, John Elton e Juliana Costa por todas as orientações e conversas, e às minhas queridas Marília, Karla, Bárbara, Fernanda, Simone e Tereza por partilharem não só de conhecimentos acadêmicos, mas de vida! Vocês moram em meu coração!

Aos amigos da turma de mestrado, pela ajuda em todas as etapas desse trabalho. Em especial a Mauro e Pablio, que embora pertencentes a outra área de concentração, foram sempre presentes em todos os momentos!

A todos os meus amigos dos “Jovens IPMS” que não só fazem parte da minha vida, mas foram essenciais para que eu conseguisse realizar esse sonho. Às minhas amigas de vida, Kleanny, Marylia e Karol, que provam que amizades podem resistir ao tempo e a distância. Nem preciso dizer o quanto as amo!

A todos que contribuíram de forma direta e indireta para a realização desse trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro e desenvolvimento desta pesquisa.

Muito obrigada!!

RESUMO

O processo de ocupação e crescimento dos centros urbanos comumente se dá a partir de um planejamento urbano empírico, atendendo a interesses de pequenos grupos sociais, e desarticulado de outros fatores que compõem uma cidade, como a bacia hidrográfica na qual o município está inserido, o relevo, o regime de chuvas da região, que interferem no sistema de drenagem de águas pluviais e podem apresentar riscos às pessoas que residem em áreas ocupadas indevidamente. O aumento desordenado de áreas impermeáveis nos centros urbanos causa impactos ao meio ambiente e danos à população, como alagamentos e inundações, caso não seja feito através de um processo de planejamento. O maior número de espaços impermeáveis gera altos escoamentos superficiais e levam os sistemas de drenagem, muitas vezes inadequados, ao seu limite de funcionamento. Nesse sentido, o presente trabalho simulou a aplicação de medidas compensatórias sustentáveis de baixo impacto, coberturas verdes, pavimentos permeáveis e jardins de chuva, em duas microbacias do município de Campina Grande – PB, a fim de mitigar os problemas no sistema de drenagem urbana do município. O *software* de simulação hidrológica utilizado foi o *SWMM – Storm Water Management Model*, com o objetivo de analisar a redução do escoamento superficial em bacias com alto e médio risco a alagamentos e inundações. As medidas compensatórias de drenagem urbana foram aplicadas em dois cenários: de uso atual observado no momento da pesquisa e com a impermeabilização máxima prevista em legislação. Os resultados indicaram desempenho satisfatório na implementação de todas as medidas, com reduções de até 100% de escoamento, porém, a eficiência na redução do volume de escoamento gerado varia de acordo com as áreas e critérios de aplicação. O uso das medidas propostas não é capaz de minimizar todos os impactos hidrológicos do uso e ocupação urbana mal planejados, mas os resultados deste estudo sugerem que as infraestruturas sustentáveis devem ser discutidas como um novo método de controle de inundação urbana, juntamente com o manejo e controle do uso e ocupação do solo. Espera-se que estes resultados contribuam para estudos futuros, a fim de que a cidade de Campina Grande, bem como outras cidades com problemas semelhantes, alcance um nível eficiente e sustentável de prestação dos serviços de drenagem urbana.

Palavras-chave: simulação hidrológica, drenagem urbana, medidas compensatórias de baixo impacto, sustentabilidade.

ABSTRACT

The process of occupation and growth of urban centers is usually based on an empirical urban planning, considering the interests of small social groups, and disjointed from other factors that compose a city, such as the hydrographic basin in which the municipality is inserted, the relief, the region's rainfall regime, which interfere with the rainwater drainage system and may present risks to people residing in unduly occupied areas. The disorderly increase of impermeable areas in urban centers causes impacts to the environment and damage to the population, such as floods, if is not done through a planning process. The greater number of impermeable spaces generates high surface run-offs and lead to drainage systems, often inadequate, at their limits of operation. In this sense, the present work sought to apply sustainable low-impact compensatory measures, green roofs, permeable pavements and rain gardens, in two small basins of the city of Campina Grande - PB, in order to mitigate the problems in the urban drainage system of the municipality. The hydrological simulation software used was the SWMM - Storm Water Management Model, with the objective of analyzing the reduction of surface runoff in basins with high and medium risk to floods. The urban drainage compensatory measures were applied in two scenarios: current use observed at the time of the research and with the maximum waterproofing provided in legislation. The results showed a satisfactory performance, with, in some cases, 100% of flor reduction, in the implementation of all the measures, however, the efficiency in the reduction of the volume generated varies according to the areas and criterias' application. The use of the proposed measures is not capable of minimizing all hydrological impacts of urban use and occupation, but the results of this study suggest that sustainable infrastructures should be discussed as a new method of urban flood control, along with the management and control of land use and occupation. It is expected that these results will contribute to future studies, so that the city of Campina Grande, as well as other cities with similar problems, reach an efficient and sustainable level of urban drainage services.

Keywords: Hydrological simulation, urban drainage, low impact compensatory measures, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Comparação dos hidrogramas das áreas urbanizadas e não urbanizadas.....	20
Figura 2-2 - Seção típica do pavimento permeável.....	27
Figura 2-3 – Camadas da cobertura verde e seus tipos.....	30
Figura 2-4 – Previsão do uso da cobertura verde em 10 anos em Toronto.....	31
Figura 2-5 – Funcionamento de um jardim de chuva.....	32
Figura 2-6 – Exemplo de um jardim de chuva em Wisconsin (USA).....	33
Figura 2-7 - Representação conceitual do funcionamento no SWMM.....	38
Figura 3-1 - Divisão urbana de Campina Grande – PB; A) Localização do estado B) Delimitação do perímetro urbano; C) Zoneamento urbano;.....	39
Figura 3-2 – Crescimento populacional da zona urbana de Campina Grande - PB.....	40
Figura 3-3 – Áreas de alagamentos na cidade;.....	41
Figura 3-4 – Bacias de drenagem do município;.....	42
Figura 3-5 – Organograma do processo metodológico;.....	43
Figura 3-6 – Critérios elaborados para ponderação: a) Declividade média das bacias; b) Distância a elementos de drenagem urbana; c) Impermeabilização das bacia.....	46
Figura 3-7 – Microbacias com níveis de prioridade de ação em Campina Grande - PB.....	47
Figura 3-8 – Mapa de susceptibilidade gerado pelo modelo.....	48
Figura 3-9 – Microbacias estudadas nesta dissertação.....	49
Figura 3-10 Localização das microbacias nos bairros de Campina Grande - PB.....	51
Figura 3-11 - Uso do solo das microbacias; a) Prado; b) Bodocongó;.....	52
Figura 3-12 – Mapa de cheios e vazios (edificações); a) Prado; b) Bodocongó;.....	53
Figura 3-13 – Identificação das edificações com mais de 3 pavimentos; a) Prado; b) Bodocongó.....	53
Figura 3-14 - Declividades para as áreas de estudo; a) Prado b) Bodocongó.....	54
Figura 3-15 – Presença de elementos de drenagem urbana; a) Prado; b) Bodocongó;.....	55
Figura 3-16 – Contribuição das bacias de drenagem;.....	55
Figura 3-17 – Classificação climática de Köppen para a Paraíba.....	58
Figura 3-18 – Zoneamento bioclimático brasileiro;.....	59
Figura 3-19 – Quadras das microbacias do a) Prado e b) Bodocongó;.....	64
Figura 3-20 - Processo completo de delimitação automática de bacias hidrográficas.....	66
Figura 3-21 - Processo de preenchimento de “falhas”.....	67
Figura 3-22 – Função “flow direction”.....	67
Figura 3-23 – Direção de fluxo majoritária das quadras do a) Prado; e b) do Bodocongó;.....	68
Figura 3-24 – Acumulação de água nas microbacias do a) Prado e b) Bodocongó;.....	69
Figura 3-25 - Gráfico da curva IDF para Campina Grande - PB.....	71
Figura 3-26 – Fluxograma de implementação das medidas.....	76
Figura 3-27 – Fluxograma resumo das situações simuladas.....	77
Figura 4-1 – Mapeamento das microbacias críticas sem LID no cenário 1 para TR de 2 anos: a) Prado e b) Bodocongó;.....	79
Figura 4-2 – Mapeamento das microbacias críticas sem LID no cenário 1 para TR de 5 anos: a) Prado e b) Bodocongó;.....	80
Figura 4-3 – Mapeamento das microbacias críticas sem LID no cenário 2 para TR de 2 anos: a) Prado e b) Bodocongó;.....	83
Figura 4-4 – Mapeamento das microbacias críticas sem LID no cenário 2 para TR de 5 anos: a) Prado e b) Bodocongó;.....	84
Figura 4-5 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos.....	88
Figura 4-6 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....	89
Figura 4-7 – Comportamento do escoamento superficial após CV para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....	90
Figura 4-8 – Quadras críticas após cobertura verde nos edifícios com 3 pavimentos;.....	90
Figura 4-9 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos.....	91

<i>Figura 4-10 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4-11 – Comportamento do escoamento superficial após CV para Bodocongó no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4-12 – Comportamento do escoamento superficial após CV para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4-13 – Quadras críticas após CV nas edificações institucionais;</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4-14 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4-15 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>94</i>
<i>..Figura 4-16 – Comportamento do escoamento superficial após CV para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4-17 – Quadras críticas com após o CV nas áreas livres;</i>	<i>95</i>
<i>Figura 4-18 – Comportamento do escoamento superficial após PP para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4-19 – Comportamento do escoamento superficial após PP para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4-20 – Comportamento do escoamento superficial após PP para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4-21 – Quadras críticas após o PP nas áreas livres;</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4-22 – Comportamento do escoamento superficial após PP para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4-23 – Comportamento do escoamento superficial após PP para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4-24 – Comportamento do escoamento superficial após PP para Bodocongó no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4-25 – Comportamento do escoamento superficial após PP para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4-26 – Quadras críticas após o PP em todas as calçadas;.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4-27 – Comportamento do escoamento superficial após JC para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4-28 – Comportamento do escoamento superficial após JC para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4-29 – Comportamento do escoamento superficial após JC para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 4-30 – Quadras críticas após a inserção dos jardins de chuva</i>	<i>102</i>
<i>Figura 4-31 – Comportamento do escoamento superficial após MCs para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4-32 – Comportamento do escoamento superficial após MCs para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 4-33 – Quadras críticas após a inserção de todas as medidas compensatórias;</i>	<i>104</i>
<i>Figura 4-34 – Comportamento das microbacias após MCs (TR 2 anos); a) Prado b) Bodocongó</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4-35 – Comportamento das microbacias após MCs (TR 5 anos); a) Prado b) Bodocongó</i>	<i>106</i>
<i>Figura A-1 – Esquema utilizado no Model Builder no Método1;.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura A-2 – Esquema utilizado no Model Builder no Método 2;.....</i>	<i>119</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Vantagens associadas aos jardins de chuva.....	32
Tabela 2-2 – Comparação de modelos hidrológicos.....	35
Tabela 3-1 - Premissas para susceptibilidade a alagamentos do Método 1;.....	45
<i>Tabela 3-2 - Premissas para susceptibilidade a alagamentos do Método 2;.....</i>	<i>48</i>
Tabela 3-3 - Pesquisas anteriores na cidade de Campina Grande	50
Tabela 3-4 - Dados disponibilizados pela PMCG	51
Tabela 3-5 - Zoneamento urbano de Campina Grande - PB.....	60
Tabela 3-6 - Taxa de ocupação por zona.....	61
Tabela 3-7 - Intervalos usados no SWMM para caracterizar o escoamento.....	62
Tabela 3-8 - Tempos de retorno de acordo com o sistema analisado.....	63
Tabela 3-9 - Parâmetros necessários para as simulações no SWMM.....	65
Tabela 3-10 – Valores dos coeficientes de Manning.....	65
Tabela 3-11 - Valores de DI, DP e AINC	66
Tabela 3-12 - Valores utilizados para a Equação de <i>Horton</i>	70
Tabela 3-13 - Coeficientes da curva IDF para Campina Grande - PB.....	71
Tabela 3-14 - Valores utilizados para a precipitação acumulada para TR 2 anos e TR 5 anos	72
Tabela 3-15 - Camadas para modelagem de LID	73
Tabela 3-16 – Classes hidrológicas de solos do SWMM.....	74
Tabela 3-17 - Características do solo	74
Tabela 3-18 - Parâmetros para o pavimento permeável	75
Tabela 3-19 - Parâmetros para a cobertura verde.....	75
Tabela 3-20 - Parâmetros para os jardins de chuva.....	75
Tabela 4-1 - Volumes de escoamento das quadras críticas do Prado (cenário 1);.....	81
Tabela 4-2 - Volumes de escoamento das quadras críticas de Bodocongó (cenário 1);.....	82
Tabela 4-3 - Volumes de escoamento das quadras críticas do Prado (cenário 2);.....	85
<i>Tabela 4-4 - Volumes de escoamento das quadras críticas de Bodocongó (cenário 2);.....</i>	<i>86</i>
Tabela 4-5 – Porcentagem de quadras não-críticas após cobertura verde	95
Tabela 4-6 – Porcentagem de quadras não-críticas após pavimentos permeáveis.....	100
Tabela 4-7 – Porcentagem de quadras não-críticas após jardins de chuva	102
Tabela 4-8 – Porcentagem de quadras não-críticas após implementação da situação ideal	104
Tabela 4-9 – Quadro resumo dos resultados obtidos em todos os casos de implantação das medidas compensatórias.....	107
Tabela B-1 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação das coberturas verdes para o Prado no cenário 1	120
Tabela B-2 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação das coberturas verdes para Bodocongó no cenário 1	120
Tabela B-3 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação das coberturas verdes para o Prado no cenário 2	121
Tabela B-4 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação das coberturas verdes para Bodocongó no cenário 2	122
Tabela B-5 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos pavimentos permeáveis para o Prado no cenário 1.....	123
Tabela B-6 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos pavimentos permeáveis para Bodocongó no cenário 1.....	123
Tabela B-7 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos pavimentos permeáveis para o Prado no cenário 2.....	124
Tabela B-8 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos pavimentos permeáveis para Bodocongó no cenário 2.....	125
Tabela B-9 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos jardins de chuva para o Prado no cenário 1.....	126
Tabela B-10 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos jardins de chuva para Prado no cenário 2.....	127
Tabela B-11 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos jardins de chuva para Bodocongó no cenário 2.....	128

Tabela B-12 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação da combinação de medidas para Prado no cenário 2.....	129
Tabela B-13 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação da combinação de medidas para Bodocongó no cenário 2.....	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
BMP – Best Management Practices
CPRM – Serviço Geológico do Brasil
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA – Environmental Protection Agency
GIS – Geographic Information Systems
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGRA – International Green Roof Association
IPTU – Imposto Predial e Territorial Urbano
ITIBI – Imposto de Transmissão de Bens Imóveis
LID – Low Impact Development
MCDA – Multi-Criteria Decision Making Analysis
MDE – Modelo Digital de Elevação
SDU – Sistema de drenagem urbana
SIG – Sistemas de Informações Geográficas
PMCG – Prefeitura Municipal de Campina Grande
PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico
PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos
SWMM – Storm Water Management Model
WLC – Weighted Linear Combination

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 URBANIZAÇÃO E PROBLEMÁTICA NAS CIDADES	19
2.2 DESENVOLVIMENTO URBANO SUSTENTÁVEL	21
2.3 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA	23
2.3.1 MEDIDAS ESTRUTURAIS E NÃO-ESTRUTURAIS.....	23
2.3.2 DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL	25
2.3.2.1 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	25
2.3.2.2 COBERTURAS VERDES	28
2.3.2.3 JARDINS DE CHUVA	31
2.4 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)	33
2.5 MODELOS HIDROLÓGICOS	35
2.5.1 IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM	35
2.5.2 O MODELO SWMM	36
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO EM ESTUDO	39
3.2 METODOLOGIA	43
3.2.1 DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	44
3.2.1.1 - MÉTODO 1: MICROBACIAS COM RISCO A ALAGAMENTOS.....	44
3.2.1.2 – MÉTODO 2: ÁREAS COM SUSCEPTIBILIDADE A ALAGAMENTOS.....	47
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MICROBACIAS DE ESTUDO.....	50
3.2.2.1. QUANTO À LOCALIZAÇÃO E USO DO SOLO.....	51
3.2.2.2. QUANTO À DECLIVIDADE E ELEMENTOS DE DRENAGEM URBANA.....	54
3.2.2.3 – CENÁRIO 1: USO DO SOLO ATUAL.....	56
3.2.2.4 – CENÁRIO 2: USO DO SOLO DE ACORDO COM O MÁXIMO DE IMPERMEABILIZAÇÃO PREVISTO EM LEGISLAÇÃO	56
3.2.3 ESCOLHA DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS	56
3.2.4 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS.....	62
3.2.4.1 – ENTRADA E PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS DAS MICROBACIAS DE ESTUDO	63
3.2.4.2 – ENTRADA DE DADOS DE INFILTRAÇÃO	70
3.2.4.3 – ENTRADA DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO	71
3.2.4.4 – ENTRADA DE DADOS DO SISTEMA DE DRENAGEM URBANA	73
3.2.4.5 – ENTRADA DE DADOS DE LID (MEDIDAS COMPENSATÓRIAS)	73
3.2.4.6 – CRITÉRIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE LID (MEDIDAS COMPENSATÓRIAS)	76
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	78
4.1.1. SEM A ADOÇÃO DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS.....	78
4.1.2. COM A ADOÇÃO DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS (MC'S)	87
4.1.2.1. COBERTURAS VERDES (CV)	87
4.1.2.2. PAVIMENTOS PERMEÁVEIS (PP)	96
4.1.2.3. JARDINS DE CHUVA (JC)	101
4.1.2.4. SITUAÇÃO IDEAL: UNIÃO DAS MCS	103
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	108
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

APÊNDICE A	119
APÊNDICE B.....	120

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Para o Fundo de População das Nações Unidas (UNITED NATIONS POPULATION FOUND, 2013), a população mundial já ultrapassa 7 bilhões de pessoas. No Brasil, a população já é superior a 190 milhões de indivíduos (IBGE, 2010), tendo aumentado o grau de urbanização de aproximadamente 81%, em 2000, para mais de 84%, em 2010. A urbanização desarticulada cria novos desafios, em termos ambientais e socioeconômicos, nos processos de gestão urbana, no planejamento urbano, e especialmente na vida da população.

O crescimento urbano traz consigo consequências para as cidades, como a introdução de superfícies impermeáveis através de obras de infraestrutura, o que reduz a possibilidade de infiltração das águas pluviais e as taxas de evapotranspiração e aumenta o volume superficial de escoamento no espaço urbano (TASSI *et al.*, 2014; SOLECKI, 2013). As enchentes têm se tornado mais graves e frequentes, demonstrando a fragilidade do sistema hidrológico urbano no qual pequenas mudanças podem acarretar grandes alterações em seu funcionamento, com significativos impactos financeiros e psicológicos sobre a população (BRAGA & CARVALHO, 2003).

Por mais de 150 anos, o conceito dominante de soluções para problemas do sistema de drenagem urbana (SDU) foi o de redes canalizadas (TORGERSEN *et al.*, 2015; BAPTISTA *et al.*, 2011). Recentemente, surgiram uma variedade de soluções destinadas ao controle no uso e ocupação do solo, incluindo as “Medidas de Baixo Impacto” (do inglês: LID) ou “Medidas Compensatórias Sustentáveis”. O emprego dessas medidas é considerado importante por incorporar soluções sustentáveis no planejamento com o objetivo de reduzir o aumento de volumes de escoamentos urbanos (FENG *et al.*, 2016; MAO *et al.*, 2016; QIN *et al.*, 2012; SEMADENI-DAVIES *et al.*, 2008; KENNEDY & LEWIS, 2007)

O planejamento em uma bacia urbana em relação às inundações e alagamentos nasce da percepção de que tanto existem problemas a serem resolvidos quanto soluções a serem exploradas. A atuação de países em desenvolvimento na prática do planejamento das medidas compensatórias contra as inundações em áreas urbanas está se consolidando, resultado de inúmeros fatores, como a crescente valorização do conceito de sustentabilidade ambiental (GOLDENFUM *et al.*, 2007; SILVEIRA & GOLDENFUM, 2004; SILVEIRA *et al.*, 2001). Baptista *et al.* (2011) mostram que o uso das medidas

compensatórias sustentáveis possibilita o emprego dos conceitos do desenvolvimento urbano sem causar danos às cidades e à população. Mao *et al.* (2016) e Qin *et al.* (2012) afirmam que o uso de LID controla o escoamento superficial principalmente a partir da redução da impermeabilização e aumento da infiltração.

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. O Ministério das Cidades tem estimulado a utilização de LID para implantação e ampliação de sistemas de drenagem urbana sustentáveis, conforme apresentado em manual para apresentação de propostas (BRASIL, 2016). 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 das cidades o que torna indispensável a implementação de leis específicas para a problemática da gestão das águas urbanas. A Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano (SMDU) de São Paulo, em 2012, definiu o sistema de drenagem como um gerador de benefícios importantes para as cidades quando bem projetado, e traz a importância da elaboração do plano de drenagem e manejo de águas pluviais.

A fim de estudar sobre a aplicação de medidas compensatórias sustentáveis em áreas urbanas e verificar suas eficiências, elegeu-se a cidade de Campina Grande, estado da Paraíba, como área de estudo. O município, assim como outras cidades de médio porte do Nordeste brasileiro, tem sofrido uma urbanização acelerada nos últimos anos o que, aliada a um planejamento desarticulado, acarreta altas taxas de impermeabilização do solo e modificações no ciclo hidrológico de toda a região. A cada precipitação extrema, são documentados casos de inundações e alagamentos distribuídos em toda a cidade.

Estudos prévios (SANTOS, 2015; TSUYUGUCHI, 2015; NÓBREGA, 2012) e o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) mostraram que a macrodrenagem da cidade, em épocas de precipitação extrema, possui alguns trechos críticos. Santos (2015) estima que a microdrenagem não acompanhou o crescimento da cidade e atua como agravante no contexto de catástrofes de alagamentos. Para esse estudo foram utilizadas técnicas de geoprocessamento e simulações hidrológicas para estimar os efeitos de implantação de medidas compensatórias além de selecionar e caracterizar as microbacias de estudo.

Este trabalho soma-se aos esforços recentes do grupo de pesquisa em geotecnologias aplicadas da UFCG, no sentido de aproximar as áreas de planejamento urbano e de recursos hídricos, utilizando para tanto, as análises especializadas e as simulações como instrumentos de gestão.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a aplicação de medidas compensatórias sustentáveis, através de simulações computacionais, modelagem hidrológica e princípios de urbanismo sustentável, para os problemas no sistema de drenagem, a partir do estudo de duas microbacias localizadas na área urbana de Campina Grande - PB.

São objetivos específicos desta pesquisa:

- Identificar e hierarquizar medidas compensatórias que sejam adequadas para a cidade de Campina Grande através do referencial bibliográfico, da caracterização da área de estudo e do uso de técnicas de geoprocessamento;
- Elaborar cenários atuais e futuros, em condições normais e extremas sob aspectos legais, técnicos e ambientais, para a fração urbana considerada com vistas a análises integradas de capacidade de suporte à drenagem, conforto ambiental e qualidade paisagística;
- A partir de análises espaciais integradas a modelos de simulação, determinar a priorização de áreas, segundo os critérios considerados, para a implementação das medidas compensatórias de forma a dar suporte nos eventos de cheia.
- Propor o uso de medidas compensatórias na prevenção de situações de risco aos alagamentos do município e inclusão na legislação urbanística vigente, como ferramenta de escolha no gerenciamento dos sistemas de drenagem urbana do município de Campina Grande.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Urbanização e problemática nas cidades

Desde a segunda metade do século XX, o crescimento dos núcleos urbanos tornou-se um fenômeno mundial, e a partir disso, a urbanização acelerada e ineficiente passou a ser um causador significativo de impactos ambientais. O processo de urbanização afeta o ambiente e a população, com alterações no espaço e possíveis contaminações geradas pelos humanos.

O aumento da atividade urbana no contexto da cidade tem trazido, nas últimas décadas, desafios como: (i) o adensamento das edificações e alto processo de verticalização; (ii) a dominância das superfícies impermeabilizadas e baixa infiltração de águas; (iii) diminuição das áreas verdes e; (iv) condições críticas ao solo urbano (MASCARÓ, 2009). Miguez *et al.* (2007) enfatizam que os aspectos mais agravantes do processo de urbanização são o crescimento em um curto período de tempo sem adequação das infraestruturas, as políticas públicas que não fiscalizam as ocupações de áreas de risco formando as favelas e baixa qualificação dos gestores públicos. Nesse processo, as superfícies naturais são substituídas por, por exemplo, pavimentos e telhados que não permitem a infiltração do solo e alteram o balanço hídrico do espaço.

A urbanização também indica que, provavelmente, haverá variações no microclima urbano das áreas. Minaki & Amorim (2012) mostram que a variação no uso do solo, as características do relevo, a dinâmica de ocupação, o modo de vida predominante, os diferentes materiais utilizados nas construções, intenso processo de pavimentação (impermeabilização) e excessiva temperatura, interferem nos microclimas das cidades e devem ser considerados nas análises. Todas essas características estão interligadas com a análise do ciclo hidrológico e do balanço hídrico destas áreas.

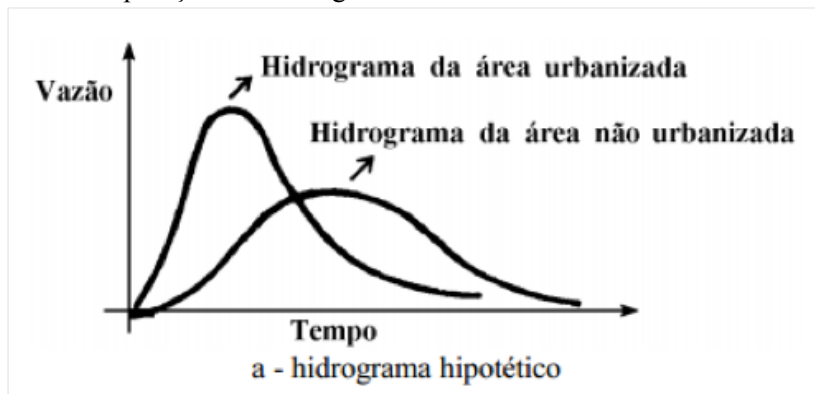
Tucci (2007) afirma que o ciclo hidrológico e o balanço hídrico se alteram na bacia urbana devido à impermeabilização. A adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento integrado é prevista na lei das águas 9.433/1997 através da Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH e na lei de saneamento 11.445/2007. Ambas têm, entre suas diretrizes, a “adoção da bacia hidrográfica como unidade de referência para o planejamento de suas ações”. As bacias superficiais são definidas pela topografia do

terreno, de modo que são margeadas por divisores topográficos e têm suas águas escoando para um único ponto, denominado exutório.

Existem diversas análises que apontam como um correto reconhecimento das bacias é de suma importância aos estudos dos recursos hídricos (EPA, 2005), visto que as diferentes etapas do ciclo hidrológico podem ser melhor compreendidas e mensuradas quando seus limites são bem definidos. O ciclo hidrológico, em condições naturais, pode ser considerado um sistema em equilíbrio dinâmico. Contudo, o processo de urbanização, pautado na intervenção antrópica sem planejamento, trouxe grandes complicações para a questão de águas urbanas, trazendo consequências graves à população e ao meio. A questão da drenagem urbana tornou-se bastante complexa no atual contexto da demanda ambiental crescente, pois envolve além de aspectos ambientais, aspectos sanitários, paisagísticos, sociais e técnicos (SILVEIRA, 2016; BAPTISTA *et al.*, 2005).

A alteração pode ser observada nos volumes dos processos hidrológicos, como o volume de escoamento superficial, e nos hidrogramas que caracterizam a dinâmica temporal das vazões de saída (SILVEIRA & OLIVERA, 2013; ZHOU *et al.*, 2011; TUCCI, 2007). A impermeabilização do solo gera o aumento do volume superficial devido à retirada da superfície permeável e da vegetação, a redução de recarga dos aquíferos, do escoamento subterrâneo e da evapotranspiração. Como consequência disso, a vazão total do hidrograma da região urbanizada aumenta e podem ocorrer os alagamentos e inundações, além de menores tempos relativos à vazão máxima (tempos de pico) e menores tempos de duração (Figura 2.1).

Figura 2-1 - Comparação dos hidrogramas das áreas urbanizadas e não urbanizadas



Fonte: Tucci (2007)

Precipitações extremas e alagamentos em cidades tem altos custos sociais e econômicos, produzindo impactos em muitos aspectos da vida nas cidades, como: danos

a infraestrutura e construções, aumento do risco a saúde por meio das doenças infecciosas, poluição na água e trazendo perdas econômicas (MIGUEZ & MAGALHÃES, 2010; LINDHOLM *et al.*, 2008).

A situação pode ser evitada por meio de um planejamento adequado. O planejamento urbano é um processo técnico, instrumentado para transformar a realidade existente no sentido de objetivos previamente estabelecidos (SILVA, 1995). Dessa forma, autores (MOTA, 1999; NUCCI, 1996) mostram que o planejamento deve considerar fatores territoriais, morfológicos, sustentáveis e econômicos. O planejamento integrado deve ser feito visando à preservação ambiental, a qualidade de vida populacional e considerar as questões ambientais na tomada de decisões relativas ao planejamento urbano.

As alternativas para minimização desse problema devem considerar medidas institucionais e também estruturais, sendo possível a prevenção em áreas ainda não ocupadas. As alterações previstas nas cidades, por meio do poder público, muitas vezes não são realizadas com auxílio de projetos de drenagem urbana, sendo mais frequentes as obras pontuais em trechos de riachos ou rios urbanizados, sem considerar a bacia como todo, o que apenas aumenta e transfere os locais de inundações na cidade.

Os problemas gerados pela gestão inadequada das cidades agravam-se nas regiões urbanas de baixa renda, que possuem sérios problemas sociais, e colaboram para o aumento da vazão de pico e dos volumes de escoamento (SANTOS *et al.*, 2013). Um dos maiores desafios são as favelas, ou moradias informais, áreas densas dentro das cidades e na periferia, que, em sua maioria, não observam as necessidades mínimas de saneamento, água potável, transporte e educação adequados (MINKS, 2013). Os gestores dos planejamentos urbano e ambiental encontram desafios na integração de dados urbanos, ambientais e sustentáveis para compreender as cidades e planejar o futuro (POLIDORI, 2004)

2.2 Desenvolvimento urbano sustentável

Define-se por desenvolvimento sustentável aquele que responda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de responder às suas próprias necessidades (ONU, Comissão Brundtland, 1987). Esse conceito foi publicado em 1987 através de uma equipe liderada por Gro Harlem Brundtland e, desde então, a

definição vem se adaptando às necessidades em busca do desenvolvimento sustentável em equilíbrio com as mudanças que ocorrem atualmente no meio ambiente.

Dessa forma, documentos como a Agenda 21 (1992), eventos como as Conferências das Nações Unidas (1992, 2002, 2012), e o Protocolo de Kyoto (1997), dentre outros, tiveram grande importância em estabelecer metas para os países em prol de trazer qualidade de vida às populações em áreas urbanizadas. Ao mesmo tempo, surge o conceito de “resiliência urbana” que mostra a capacidade de uma cidade em adaptar-se e recuperar-se de ações, produzindo efeitos que incluem a preservação e restauração de suas estruturas e funções prévias básicas (IPCC, 2007; ICLEI - LOCAL GOVERNMENTS FOR SUSTAINABILITY, 2012). O planejamento urbano com foco na sustentabilidade e resiliência conduz à adequação do espaço construído aos processos naturais, e também leva a uma ampla reflexão sobre os modelos sociais e econômicos vigentes (GOMEZ & RIVAS, 2004).

Cabe ressaltar que essa adequação possibilita atribuir características de sustentabilidade aos sistemas, pois, quando bem concebidas e mantidas permitem a continuidade do desenvolvimento urbano e ainda contribuem para a melhoria da qualidade de vida, recuperação e preservação do ambiente (MOURA *et al.*, 2009).

O desafio de unir o desenvolvimento urbano ao sustentável é algo que tem alcançado várias partes do mundo. Elmqvist *et al.* (2015) e Minks (2013) mostram que esse desenvolvimento se refere principalmente à disposição de espaços verdes em várias formas ou planejadas e criadas artificialmente por mãos humanas ou naturalmente. Combinar estas áreas verdes, de modo que a infraestrutura verde cresça e multiplique os seus efeitos ambientais positivos, assim como seus benefícios.

Para Elmqvist *et al.* (2015), as áreas verdes trazem uma série de soluções para as áreas urbanas, como: (i) regulação do microclima; (ii) regulação da água; (iii) redução da poluição e melhoria da saúde populacional e; (iv) melhorias no habitat e nos serviços culturais. Em Berlim, capital da Alemanha, cidade exemplo na incorporação de medidas sustentáveis em seu espaço, cerca de 44% de sua superfície é formada por áreas verdes. Segundo o *Green Berlin* (2011), a cidade criou um “Sistema de Espaços Verdes” que inclui mais de 2.500 espaços públicos e mais de 400.000 árvores ao longo das estradas.

As cidades verdes são frequentemente avaliadas e comparadas em termos do seu desempenho ambiental. Há, por exemplo, um estudo internacional da empresa multinacional Siemens – *Green City Index 8* – que inclui as áreas de energia, redução da poluição, uso da terra, construção e edifícios, transportes, saneamento, água, resíduos,

qualidade do ar e governança ambiental. No Brasil, em 2013, a cidade de Curitiba também se destacou por ter parques urbanos e por estar bem posicionada nesse índice de cidade internacional. Mas há problemas ao se implementar essa abordagem “sustentável” em países em desenvolvimento (GOLDENFUM *et al.*, 2007; SILVEIRA *et al.*, 2001; SILVEIRA & GOLDENFUM, 2004), as dificuldades incluem a falta de dados hidrológicos e hidráulicos, a incontrolada expansão urbana, problemas de qualidade de água e a falta de instrumentos legais de implementação.

Quando bem concebidas, as medidas sustentáveis contribuem efetivamente para a melhora da qualidade de vida nas cidades com a recuperação e a preservação do meio ambiente. E geram-se, portanto, condições necessárias para o desenvolvimento sustentável em áreas urbanas.

2.3 Sistemas de drenagem urbana

2.3.1 Medidas estruturais e não-estruturais

A drenagem urbana pode ser entendida como um conjunto de elementos que visam reduzir os riscos que as populações estão sujeitas e os prejuízos causados por inundações, promovendo o desenvolvimento urbano de forma harmônica e sustentável (TUCCI, 2002). As medidas compensatórias de drenagem buscam mitigar os impactos nos processos naturais do ciclo hidrológico causados pela urbanização.

Para Araújo *et al.* (2000) há uma tendência, na área de drenagem urbana, de utilização de dispositivos que sejam capazes de reduzir volumes de escoamento superficial e vazões de pico a níveis iguais ou até inferiores de modo a aproximar a resposta do meio alterado àquela que ocorre em condições naturais observadas antes da urbanização. A escolha das técnicas compensatórias dependerá de fatores sociais, urbanísticos, ambientais e econômicos, sendo como ideal a adoção das técnicas em paralelo ao desenvolvimento do projeto urbanístico da área.

No continente europeu ações de planejamento e controle da drenagem urbana remontam há muitos anos. Pesquisas mostram que países como o Reino Unido (ELLIS, 2013; RAMCHUNDER & HOLDEN, 2009), a França (MARTIN *et al.*, 2007; CHOCAT *et al.*, 2001) a Alemanha (THIEKEN *et al.*, 2006; HERRMANN *et al.*, 2000) e Itália (TODESCHINI *et al.*, 2012) acumulam experiências importantes na drenagem urbana e

no controle da poluição hídrica, com práticas que associam o controle das cheias à melhoria da qualidade ambiental das bacias hidrográficas.

As medidas de controle da drenagem urbana incluem diferentes soluções técnicas de engenharia, projetos de arquitetura e questões legais e econômicas. SMDU (2012) definiu as medidas estruturais como obras de retenção, confinamento, desvio e escoamento das águas mais rápido e em menores níveis, como barragens e canais, enquanto as medidas não estruturais como o uso do planejamento e de instrumentos legais, sem fazer uso de estruturas para alterar o regime de escoamento e com o objetivo de minimizar os impactos causados pela ação antrópica.

Tucci (2003) mostra que a escolha e execução de medidas depende dos sistemas de drenagem que estão envolvidos nos alagamentos: (i) na fonte: quando o escoamento superficial ocorre no lote, condomínio, parques e passeios; (ii) na microdrenagem: risco moderado de altas precipitações com um sistema de condutos pluviais ou canais a nível de loteamento e; (iii) na macrodrenagem: envolve os sistemas coletores de diferentes sistemas de microdrenagem e projetados para atender a precipitações superiores as da microdrenagem. Segundo Ribeiro (2010), nos grandes centros urbanos, é preciso investir em infraestrutura dos sistemas de microdrenagem com o intuito de minimizar o fluxo das águas pluviais e conseqüentemente os impactos ocasionados devido a esse excesso, em períodos de tempo curtos.

A partir da década de 70, surgiram novos conceitos chamados de “medidas alternativas” ou “medidas compensatórias e mitigatórias” de drenagem, que buscam neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, com benefícios para a qualidade de vida e a preservação ambiental (COFFMAN, 1999; MARSH *et al.*, 1989; FERRARA *et al.*, 1983; WING, 1971).

Essas tecnologias são alternativas em relação às soluções técnicas clássicas porque consideram os impactos da urbanização de forma global, tomando a bacia hidrográfica como base de estudo, buscando compensar os efeitos da urbanização de forma sustentável (BAPTISTA *et al.*, 2011). Como cita Kellagher (2012), o desenvolvimento que não controla o escoamento das águas de chuva, reflete na geração de maiores volumes de escoamento para a sua área, necessitando aplicar técnicas compensatórias de drenagem para mitigar o incremento do escoamento gerado pelo estado de pós desenvolvimento urbano.

2.3.2 Drenagem urbana sustentável

A sustentabilidade é considerada como um importante conceito para o gerenciamento dos sistemas de drenagem urbana. A estratégia para que a drenagem urbana seja sustentável deve ser utilizar um planejamento sistêmico. Deve-se planejar de forma integrada a drenagem de toda a bacia hidrográfica com, por exemplo, uma infraestrutura verde multifuncional que infiltre as águas no local onde caem, maiores áreas permeáveis e arborizadas e desconectar áreas impermeáveis, dentre outros (HERZOG, 2013).

Novas abordagens vêm sendo adotadas como técnicas compensatórias no ambiente urbano, destacando-se conceitos como “*Sustainable Urban Drainage Systems – SUDs*” no Reino Unido, o “*Water Sensitive Urban Design – WSUD*” na Austrália e o “*Low Impact Development – LID*” na América do Norte (URRUTIAGUER *et al.*, 2011; BAPTISTA *et al.*, 2011). No Brasil, o Ministério das Cidades tem estimulado a utilização de LID para implantação e ampliação de sistemas de drenagem urbana sustentáveis, conforme apresentado em manual para apresentação de propostas (BRASIL, 2016). Algumas regiões do Brasil iniciaram a implementação das medidas compensatórias sustentáveis em suas legislações, como por exemplo Recife, por meio das leis municipais 18.111/2015 e 18.112/2015 e o estado da Paraíba, por meio da lei estadual 10.047/2013 (BRASIL, 2015).

As medidas compensatórias podem ser usadas de forma combinada (mais de uma medida) de forma a aumentar ainda mais o índice de infiltração de águas pluviais e reduzir o escoamento superficial.

Nessa dissertação é dada mais ênfase a discussão de três medidas compensatórias sustentáveis principais: (i) os pavimentos permeáveis, (ii) as coberturas verdes e (iii) os jardins de chuva.

2.3.2.1 Pavimentos permeáveis

Sobre o desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano, Pinto (2011) afirma que por causa do impacto gerado pela impermeabilização, há uma demanda por esses dispositivos que contribuam para amenizar os impactos do ambiente e tentar os reverter. O pavimento permeável é uma

medida compensatória capaz de reduzir volumes de escoamento superficial e vazões de pico em níveis semelhantes aos que eram observados antes da intensa urbanização.

Seu uso promove a infiltração da água da chuva no solo urbano e atua como um retardador do tempo de pico das cheias, além de permitir a recarga do lençol freático, servir como armazenador e redutor de poluição da água (SANTOS *et al.*; FELDE *et al.*, 2015; ALESSI *et al.*, 2006).

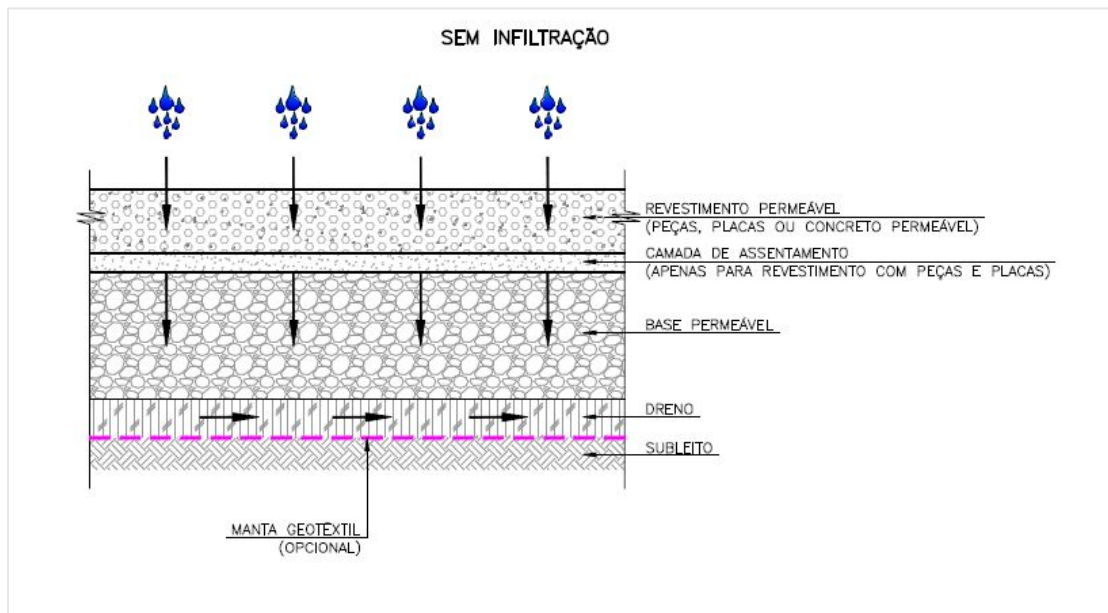
Segundo Baptista *et al.* (2011), em áreas urbanas, as superfícies destinadas ao sistema viário e as áreas de estacionamento podem ocupar até 30% da área da bacia de drenagem. Normalmente, essas áreas são preenchidas por pavimentos impermeáveis, como o asfalto, e tem contribuído para o aumento do escoamento superficial gerando as inundações e alagamentos. Os pavimentos permeáveis se caracterizam por apresentarem superfícies porosas ou perfuradas que permitem a infiltração de parte do escoamento superficial, tais como os blocos vazados, intertravados e os concregramas, que são assentados diretamente sobre o solo natural compactado (ALMEIDA *et al.*, 2008).

Os pavimentos permeáveis podem ser classificados em vários tipos, Baptista *et al.* (2011) os divide principalmente em:

- i. Pavimentos com revestimentos permeáveis: possibilitam o acesso das águas pluviais às camadas inferiores do pavimento e efetuam uma redução do escoamento superficial;
- ii. Pavimentos porosos de retenção: desempenham o papel de reservatório temporário das águas pluviais, ou seja, com evacuação localizada, sem funções de infiltração.
- iii. Pavimentos porosos de infiltração: desempenham dois papéis distintos, a reservação temporária e a infiltração das águas pluviais

Há diversas composições para a execução do pavimento permeável, a figura 2.2 mostra a seção mais usual desta medida.

Figura 2-2 - Seção típica do pavimento permeável



Fonte: ABNT - NBR 16416: 2015

A estrutura do pavimento deve ser dimensionada considerando-se a intensidade da precipitação no local e as características do solo. A principal característica desse sistema é a redução do escoamento superficial mantendo a área útil do pavimento.

Segundo Azzout *et al.* (1994), dentre as vantagens desses tipos de técnicas de drenagem, estão:

- i. A manutenção das condições de pré-urbanização do local, com relação ao escoamento superficial;
- ii. Custos menores que a solução tradicional, ou ainda, por um custo equivalente, as técnicas oferecem uma proteção superior contra o risco de enchentes;
- iii. Possibilidade de integração estética ao ambiente, chegando a contribuir para a valorização do local.

Estudos elaborados por Al-Rubaei *et al.* (2013), ao realizar ensaios, perceberam que os blocos de concreto preenchidos com grama possuem alta permeabilidade. Brattebo & Boothe (2003) avaliaram a eficácia de quatro sistemas de pavimentos permeáveis em uma área de estacionamento e verificaram que as águas apresentaram contaminação menor depois que infiltradas pelo pavimento. Rosa *et al.* (2014) e Lin *et al.* (2015) avaliaram a sua performance através do *Storm Water Management Model (SWMM)* e perceberam bons índices de reduções de escoamentos.

O uso dos pavimentos permeáveis tem sido grandemente disseminado em países do exterior. Nos Estados Unidos, vários estados criaram leis mudando os objetivos e métodos de drenagem urbana, impondo a máxima infiltração ou armazenamento temporário da água de escoamento superficial. No Japão, o pavimento permeável é integrado a programas que incluem todas as técnicas de infiltração. Tais técnicas são utilizadas principalmente nos quarteirões das grandes cidades, em lugares disponíveis e que podem ser inundados, tais como quadras de esporte de universidades, pátios de escolas, etc. Na Suécia, a utilização do pavimento permeável foi incentivada por suas contribuições.

No Brasil, a cada ano a incorporação do pavimento às legislações ou programas das prefeituras e estados tem aumentado. Em Goiânia – GO, desde 2010, há o Programa Calçada Ecológica no qual a inserção de pavimentos permeáveis nas calçadas as tornarão transitáveis para qualquer pedestre (crianças, idosos, adultos e portadores de mobilidade reduzida) e facilitarão a absorção e escoamento das águas da chuva. Novo Hamburgo – RS tem a lei municipal nº 1553/07 que obriga a utilização de pavimentos permeáveis e/ou ecológicos nas vias urbanas, coletoras e locais.

A NBR 16416 –ABNT foi instituída em 2015 com requisitos e procedimentos para a construção de pavimentos permeáveis de concreto. Espera-se que a partir disso as porcentagens de pavimentos permeáveis aumentem em todo o Brasil.

2.3.2.2 Coberturas verdes

As coberturas verdes também têm sido utilizadas como importantes estratégias de drenagem na fonte, as quais têm como principais objetivos, a gestão das águas pluviais no próprio lote e proporcionar melhorias no conforto térmico e acústico das edificações (MATHEUS *et al.*, 2016; COSTA *et al.*, 2012). Elas têm seu uso tanto em países frios como em quentes, para, entre outros benefícios, ajudar a manter a temperatura interna do ambiente mais agradável e constante (MATHEUS *et al.*, 2016).

O escoamento superficial gerado pela passagem da água pluvial por uma cobertura verde, quando comparado com uma cobertura impermeável convencional, sofre uma atenuação (redução da vazão de pico) e um retardo, pois parte do volume de água precipitado é retido na cobertura verde (BERNDTSSON, 2010). Estudos feitos por Costa *et al.* (2011) e Alamy Filho *et al.* (2016) indicaram que a implantação das coberturas verdes aponta para reduções expressivas do volume de escoamento superficial além de

amenizar o calor nas edificações. Li & Babcock (2014) fizeram comparações entre os softwares SWMS-2D e HYDRUS, com a implantação das coberturas verdes, e perceberam que em ambos os casos, a medida é eficiente na redução dos escoamentos.

Tassi *et al.* (2014) elencam que as coberturas verdes conferem melhorias quanto ao conforto térmico e acústico já que a vegetação e o solo atenuam tanto a transmissão de calor como de ruído para o interior da edificação, o que gera, também, economia de energia. Além de múltiplos benefícios, como: inibidor de zonas de calor, sequestrados de poluentes e aumenta a biodiversidade perdida em áreas urbanizadas.

Segundo a *International Green Roof Association* (IGRA), as coberturas verdes podem ser de três tipos:

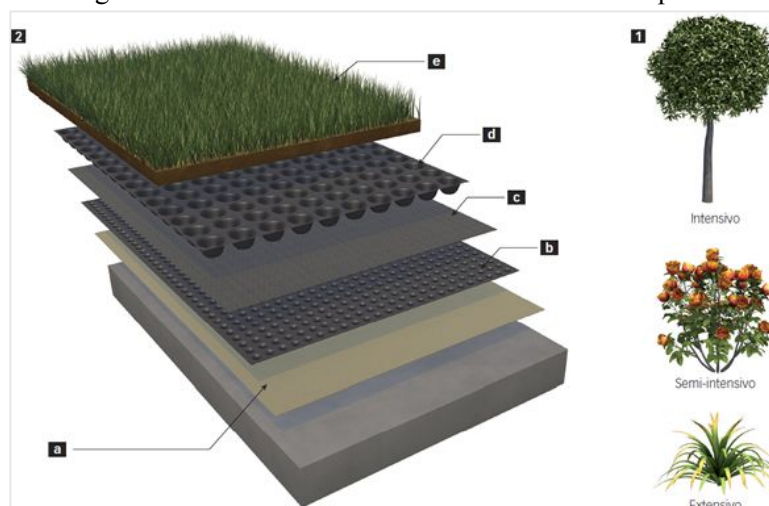
- i. Extensivo: tem configuração de um jardim, com plantas rasteiras de pequeno porte. A altura da estrutura, descontada a vegetação, vai de 6 cm a 20 cm. O peso do conjunto fica entre 60 kg/m² e 150 kg/m²;
- ii. Intensivo: comporta plantas de nível médio a grande em uma estrutura de 15 cm a 40 cm. A carga prevista varia entre 180 kg/m² e 500 kg/m²;
- iii. Semi-intensivo: Esse tipo intermediário tem vegetação de porte médio plantadas num sistema de 12 cm a 25 cm. Pode exercer uma carga de 120 kg/m² a 200 kg/m².

Independentemente do tipo, os sistemas empregados em coberturas verdes podem variar bastante. Em uma aplicação típica, a montagem de um telhado verde pode ser feita diretamente sobre uma laje, aplicando-se todas as camadas nesta sequência:

- a) Camada impermeabilizante: normalmente feita com mantas sintéticas, ela protege a laje contra infiltrações;
- b) Camada drenante: serve para drenar a água e também como filtro. Pode ser feita de brita, seixos, argila expandida ou com mantas drenantes de poliestireno;
- c) Camada filtrante: serve para reter partículas e pode ser feita com um geotêxtil;
- d) Membrana de proteção contra raízes: serve para controlar o crescimento de raízes da vegetação;
- e) Solo e vegetação.

A figura 2.3 mostra um protótipo com as camadas da cobertura verde e seus tipos definidos anteriormente.

Figura 2-3 – Camadas da cobertura verde e seus tipos



Fonte: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br> (2011)

Existem sistemas modulares em que os módulos já vêm prontos com a vegetação e, ainda, sistemas que empregam pisos elevados que armazenam a água das chuvas para posterior irrigação da vegetação.

Algumas cidades têm incorporado a cobertura verde em suas legislações, normalmente a iniciativa é recompensada por descontos nos impostos prediais, proporcionais à área da cobertura. Nos Estados Unidos, cidades como Chicago, Wisconsin, Seattle, Indiana e San Francisco são exemplos de uso da cobertura verde em edificações. Em Chicago, a implantação começou a partir dos edifícios públicos, a exemplo do prédio da própria sede municipal. A Suíça estabeleceu a obrigatoriedade em todos os edifícios, já a França obriga os edifícios comerciais a optarem pela cobertura ou placas solares.

Em 2010, Toronto (Canadá) tornou-se a primeira cidade da América do Norte a exigir a instalação da cobertura verde em novos empreendimentos comerciais, institucionais e condomínios residenciais e em 2012 para industriais. Os requisitos são incorporados em uma lei municipal, que inclui padrões para quando a medida verde é necessária e quais os elementos que são necessários no projeto. A Universidade de Toronto prevê que em 10 anos mais de 10.4 milhões de pés quadrados já tenham a cobertura (Figura 2.4).

Figura 2-4 – Previsão do uso da cobertura verde em 10 anos em Toronto



Fonte: Universidade de Toronto (2010)

A cidade de Copenhague (Dinamarca) é considerada como uma cidade verde e, recentemente, aprovou a implementação de uma lei relacionada às coberturas verdes. No Brasil, a cidade de Recife aprovou uma lei semelhante (18.112/2015) onde a vegetação deve ser implementada em edifícios residenciais com mais de 4 pavimentos e área construída superior a 400 metros. No Paraná, todos os prédios públicos construídos a partir de 2012 devem ter sistema de aquecimento por energia solar, sistema de aproveitamento de águas da chuva e telhados ambientalmente corretos.

Na Paraíba, a lei estadual 10.047 de 2013 institui o uso de coberturas verdes em conjuntos edificados, residenciais ou não, com mais de 3 (três) unidades agrupadas verticalmente, para ter a construção da cobertura verde.

Algumas outras cidades como São Paulo e Rio de Janeiro ainda não formularam leis específicas, mas já têm implementado as coberturas verdes em algumas edificações. Em São Paulo, alguns projetos de leis estão em trâmite que preveem um desconto de 15% a 25% no IPTU dos imóveis que possuam esse tipo de cobertura. No Rio de Janeiro, a prefeitura prevê uma lei com redução de impostos (isenção de até 50% de IPTU e ITIBI) para os prédios que optarem pela medida.

2.3.2.3 Jardins de chuva

Estas estruturas recebem o escoamento de água e acumulam os excessos, formando poças que se infiltram gradualmente no solo, auxiliando o sistema de drenagem a trabalhar dentro de sua capacidade mesmo durante os picos de precipitação.

Ishimatsu *et al.* (2017) e Abi Aad *et al.* (2010) fizeram simulações com os jardins de chuva e comprovaram sua eficiência em reduzir os volumes de escoamento e o pico de escoamento em épocas de alta precipitação. Tang *et al.* (2015) avaliaram a capacidade de retenção dos jardins e infiltração de chuva como instrumento de gestão de águas pluviais urbanas na China. O Metropolitan Council (2001) mostra as vantagens associadas a esse tipo de medida (tabela 2.1).

Tabela 2-1 – Vantagens associadas aos jardins de chuva

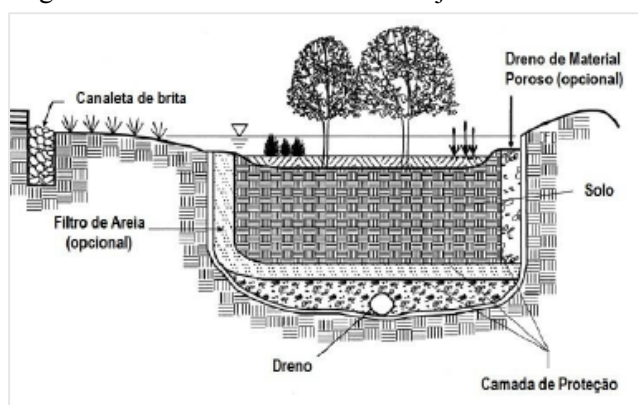
VANTAGENS
Valorização do espaço pela incorporação de plantas ao ambiente urbano
Detenção temporária das águas, propiciando um rearranjo temporal dos hidrogramas
Melhoria da qualidade das águas pluviais pela retenção de sedimentos finos e poluentes associados
Possibilidade de recarga das águas subterrâneas
Possibilidade de aplicação em áreas densamente impermeabilizadas

Fonte: Metropolitan Council (2001)

No geral, são estruturas pouco profundas que podem ser implantadas em locais adjacentes a áreas ocupadas. Os jardins de chuva ou estruturas de biorretenção se encaixam na categoria de filtros que utilizam da atividade biológica (plantas e microorganismos) para limpar as águas do escoamento superficial, além de contribuir para a atenuação dos picos de cheia e volumes escoados (Figura 2.5).

Seu funcionamento implica no armazenamento temporário das águas do escoamento superficial que afluem para a estrutura e na filtração deste volume. As águas filtradas podem ser infiltradas diretamente no solo ou direcionadas para o sistema de águas pluviais por meio da drenagem comum (METROPOLITAN COUNCIL, 2001).

Figura 2-5 – Funcionamento de um jardim de chuva



Fonte: MDE (2000)

Os jardins de chuva são utilizados em várias partes do mundo. A cidade de Portland – Oregon ganhou o prêmio de arquitetura ASLA (American Society of Landscape Architects) em 2006 pelo projeto dos jardins de chuva. Cidades como Londres, Seattle, Delaware e Kansas City possuem vários diferentes projetos de jardins de chuva em seus territórios. Em geral, como os jardins de chuva podem ter suas dimensões bem reduzidas, os moradores são encorajados a construírem em seus próprios terrenos e as prefeituras os colocam em áreas de passeio público (Figura 2.6).

Figura 2-6 – Exemplo de um jardim de chuva em Wisconsin (USA)



Fonte: ASLA (2011)

2.4 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

Atualmente há uma tendência mundial na utilização de geotecnologias para o gerenciamento de informações geoambientais, em especial destacam-se os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Silva (2007) afirma que os SIGs são ferramentas computacionais utilizadas para processar dados espaciais georreferenciados. É um conjunto de funções que assegura aos profissionais o armazenamento, a recuperação, a manipulação e a exibição de dados geograficamente localizados, com recursos avançados.

O SIG possui, de fato, como característica a composição de uma variedade de diferentes componentes (BATISTA, 2005). Os principais componentes são:

- i. Interface com o usuário;
- ii. Entrada e integração de dados;

- iii. Funções de processamento gráfico e de imagens;
- iv. Visualização e plotagem;
- v. Armazenamento e recuperação de dados que são organizados em forma de um banco de dados geográficos.

A espacialização de fenômenos e dados georreferenciados possibilita a gestão do território e é de grande valia na elaboração de políticas públicas, devido a sua versatilidade e capacidade, no campo visual, a dar respostas a perguntas, como, onde e por que ocorrem tais fenômenos e, onde atuar para saná-los ou ainda prioriza os locais que sofrerão interferências.

A aptidão do SIG de simular e relacionar eventos de natureza espacial permite a projeção de cenários para planejamento, bem como a modelagem de funções de correlação e a interação de dados de monitoramento para efeito de controle, supervisão e obtenção de diagnósticos. Entre as suas aplicações em estudos de drenagem urbana, estão a extração de características físicas das bacias hidrográficas, mapeamento de uso e ocupação do solo e mapas temáticos. As geotecnologias possibilitam a elaboração dos processos de cenarização, simulação dinâmicas e ambientais e modelagens dos ambientes de estudo, a partir da aquisição de dados do ambiente.

Os avanços nos SIGs e nas geotecnologias computacionais tem proporcionado a acessibilidade a dados espaciais detalhados e resultados de modelagens (RIBEIRO, 2005; LIMA *et al.*, 2011). Merwade & Olivera (2015) relacionam a análise de recursos hídricos às modelagens usando geotecnologias. Todas essas facilidades possibilitam ao poder público verificar a exequibilidade dos projetos de desenvolvimento locais, respeitando a legislação ambiental e, com isso, possibilitando o ordenamento eficiente do território (LIMA *et al.*, 2011).

Chang *et al.*, 2013, Chen & Hong, 2014 e Tan *et al.*, 2015 mostram que para uma eficiente tomada de decisão é necessário utilizar técnicas de geoprocessamento em seus processos, como a análise multicriterial espacial. O sequenciamento de definição dos problemas, definição de critérios de avaliação e análise de incertezas são necessárias para dar confiabilidade aos resultados. Domingues & Françoso (2005) ressaltam que dominar o conhecimento de interpretar, analisar, avaliar e sistematizar e propor soluções para as diferentes variáveis existentes no espaço urbano são de extrema valia para o gerenciamento das políticas públicas na cidade.

2.5 Modelos hidrológicos

2.5.1 Importância da modelagem

Nesse contexto, verifica-se a importância da simulação hidráulico-hidrológica para uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, de forma a produzir o comportamento do sistema através da modelagem. A tabela 2.2 mostra algumas aplicações possíveis de três modelos hidrológicos bem usuais em simulações em áreas urbanas, o STORM, IPSH1 e SWMM.

Tabela 2-2 – Comparação de modelos hidrológicos

CAPACIDADES DE SIMULAÇÃO	MODELOS		
	STORM	IPSH1	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)

Um modelo hidráulico-hidrológico é um sistema de equações e procedimentos que procurar simular o percurso da água desde a precipitação até a saída da água do sistema (RENNÓ *et al.*, 2010). Meller (2007) mostra que eles são compostos por duas

partes sequencialmente conectadas: um modelo hidrológico, transformação da precipitação em escoamento superficial, e um modelo hidráulico, para a propagação do escoamento através de redes de condutos e canais.

Assim, os modelos de simulação se mostram como ferramentas eficientes para prognosticar os efeitos causados às bacias hidrográficas pelo crescimento urbano, possibilitando o planejamento adequado do desenvolvimento das cidades. Almeida (2007) ressalta que os recursos computacionais têm contribuído para o entendimento do meio urbano e os fenômenos dinâmicos espaciais diversos.

A escolha do modelo depende dos objetivos da modelagem, da cobertura espacial pretendida e/ou existente, da tecnologia empregada, da disponibilidade de dados e do conhecimento do modelador (SHINMA, 2011; MAKSIMOVIC, 2001). Neste trabalho, o SWMM foi escolhido devido às suas capacidades de simulações, disponibilidade de dados, domínio público e por tratar-se de um modelo bastante utilizado nessa área por outros pesquisadores.

2.5.2 O Modelo SWMM

Desenvolvido em 1971 pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), o *Storm Water Management Model* – SWMM, vem sendo submetido a diversas melhorias e merece destaque por ser de domínio público e amplamente utilizado por pesquisadores em todo o mundo (LI & BABCOCK, 2014; ROSA *et al.*, 2014; LIN *et al.*, 2015). É 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, etc.

Por se tratar de um código fonte aberto, é possível encontrar diversos programas que realizaram modificações nele e que o integrem com interfaces SIG ou CAD. Os avanços nos sistemas de informações geográficas (SIG) e nas geotecnologias computacionais tem proporcionado a acessibilidade a dados espaciais detalhados e resultados de modelagens (RIBEIRO, 2005; LIMA *et al.*, 2011). Dentre eles, há o PCSWMM desenvolvido pela *Computational Hydraulics International Water* e que traz consigo uma variedade de ferramentas que facilitam a entrada de dados e conferência de resultados (CHI 2014b; CHI 2013). No entanto, a grande maioria dessas adequações não são em formato de domínio público.

O SWMM, versão 5.1, foi selecionada como a plataforma de modelagem para o estudo de respostas hidrológicas com a inserção das medidas compensatórias. No *software*, há a possibilidade de inserir as medidas compensatórias como uma composição de camadas verticais com suas propriedades e que gerar consequências nas áreas de estudo (ROSSMAN, 2015, 2010; PALLA & GNECCCO, 2015).

É possível simular até oito tipos de LID, sendo eles a célula de biorretenção, o jardim de chuva, a cobertura verde, o pavimento permeável, as trincheiras de infiltração, cisternas, valas de infiltração sem drenos e as áreas vegetadas.

Segundo Rossman (2010), as aplicações típicas do SWMM 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;
- Geração de poluição difusa para estudos de lançamento de efluentes (carga de contaminantes);
- Avaliação da eficácia das BMPs para reduzir o carreamento de poluentes durante a chuva;

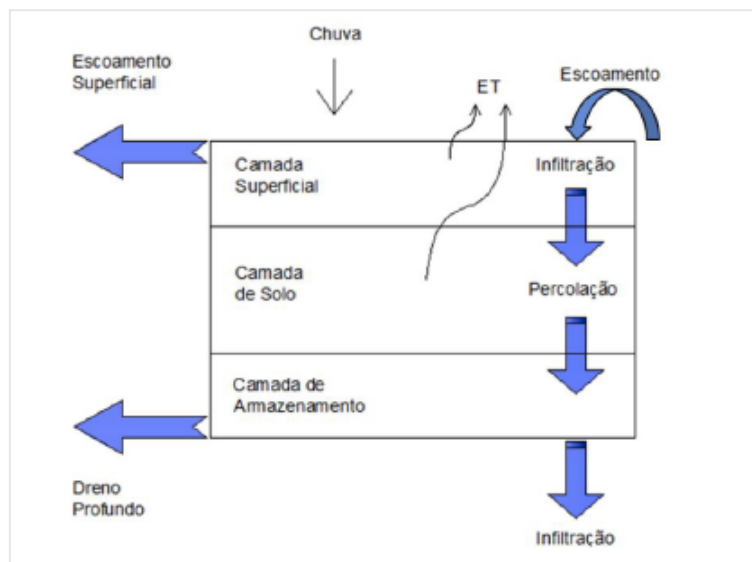
No programa, a bacia urbana é representada na forma de um conjunto de sub-bacias e canais de propagação interconectados. As informações básicas para simulação hidrológica chuva-vazão são, além dos dados de precipitação, a largura representativa da sub-bacia, os coeficientes de rugosidade de Manning, a declividade da sub-bacia, porcentagem de áreas impermeáveis e a altura do armazenamento em depressões e os parâmetros de infiltração. As características básicas destes dados de entrada estão melhor descritas no capítulo que apresenta as etapas metodológicas desta pesquisa.

Maus (2007) salienta que na aplicação dos modelos hidrológicos relacionados à drenagem urbana necessita-se conhecer a área impermeável e as condições do

escoamento superficial provocadas pela ocupação do solo urbano. Segundo Tucci (2000), a impermeabilização de 7% da área dos lotes já acarreta a duplicação do escoamento superficial e que casos mais extremos, como a impermeabilização de 80% do lote, geram um volume de escoamento superficial oito vezes maior.

Durante a simulação, o modelo realiza o balanço hídrico determinando o que escoava de uma camada para outra e o que é armazenado em uma camada (Figura 2.7). O SWMM simula as medidas compensatórias através de sua representação pela combinação de camadas verticais cujas propriedades são definidas por unidade de área. Pode-se dizer que este modelo apresenta várias características úteis para o desenvolvimento deste trabalho, sendo capaz de modelar os processos hidrológicos e hidráulicos das bacias urbanas, além de avaliar a implementação das medidas compensatórias e fazer comparações com o estado anterior.

Figura 2-7 - Representação conceitual do funcionamento no SWMM



Fonte: Rossman (2015)

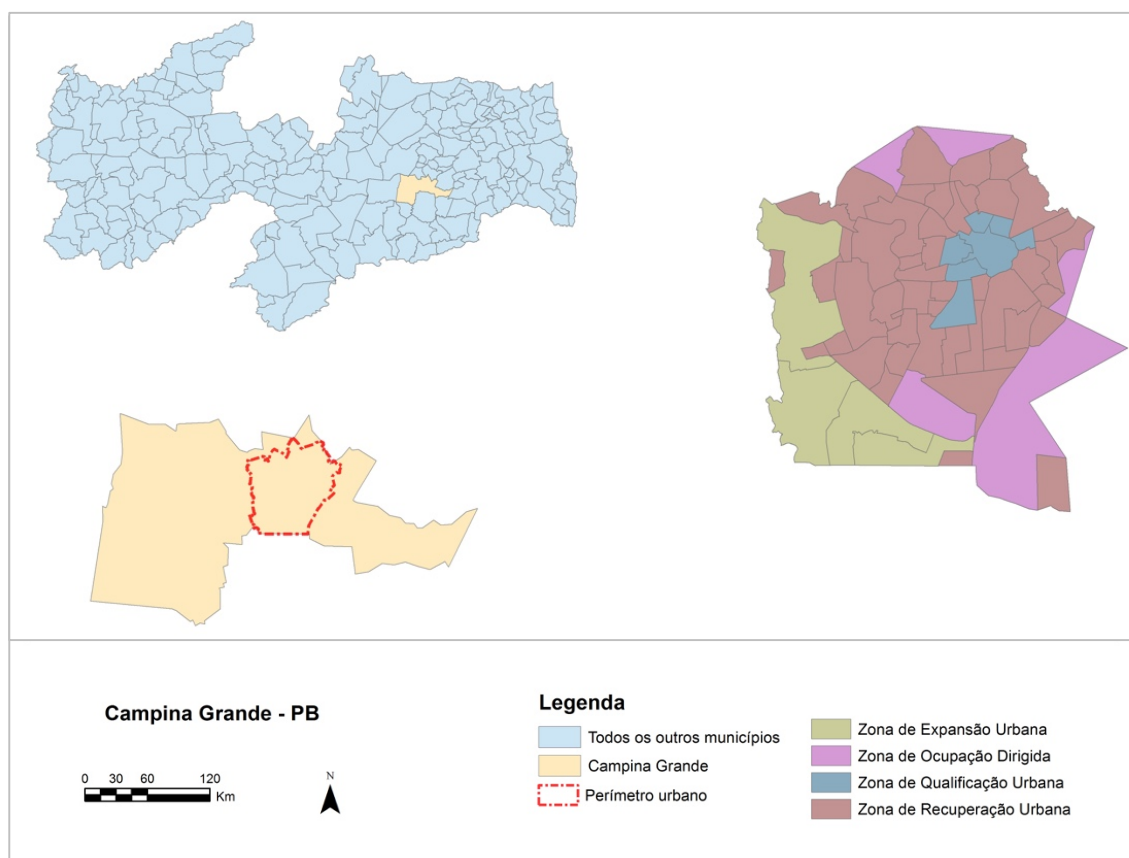
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização do município em estudo

A cidade de Campina Grande - PB localiza-se no semiárido do nordeste brasileiro e possui quatro distritos (São José da Mata, Galante, Catolé de Boa Vista e Sede), com 594m² de área total e aproximadamente 110m² de perímetro urbano (PMCG, 2001).

O Plano Diretor do município fragmenta a área urbana em quatro zonas (Expansão Urbana, Ocupação Dirigida, Qualificação Urbana e Recuperação Urbana) e às caracterizam de acordo com a infraestrutura instalada e algumas tendências de ocupação. A área do perímetro urbano é hoje segmentada em 50 bairros.

Figura 3-1 - Divisão urbana de Campina Grande – PB; A) Localização do estado B) Delimitação do perímetro urbano; C) Zoneamento urbano;

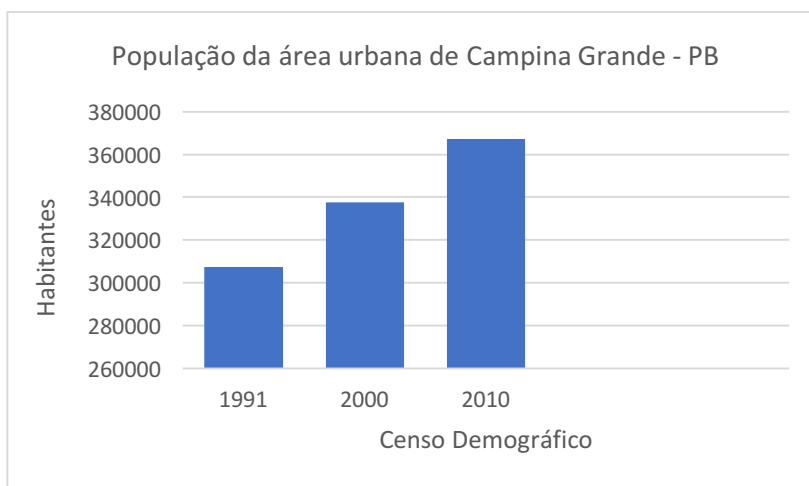


Fonte: adaptado de Plano Diretor de Campina Grande – PB (PMCG, 2006)

De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a zona urbana do município de Campina Grande, entre os anos de 1991 e 2010, teve um aumento populacional de aproximadamente 20% (Figura 3.2), representando, assim,

alterações na cidade como o aumento de sua área total, número de edificações, ruas pavimentadas, etc.

Figura 3-2 – Crescimento populacional da zona urbana de Campina Grande - PB



Fonte: IBGE (1991, 2000, 2010)

O crescimento urbano e as intervenções no ambiente natural causam diversos impactos sobre o ciclo hidrológico no meio urbano, como o aumento da impermeabilização e conseqüentemente do volume de escoamento superficial.

A cidade, apesar de enfrentar uma escassez hídrica grave em seu abastecimento humano (proveniente de um reservatório que se localiza fora da área urbana e em uma outra bacia hidrográfica), apresenta problemas de alagamentos e inundações nos períodos de chuva, principalmente pela frequência de eventos chuvosos concentrados. Esses eventos ocorrem com certa frequência e provocam casos de alagamentos nos bairros da cidade (Figura 3.3). Estes também estão documentados no Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), elaborado a partir de 2013 e concluído no ano de 2015. Essas falhas ocorrem pela falta de investimentos do poder público e inadequações no atual sistema de drenagem urbana (SDU).

Autores como Santos (2015), Tsuyuguchi (2015) e Nóbrega (2012) descrevem a situação atual da drenagem urbana de Campina Grande com problemas de limpeza e manutenção dos elementos de drenagem, como canais e bocas de lobo, além de altos índices de urbanização e impermeabilização do solo, tornando a cidade susceptível a alagamentos frequentes. Melo Filho *et al.* (2014) realizaram a análise dimensional do sistema de macrodrenagem de águas pluviais urbanas para o Canal das Piabas (canal de

água pluvial) e identificou vários pontos ao longo deste com irregularidades, como presença de resíduos sólidos, além de interferências dos sistemas de água e de esgotamento sanitário da cidade.

Figura 3-3 – Áreas de alagamentos na cidade;



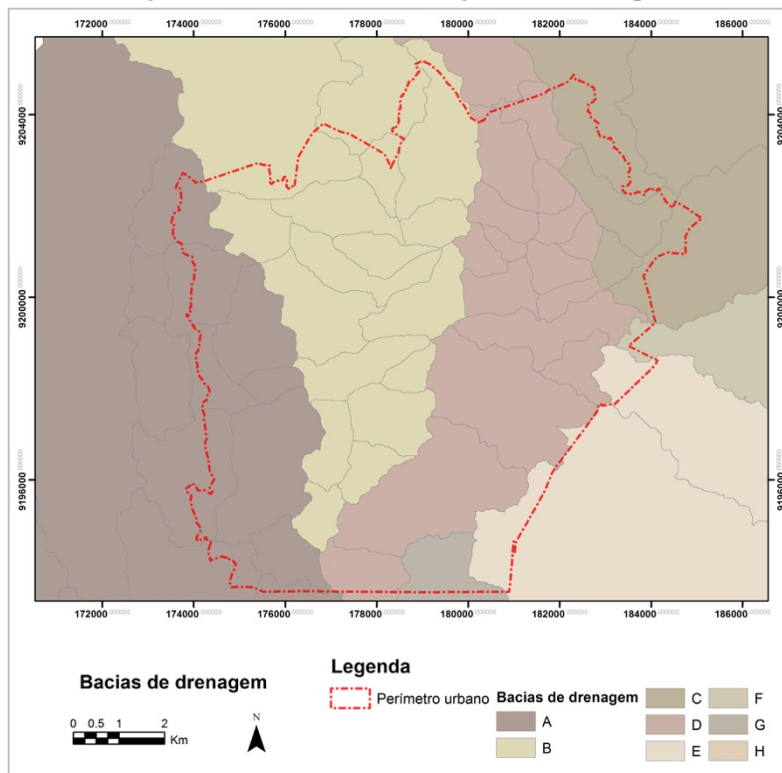
Fonte: Jornal da Paraíba (2014/2015/2016)

O PMSB mostra que o crescimento desordenado e as lacunas no planejamento territorial, somados aos problemas no sistema de drenagem urbana, trazem maiores chances de alagamentos na cidade. A cada novo evento chuvoso, os números indicam novos pontos de alagamentos.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) e a delimitação da macro e microdrenagem do município utilizada nesse trabalho foram elaborados por Tsuyuguchi *et al.* (2014). Na análise e definição final dos limites das bacias, vários critérios de avaliação foram considerados como o cadastro oficial de micro e macrodrenagem, além de diversas consultas à especialistas e visitas a campo para validação de dados (Figura 3.4). A Defesa Civil e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2013) também apontam a existência de áreas de risco a alagamentos, entre os quais alguns são classificados de médio a alto risco à população.

Estudos desenvolvidos por Tsuyuguchi (2015) e no PMSB mostram que a capacidade do sistema de macrodrenagem de águas pluviais atende, em épocas de cheia, de forma satisfatória a demanda de escoamento superficial existente. São sugeridos estudos na microdrenagem da cidade, com intervenções localizadas nas áreas, incluindo o uso de medidas compensatórias.

Figura 3-4 – Bacias de drenagem do município;

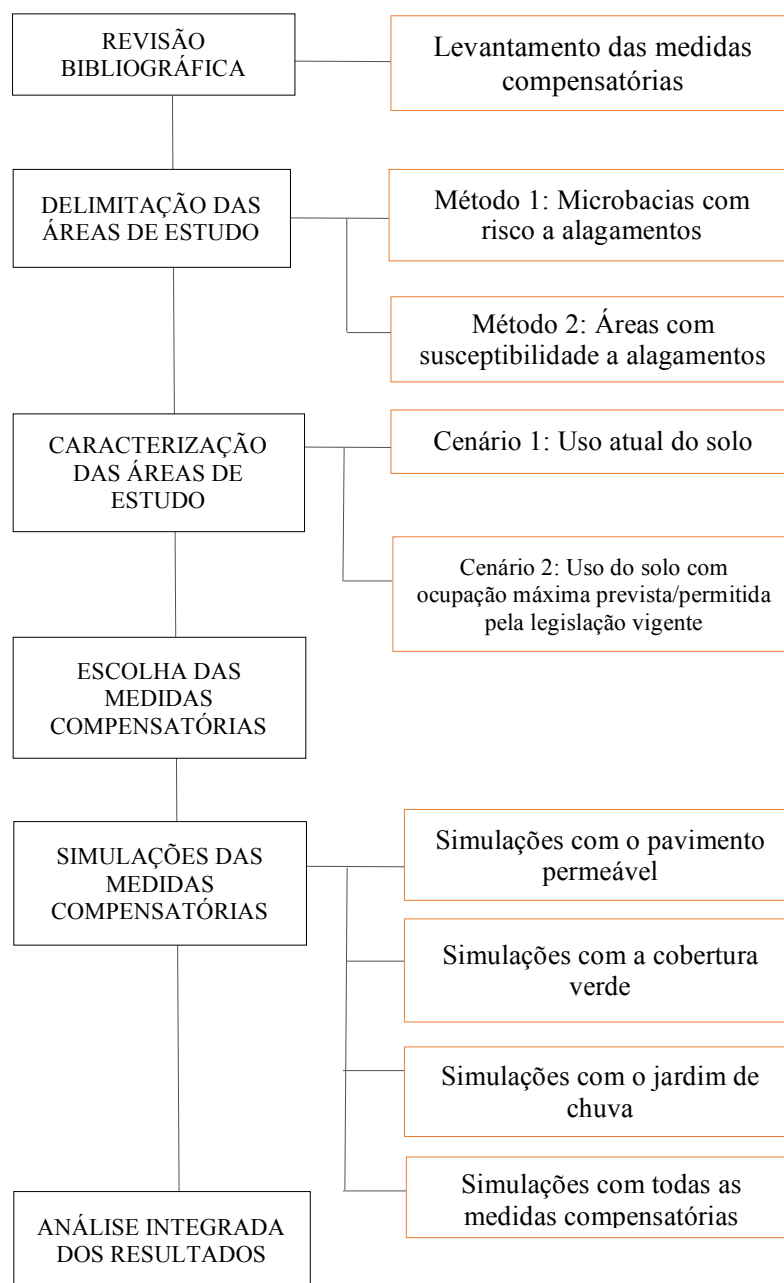


Fonte: Adaptado de Tsuyuguchi *et al.* (2014)

3.2 Metodologia

Visando alcançar os objetivos esperados, além da revisão bibliográfica, o trabalho foi dividido em outras quatro principais etapas metodológicas: (i) delimitação das áreas de estudo; (ii) caracterização das áreas de estudo; (iii) escolha das medidas compensatórias e (iv) simulações hidrológicas. Após todas essas, procede-se com a análise e considerações finais. Todo o processo metodológico pode ser visualizado na figura 3.5 abaixo.

Figura 3-5 – Organograma do processo metodológico;



3.2.1 Delimitação das áreas de estudo

Foram desenvolvidos dois métodos para a escolha das áreas de estudo do presente trabalho. Os métodos utilizaram conceitos de análise multicriterial espacializada e sistemas de informação geográficas na tomada de decisão e geraram mapas com a susceptibilidade a alagamentos para o território de Campina Grande – PB. Ao fim, os mapas foram confrontados e as áreas escolhidas.

Os dados necessários para as análises foram disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Campina Grande – PB e por estudos prévios desenvolvidos pelos pesquisadores da UFCG. Estes estudos são devidamente citados e utilizados no decorrer deste trabalho.

3.2.1.1 - Método 1: Microbacias com risco a alagamentos

O mapeamento de microbacias com risco a alagamentos foi baseado em critérios físicos e de ocupação apresentados na tabela 3.1. Uma análise multicritério pode permitir uma combinação eficiente de vários critérios (fatores) de forma simples e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) podem ser utilizados como “um ambiente que transforma e combina dados espaciais e preferências de especialistas para apoiar de alguma forma uma tomada de decisão” (Malczewski, 2006).

Para este autor, a relação entre GIS e MCDA (do inglês: *Geographic Information Systems e Multi-Criteria Decision Making Analysis*) representa um grande avanço para as pesquisas de geotecnologias aplicadas à tomada de decisão. As análises foram feitas por pixels em cada microbacia, a unidade de estudo é a microbacia de drenagem e todos os critérios foram espacializados para ela, permitindo o *overlay* e a análise ponderada. A análise realizada estabelece pesos aplicados pixel a pixel, baseado nas premissas descritas na tabela 3.1. As premissas foram escolhidas de acordo com a disponibilidade de dados para a análise por microbacias.

Para a análise multicriterial pixel a pixel, foram utilizados conceitos de lógica Fuzzy (nebulosa) desenvolvidos por Zadeh (1960). Neste trabalho, um conjunto difuso é caracterizado pelo grau de pertinência que varia de 0 a 1, indicando um aumento contínuo de uma situação de não pertinência para uma de total pertinência segundo uma função linear. Após estabelecidas as funções de pertinência, uma sobreposição foi efetuada (*overlay*) de forma a considerar todos os critérios já padronizados com pesos distintos.

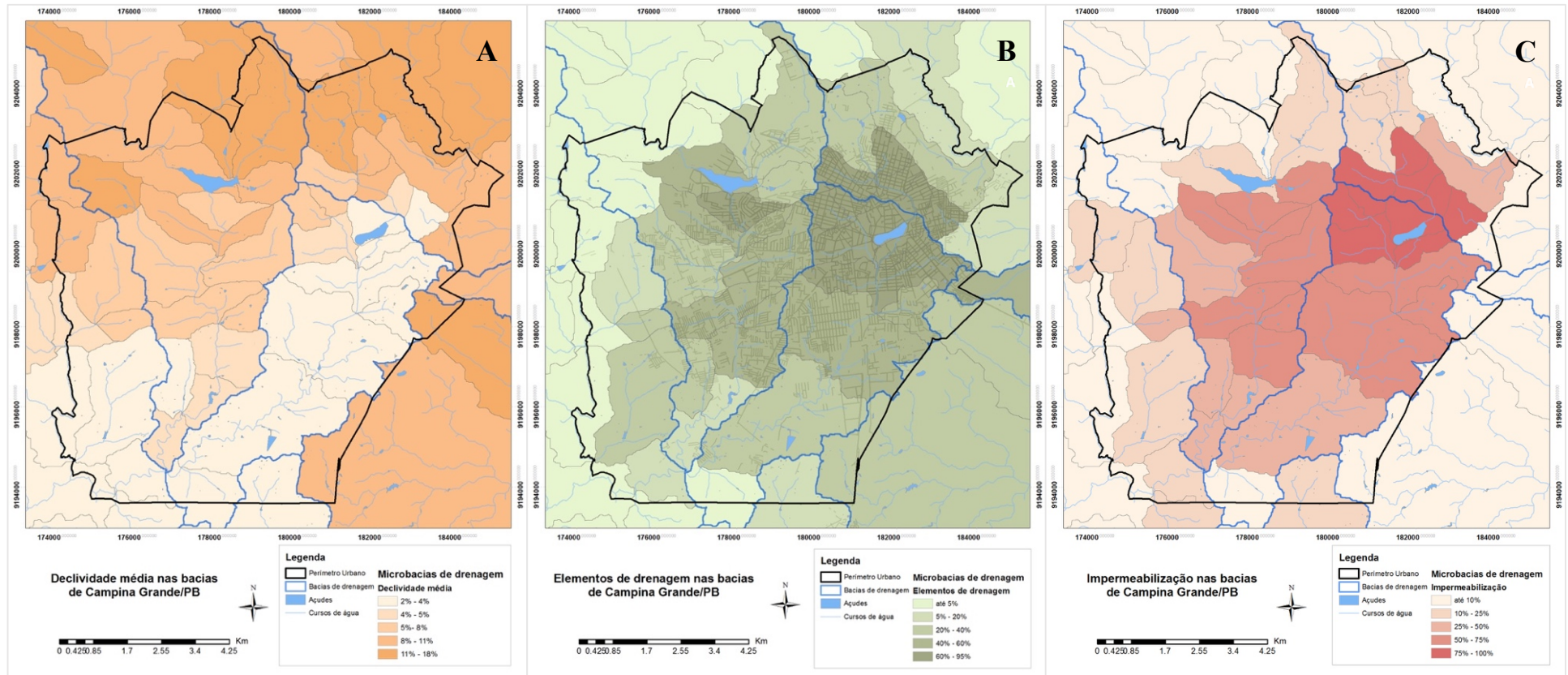
Tabela 3-1 - Premissas para susceptibilidade a alagamentos do Método 1;

CRITÉRIO	DESCRIÇÃO	DADOS
Declividade	Áreas com declividade média mais baixas possuem uma maior susceptibilidade a alagamentos.	Tsuyuguchi (2015)
Vias com drenagem	Áreas que se encontrem próximas a alguma via que apresenta presença de elementos de drenagem (bocas de lobo ou sarjetas) possuem uma menor susceptibilidade a alagamentos devido à capacidade de drenagem das águas pluviais nas proximidades destes elementos.	PMCG (2010)
Uso do solo	Áreas com maior extensão impermeabilizada podem apresentar maiores velocidades de escoamento da água em um evento chuvoso mais concentrado, portanto maior susceptibilidade a alagamentos.	PMCG (2010)

O método WLC (do inglês: *Weighted Linear Combination*) é um dos métodos de análise multi-critério mais utilizados em SIG. Segundo Malczewski (2011), para um certo conjunto de dados (critérios), um WLC é definido como uma combinação de planos de informação (mapas) que associa alternativas de decisões a pesos estabelecidos para cada critério, combinando ponderações e critérios de forma integrada. A modelagem foi realizada utilizando-se um “construtor de modelos” (do inglês: *Model Builder*), presente no pacote SIG utilizado - ArcGIS (Esri). Este recurso possibilita uma automatização de toda a modelagem de forma a facilitar novas cargas de dados sem a necessidade de executar todos os processamentos de forma repetitiva, elaborando por assim dizer, um modelo gráfico de todo o algoritmo elaborado para a análise.

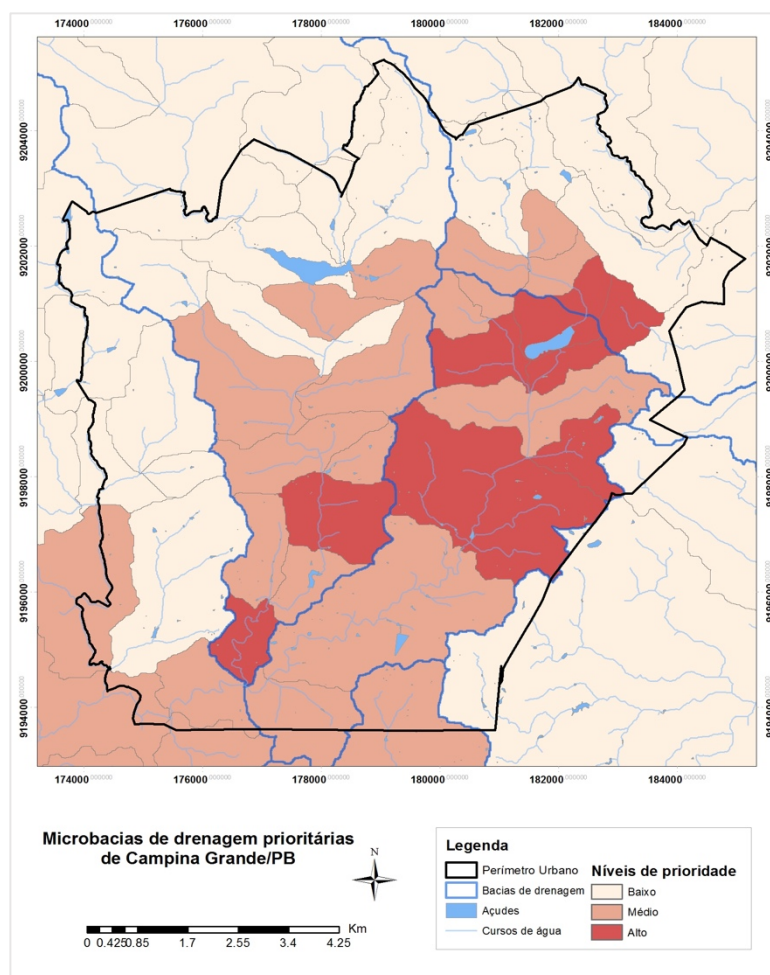
Neste trabalho, utilizou-se uma ponderação para cada um dos critérios selecionados. Sendo: 30% para a declividade média, 30% para distância a elementos de drenagem e 40% para a impermeabilização. Todos os critérios foram calculados para as áreas determinadas pelas microbacias (figura 3.6). O esquema da análise multicritério utilizada no *Model Builder* pode ser encontrada no Apêndice A.

Figura 3-6 – Critérios elaborados para ponderação: a) Declividade média das bacias; b) Distância a elementos de drenagem urbana; c) Impermeabilização das bacia



Ao fim, as microbacias foram classificadas em alto, médio e baixo nível de risco de alagamentos (figura 3.7). Os limiares para o estabelecimento da classificação de risco foram determinados a partir dos divisores por quartis, ferramenta do Arcgis, e foram validados pelos casos de alagamentos e inundações de Campina Grande – PB.

Figura 3-7 – Microbacias com níveis de prioridade de ação em Campina Grande - PB



3.2.1.2 – Método 2: Áreas com susceptibilidade a alagamentos

Para a concepção do modelo conceitual (detalhado na Tabela 3.2) de susceptibilidade a alagamentos e definição de critérios são consideradas pesquisas já desenvolvidas por outros autores (ZOU *et al.*, 2013; SADECK *et al.*, 2012; MEYER, 2008). Neste contexto, diante da disponibilidade de dados para o município de Campina Grande, a análise realizada nesse trabalho estabelece pesos aplicados pixel a pixel.

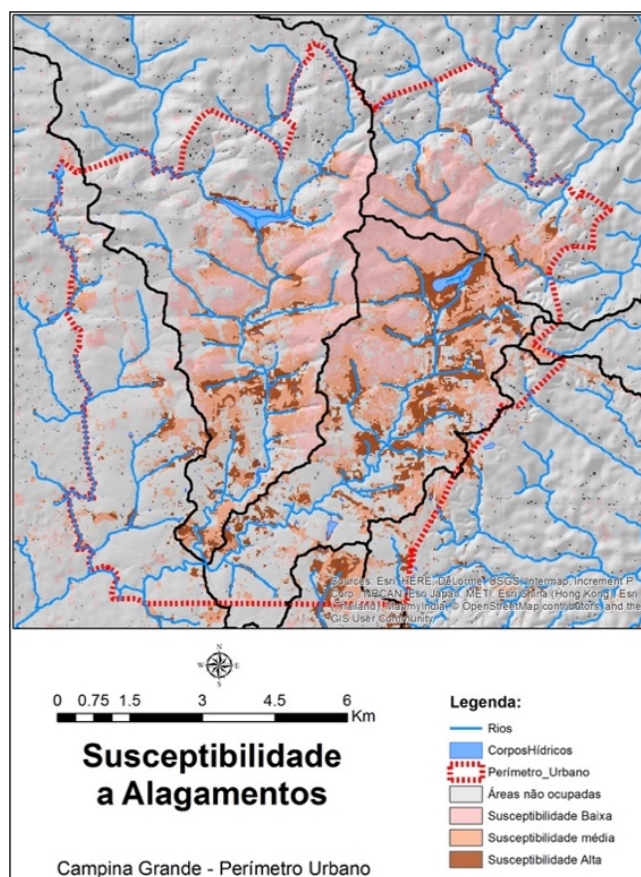
Após a determinação das funções de pertinência há uma sobreposição (overlay) para considerar os critérios padronizados e os conceitos de lógica Fuzzy. Após a execução

do modelo, o mapa final é então classificado para que sejam atribuídos limiares para determinação de susceptibilidades “altas”, “médias” e “baixas” (figura 3.8). O esquema da análise multicriterial utilizada no *Model Builder* pode ser encontrada no Apêndice A.

Tabela 3-2 - Premissas para susceptibilidade a alagamentos do Método 2;

CRITÉRIO	DESCRIÇÃO	DADO/FONTE
Declividade	Áreas com declividade média possuem maior susceptibilidade a alagamentos.	Tsuyuguchi (2015)
Altitude	Áreas com cotas de altitude mais baixas, que apresentem valores de declividade igualmente baixos (áreas planas) possuem uma maior susceptibilidade a alagamentos.	Tsuyuguchi (2015)
Vias com drenagem	Áreas que se encontrem próximas a alguma via que apresenta elementos de drenagem (bocas de lobo ou sarjetas) possuem uma menor susceptibilidade a alagamentos.	PMCG (2010)
Corpo Hídrico (Rios e lagos)	Áreas que se encontrem próximas a algum corpo hídrico (drenos, canais, açudes) existente, possuem uma maior susceptibilidade a alagamentos	Hidrografia básica do município (PMCG, 2010)
Uso do solo	Apenas as áreas susceptíveis a alagamentos que se encontram impermeabilizadas serão consideradas, devido ao maior impacto direto destes.	Rufino <i>et al.</i> (2015)

Figura 3-8 – Mapa de susceptibilidade gerado pelo modelo

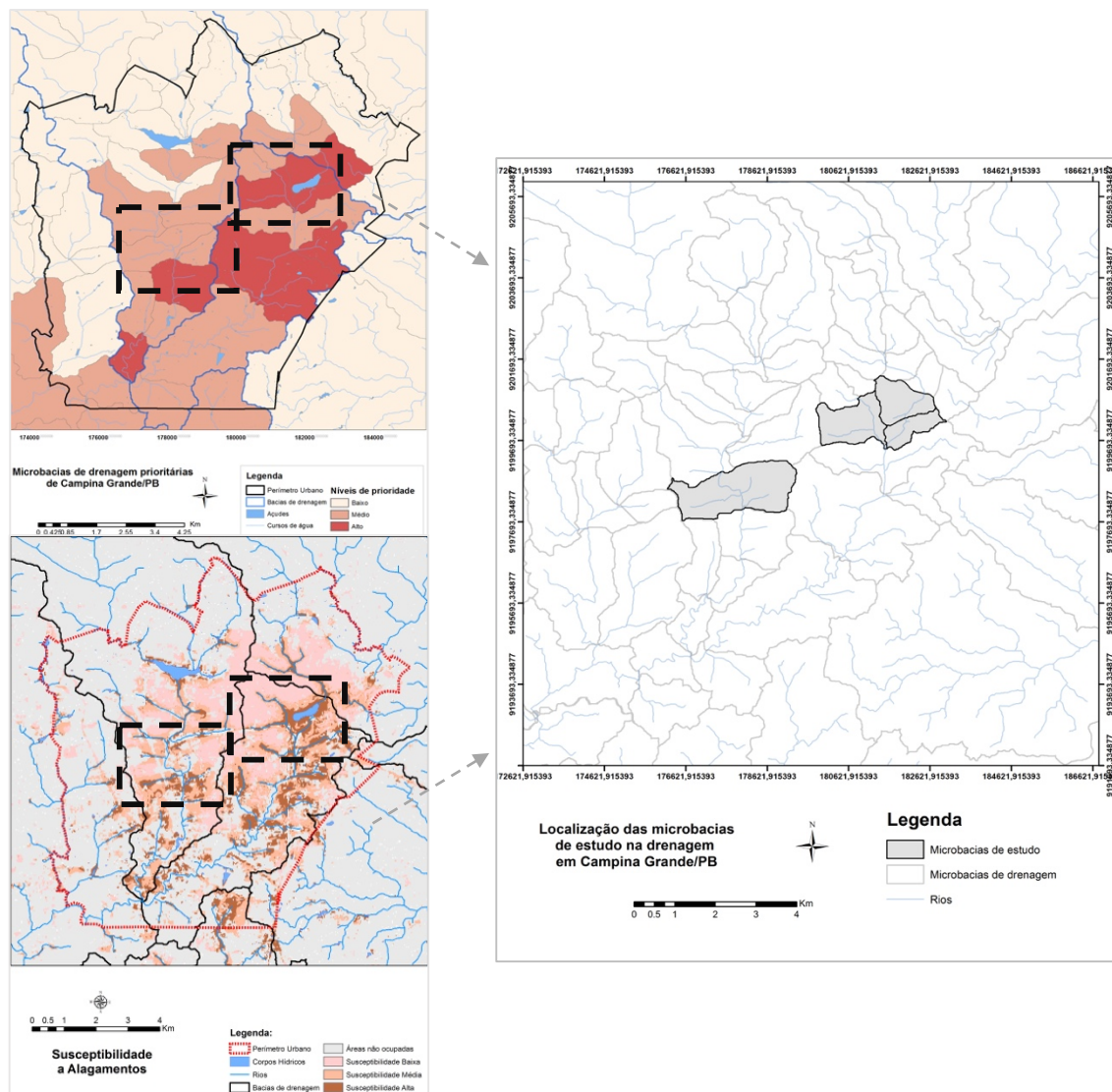


A partir do mapa final resultante dos dois métodos aplicados e apresentados anteriormente, foram escolhidas as duas microbacias de análise dessa dissertação. Foram desenvolvidos alguns critérios mínimos para a escolha:

- Apresentar média e alta susceptibilidade a alagamentos pelos dois métodos descritos;
- Apresentar comportamentos distintos com relação ao uso e ocupação do solo;
- Apresentar casos de alagamentos ou comportamento de risco em sua área comprovados (ou por dados oficiais, ou por estudos anteriores validados ou por reportagens e levantamentos em campo);

Dessa forma, as duas microbacias que atendiam a todos estes critérios estão destacados na figura abaixo.

Figura 3-9 – Microbacias estudadas nesta dissertação



3.2.2 Caracterização das microbacias de estudo

Com a delimitação e escolha das áreas de estudo para a simulação, procedeu-se com a caracterização das mesmas. Foram coletados dados de estudos anteriores em Campina Grande (Tabela 3.3), dados da Prefeitura Municipal da cidade (Tabela 3.4), visitas de campo e ferramentas de visualização de mapas e dados como o *Google Earth* e *Google Street View*.

Tabela 3-3 - Pesquisas anteriores na cidade de Campina Grande

Publicação/estudo	Contribuição
Araújo (2012)	Estimativa e análise do crescimento da demanda de água considerando cenários de uso e ocupação do solo;
Freire (2014)	Análise do sistema separador absoluto no âmbito da drenagem pluvial da cidade de Campina Grande - Estudo de caso do Canal das Piabas
Melo Filho <i>et al.</i> (2014)	Análise dimensional do sistema de macrodrenagem de águas pluviais urbanas de Campina Grande-PB – Estudo de Caso, canal das Piabas.
Nóbrega (2012)	Análise do Sistema de Drenagem de Campina Grande/PB para proteção de áreas de risco de inundação;
PMSB CG (2015)	Diagnóstico, prognóstico e proposição de medidas para o Sistema de Drenagem Urbana de Campina Grande – PB;
Ramalho <i>et al.</i> (2015)	Proposição de medidas compensatórias para o sistema de drenagem urbana de Campina Grande-PB; Estimativa de potenciais problemas na microdrenagem urbana a partir de uma avaliação multicriterial espacial;
Rufino <i>et al.</i> (2015)	Estimativas de taxas de impermeabilização do solo nas bacias urbanas do município de Campina Grande - PB utilizando o sensoriamento remoto;
Santos (2015)	Análise multitemporal integrada da permeabilidade do solo nos bairros Catolé e Sandra Cavalcante em Campina Grande – PG;
Souza (2015)	Potencial de aproveitamento de água de chuva no meio urbano: o caso de Campina Grande – PB
Tsuyuguchi <i>et al.</i> (2014) Tsuyuguchi (2015)	Estudos de delimitação de microbacias urbanas no Município de Campina Grande – PB; Macrodrenagem e ocupação do solo no Município de Campina Grande: caracterização, simulação e análises sistêmicas;

Tabela 3-4 - Dados disponibilizados pela PMCG

Órgão	Contribuição
PMCG	Shapefiles: - Uso do solo (2010); - Verticalização (2010); - Ortofoto de Campina Grande (2010); - Presença de elementos de drenagem nas quadras (2010);

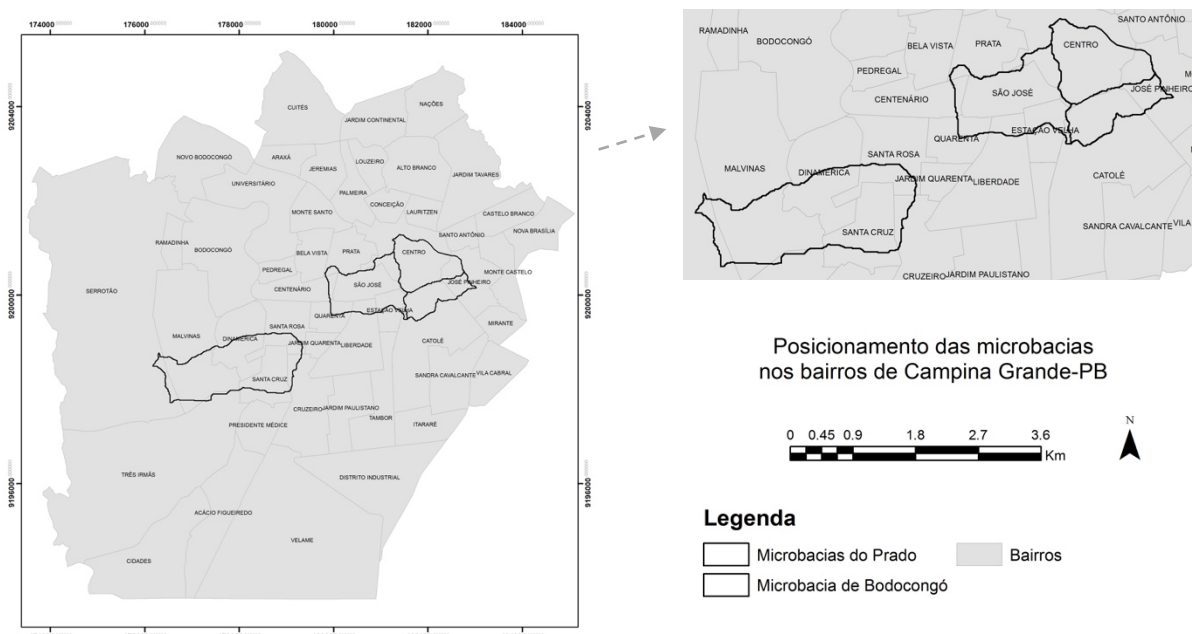
As visitas de campo e as ferramentas *Google Earth* e *Google Street View* foram essenciais para a verificação e atualização dos dados citados anteriormente.

Após a coleta dos dados da pesquisa, os mesmos foram sistematizados para permitir uma análise estruturada de todas as informações envolvidas. Todos os dados foram digitalizados e editados utilizando o software ArcGis versão 10.4 (Esri) e o Excel - Pacote office.

3.2.2.1. Quanto à localização e uso do solo

As microbacias do Prado estão inseridas dentro da Zona do Centro (dividida pelo Plano Diretor) e seus bairros têm os maiores índices de impermeabilização. O IBGE (2010) divide a cidade em 50 bairros.

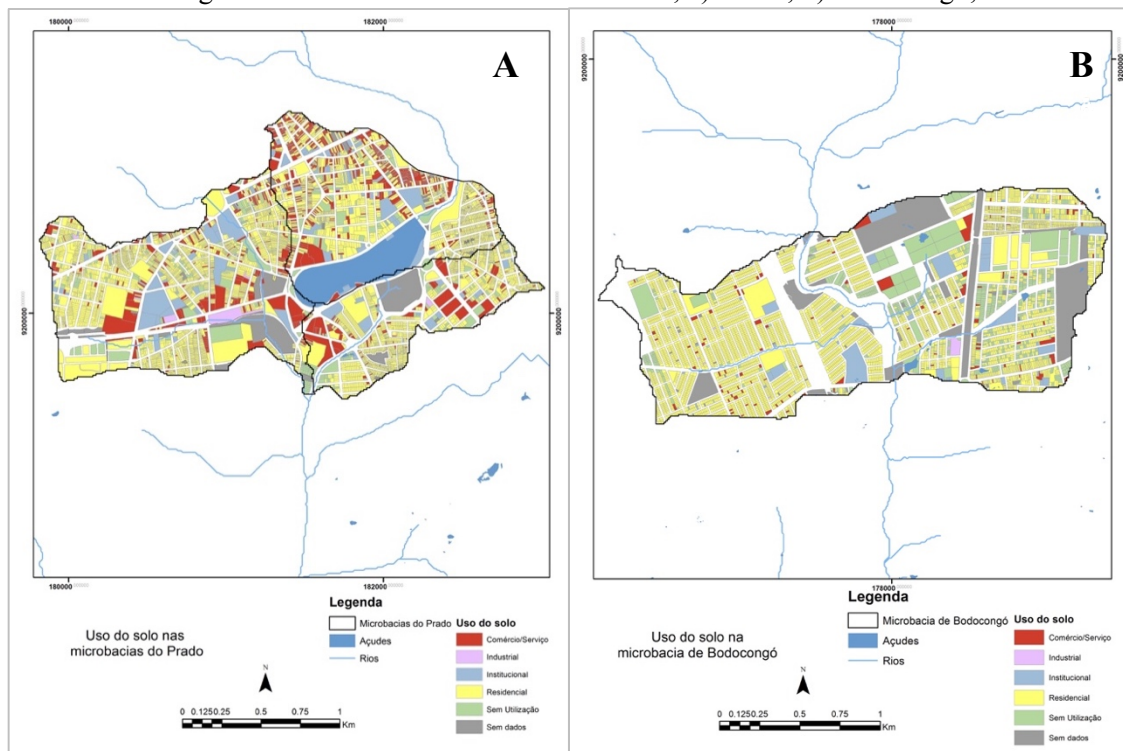
Figura 3-10 Localização das microbacias nos bairros de Campina Grande - PB



Segundo o PMSB (2015), a zona do centro tem 92.78% da sua área impermeabilizada. Já a microbacia de Bodocongó está inserida na Zona do Centro Oeste, com 56.03% de área impermeabilizada, mas com a presença de área de risco e zona especial de interesse social definidas pela Defesa Civil e CPRM (2013).

As mesmas se caracterizam por terem comportamentos diferentes de uso do solo. As microbracias do Prado (figura 3.11a) são consideradas mistas, por terem uso predominantemente dividido em residencial, comercial e institucional. Já a microbacia de Bodocongó (figura 3.11b) tem a maior parte de seus lotes ocupadas por uso residencial. Mesmo apresentando características distintas, nenhuma das microbacias apresentam planejamento para o processo de ocupação das do solo das microbacias, muito menos como uma visão hidrológica e sensível aos recursos hídricos.

Figura 3-11 - Uso do solo das microbacias; a) Prado; b) Bodocongó;



Dados disponibilizados pela PMCG e atualizados por Souza (2015) mostram as edificações presentes nos lotes (figura 3.12). O dado, em formato *shapefile*, mostra o uso a partir das divisões do uso do solo e a nível de quantidade de pavimentos (figura 3.13). A presença de edifícios indica uma maior impermeabilização do solo pois, geralmente, os edifícios apresentam menor área permeável proporcional à área do seu lote.

Figura 3-12 – Mapa de cheios e vazios (edificações); a) Prado; b) Bodocongó;

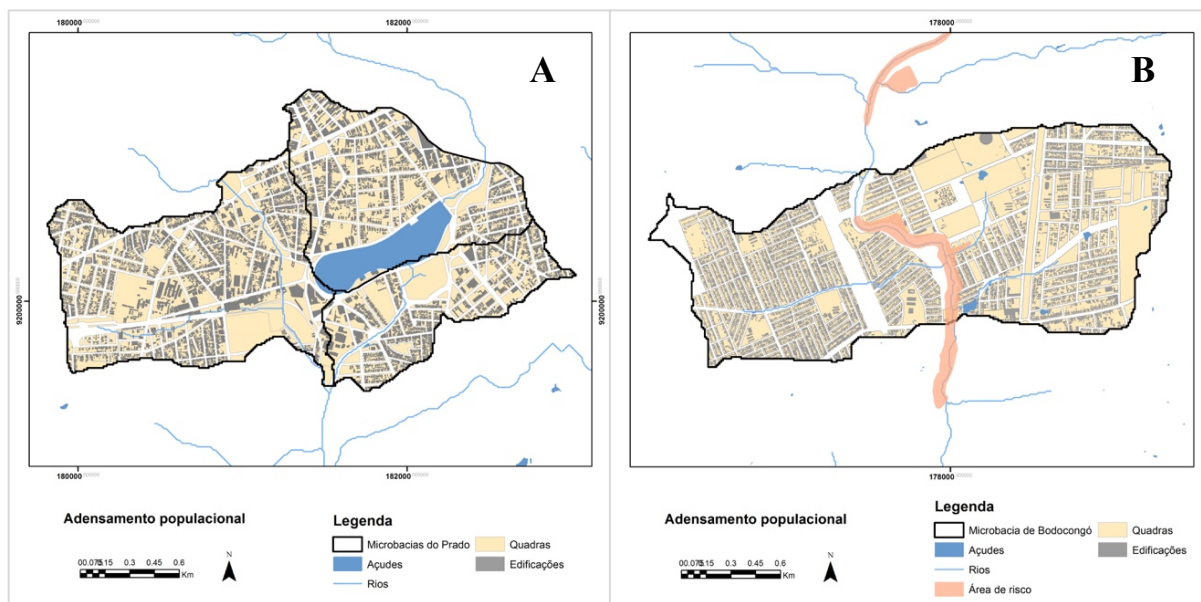
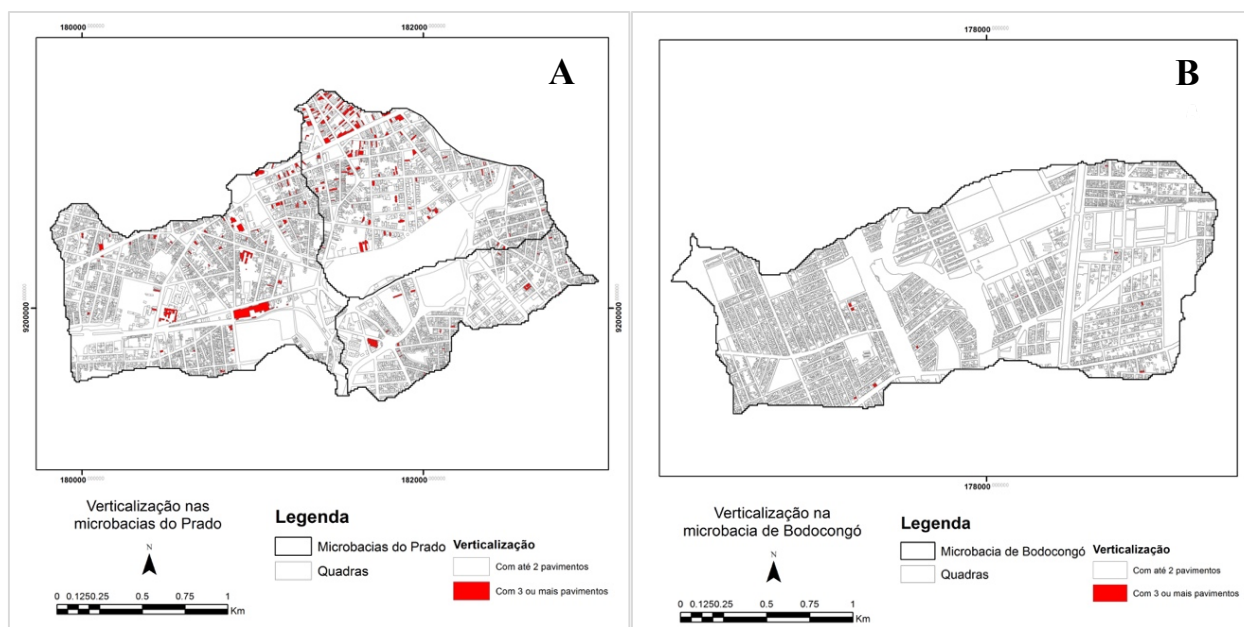


Figura 3-13 – Identificação das edificações com mais de 3 pavimentos; a) Prado; b) Bodocongó

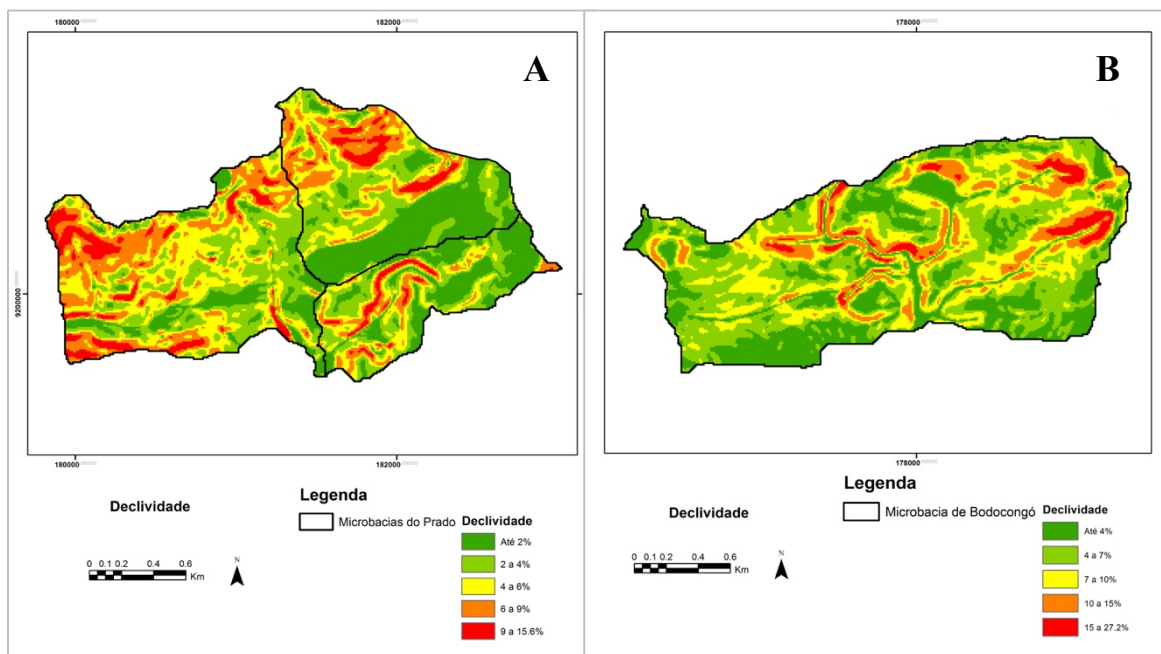


Esses dados e o mosaico de ortomagens de Campina Grande referentes ao levantamento aerofotogramétrico ocorrido no ano de 2010 e gentilmente cedidos pela PMCG, foram essenciais para calcular as áreas permeáveis e impermeáveis das quadras das microbacias.

3.2.2.2. Quanto à declividade e elementos de drenagem urbana

A partir do Modelo Digital de Elevação desenvolvido por Tsuyuguchi (2015) e com o auxílio de técnicas de geoprocessamento, foi gerado o mapa de declividade (segunda derivada em cada pixel) para as microbacias estudadas. As declividades são apresentadas na figura 3.14 em percentuais.

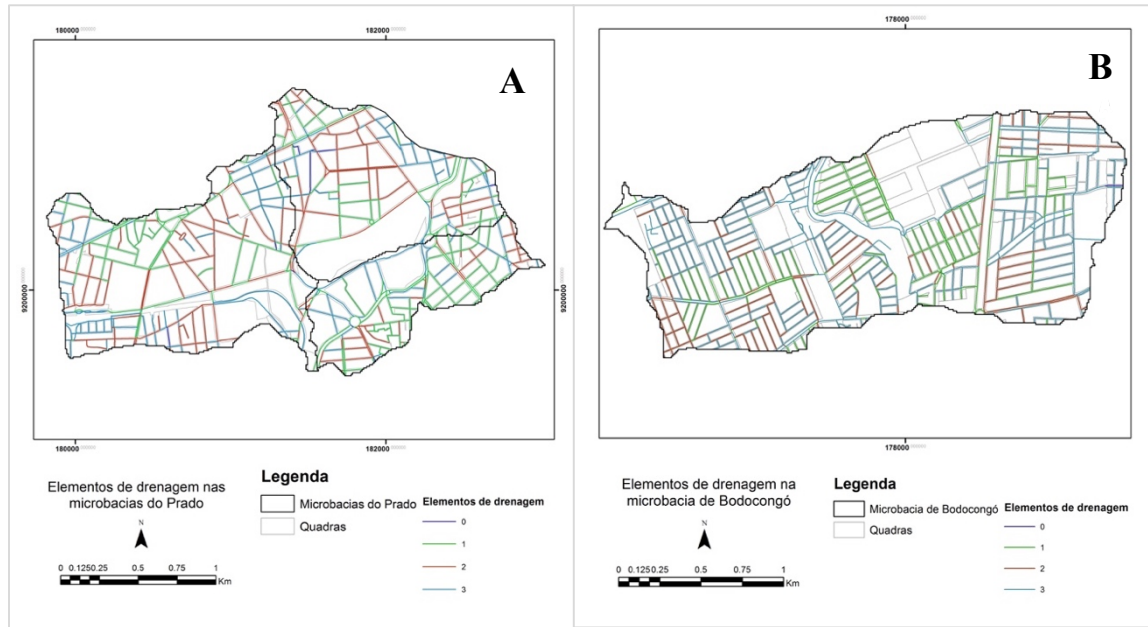
Figura 3-14 - Declividades para as áreas de estudo; a) Prado b) Bodocongó



O mapa de declividades aponta valores mistos em ambas microbacias. Bodocongó apresenta um intervalo maior dentro de sua área, entre 4,0% e 27,2%, os maiores picos coincidem com a região delimitada pela Defesa Civil como área de risco, onde há a presença de algumas ocupações irregulares. Já a microbacia do Prado tem declividades mais baixas, entre 2% a 15,6%, no entanto, os valores mais altos ocorrem em várias partes da bacia.

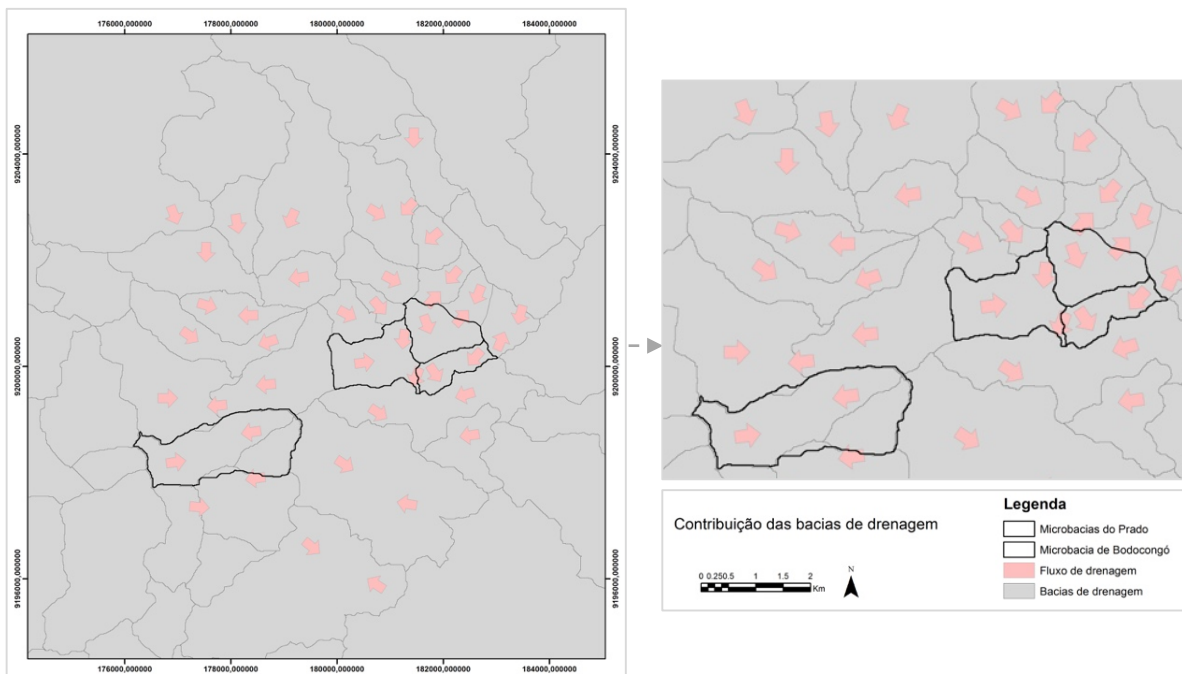
A PMCG disponibiliza um levantamento correspondente à presença de elementos de drenagem urbana para a cidade. Os resultados indicam ruas com a presença de sarjetas (número 1) e bocas de lobo (número 2), ruas sem nenhum sistema de drenagem (número 3) e ruas que não foram pesquisadas (número 0). Esse levantamento permite observar de forma aproximada a presença/ausência de elementos de um sistema de microdrenagem em várias ruas das áreas de estudo.

Figura 3-15 – Presença de elementos de drenagem urbana; a) Prado; b) Bodocongô;



Para um maior nível de detalhamento no modelo, esta pesquisa realizou um levantamento de campo com visitas às ruas e com o auxílio do *software Google Earth*. Durante as visitas, percebeu-se, em vários pontos, a inadequação e o mal funcionamento dos elementos de drenagem principalmente pela presença de vegetação e resíduos sólidos (colmatação das passagens). A PMCG também disponibilizou dados sobre a direção do fluxo da macrodrenagem das principais bacias da cidade. A fim de saber a contribuição efetiva para as microbacias de estudo, o mapa 3.16 foi utilizado como uma das entradas.

Figura 3-16 – Contribuição das bacias de drenagem;



Após a caracterização das áreas, foram elaborados os cenários que serão entrada nos processos de simulações.

3.2.2.3 – Cenário 1: Uso do solo atual

O cenário 1 (uso do solo atual) leva em consideração alguns parâmetros como área, perímetro, largura, declividade e percentual de áreas impermeáveis para cada quadra nas microbacias. Posteriormente, todos esses são descritos no tópico das simulações. O objetivo principal, é a análise dos impactos das medidas compensatórias em uma implementação possível diante da ocupação atual da área estudada.

3.2.2.4 – Cenário 2: Uso do solo de acordo com o máximo de impermeabilização previsto em legislação

Utilizando-se o percentual máximo previsto em legislação para as áreas impermeáveis, o cenário 2 indica uma simulação da “situação limite” do ponto de vista legal (considerando que a legislação seja obedecida rigorosamente), para as quadras das microbacias estudadas.

O Código de Obras de Campina Grande estabelece que a taxa de permeabilidade mínima permitida é de 20% da área do território, portanto, a taxa máxima de impermeabilização seria de 80% de sua área. Assim, todas as quadras tiveram esse valor modificado.

3.2.3 Escolha das medidas compensatórias

Para se obter a escolha das medidas compensatórias para as áreas selecionadas, foram determinados alguns critérios que precisavam ser cumpridos:

- i. As medidas compensatórias devem ser adotadas em nível de loteamento ou lote (Tucci, 2003);
- ii. As medidas compensatórias devem ser ideais para o microclima que estão inseridas (NBR 15220/2003);
- iii. As medidas compensatórias devem considerar as características das legislações vigentes preponderantes em sua área;

- iv. Devem haver estratégias possíveis para a implantação das medidas em lotes construídos e livres;

3.2.3.1 - Devem ser adotadas em nível de loteamento ou lote

Para Tucci (2003), o controle sustentável da drenagem urbana envolve em utilizar medidas compensatórias que devem ser adotadas de acordo com o estágio de desenvolvimento da área de estudo. Dessa forma, as medidas dividem-se em detrimento dos componentes de drenagem afetados:

- Fonte: envolve o controle em nível de lote ou área primária de desenvolvimento;
- Microdrenagem: medidas adotadas em nível de loteamento;
- Macrodrenagem: soluções de controle nos principais rios urbanos;

Ainda para o autor, para implementar as medidas na cidade é necessário desenvolver alguns princípios onde os principais são os seguintes: (a) as novas obras não podem aumentar a vazão máxima de jusante; (b) o planejamento e controle dos impactos existentes devem ser elaborados considerando a bacia como um todo; (c) o horizonte de planejamento deve ser integrado ao Plano Diretor da cidade; (d) o controle dos efluentes deve ser avaliado de forma integrada com o esgotamento sanitário e os resíduos sólidos.

Esses aspectos mostram a importância de impedir que novas obras causem posteriores problemas para o sistema de drenagem urbana das cidades. Dessa forma, as medidas devem ser incluídas na legislação para evitar impactos nas cidades e para garantir uma sustentabilidade das medidas implantadas.

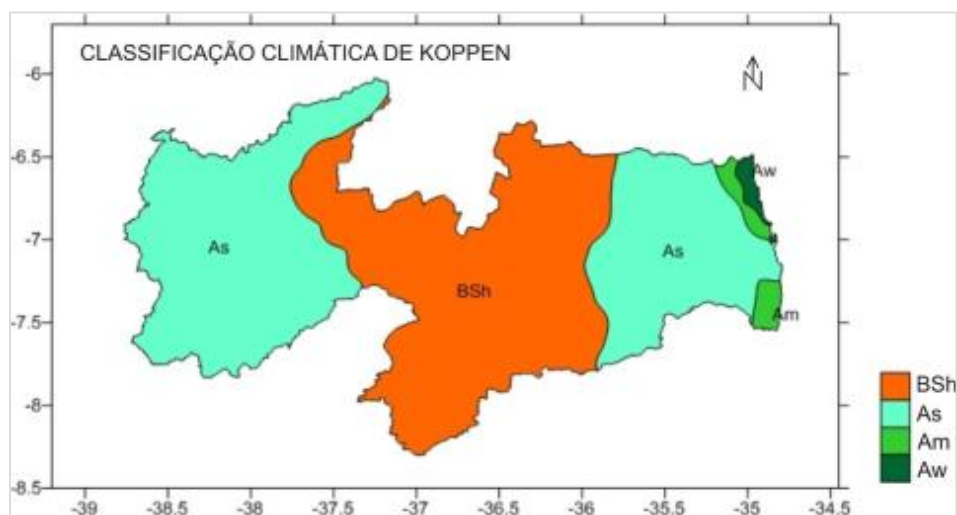
3.2.3.2 - Devem ser ideais para o microclima que estão inseridas

Para essa análise utilizou-se a classificação de *Köppen-Geiger*. De acordo com Barros *et al.* (2012), *Köppen-Geiger* é o sistema mais utilizado em geografia, climatologia e ecologia para a classificação de clima. Ainda de acordo com o autor, o método baseia-se principalmente na análise de quantidade e distribuição de precipitação e temperatura, em níveis anuais e mensais.

A classificação climática de *Köppen-Geiger* elaborada por Francisco *et al.* (2015) mostra que o estado da Paraíba está dividido em quatro climas (figura 3.17). Para Alvares

et al. (2014) a Paraíba tem o clima *BSh* que se estende por todo Planalto da Borborema (onde Campina Grande está inserida), vale do rio Paraíba, considerado um dos locais mais secos do Brasil.

Figura 3-17 – Classificação climática de *Köppen* para a Paraíba



Fonte: adaptado de Francisco *et al.* (2015)

Köppen-Geiger define o *BSh* como clima árido de estepes ou clima semiárido quente. Dessa forma, para cumprir o estabelecido nessa dissertação, as medidas a serem escolhidas deverão ser adequadas a esse tipo de clima.

A NBR 15220 de setembro de 2003 (ABNT) – Parte 3 mostra o “Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social”. Nessa norma, com base no zoneamento são elaboradas diretrizes construtivas para os espaços.

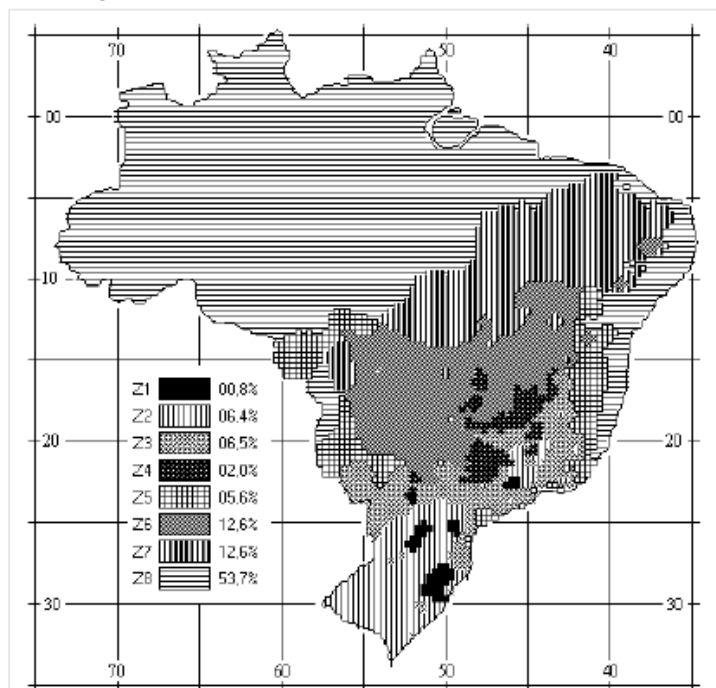
O território brasileiro foi dividido em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima (figura 3.18) e, para cada uma destas zonas, formulou-se um conjunto de recomendações técnico-construtivas que otimizam a adequação climática na cidade. Cada zona tem um percentual diferente para usar estratégias de conforto. São considerados aspectos como precipitação, umidade relativa do ar, temperatura, regime de ventos, etc.

Com base nesta norma, a cidade de Campina Grande – PB faz parte da Z8. A carta bioclimática identifica três estratégias para a cidade, sendo elas:

- F e I – Fazer uso de estratégias para ventilação dos ambientes melhorando, assim, a renovação do ar;

- G – Resfriamento evaporativo da cidade por meio da evaporação de água através do uso de vegetação, fontes de água (ou acumulação) ou outros recursos.

Figura 3-18 – Zoneamento bioclimático brasileiro;



Fonte: NBR 15220/2003

Uma vez estabelecidas as estratégias de construção ideal ao microclima, as medidas compensatórias devem, além de suprir as necessidades do clima, estimular para que as recomendações construtivas sejam cumpridas.

3.2.3.3 - Devem considerar as características das legislações vigentes preponderantes em sua área

A legislação pode ser usada como fonte para regular a ocupação das cidades e propiciar o seu funcionamento. De acordo com Brasil (2004), o objetivo do Plano Diretor é organizar o crescimento e o funcionamento do município como um todo, incluindo, a partir do Estatuto da Cidade, áreas urbanas e rurais (§ 2o do Art. 40 do EC).

A lei 10.047 do estado da Paraíba está em vigor desde 09 de julho de 2013 e dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do “Telhado Verde” nos locais que especifica, dentre outras providências. O Art. 1 mostra que os projetos de condomínios edificados, residenciais ou não, com mais de 3 (três) unidades agrupadas verticalmente deverão

prever a construção do “Telhado Verde”. O Art. 4 afirma que a área destinada pelas construções edificadas ao “Telhado Verde” será considerada, para todos os efeitos, como tendo as mesmas características de área permeável.

Como citado anteriormente, o Plano Diretor de Campina Grande, Lei Complementar 003 de 2006, fragmenta a cidade em quatro zonas e as caracterizam de acordo com a infraestrutura instalada, além de algumas tendências de ocupação (tabela 3.5). Atualmente, o plano diretor de CG está em fase de revisão.

Tabela 3-5 - Zoneamento urbano de Campina Grande - PB

ZONAS	DESTINO
ZONA DE QUALIFICAÇÃO URBANA	Usos múltiplos, 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.
ZONA DE RECUPERAÇÃO URBANA	Uso predominantemente residencial, com carência de infraestrutura e equipamentos públicos e incidência de loteamentos irregulares e núcleos habitacionais de baixa renda.
ZONA DE EXPANSÃO URBANA	Uso e a ocupação do solo destinam-se ao crescimento da cidade.
ZONA DE OCUPAÇÃO DIRIGIDA	Uso e a ocupação do solo sofrem restrições à intensificação, por inexistirem condições físicas favoráveis, equipamentos urbanos ou infraestrutura urbana instalada, sendo passível de parcelamento de baixa densidade ocupacional.

Fonte: Plano Diretor de Campina Grande – PB (PMCG, 2006)

O Plano Diretor apresenta um zoneamento que descreve a possibilidade ou não de crescimento a partir de condições/ suficiência da infraestrutura instalada, mas não apresenta índices. O capítulo IV - seção IV refere-se ao Manejo de Águas Pluviais e Drenagem Urbana e o Art. 114 tem o objetivo de “*gerenciamento da rede hídrica no território municipal, visando ao equilíbrio sistêmico de absorção, retenção e escoamento das águas pluviais*”.

O Código de Obras (2013) estabelece índices urbanísticos como a taxa de ocupação por zona (Tabela 3.6).

Tabela 3-6 - Taxa de ocupação por zona

		ZONA DE EXPANSÃO URBANA	ZONA DE QUALIFICAÇÃO URBANA	ZONA DE OCUPAÇÃO DIRIGIDA	ZONA DE RECUPERAÇÃO URBANA
TAXA DE OCUPAÇÃO MÁXIMA	USO RESIDENCIAL	60%	60%	60%	60%
	OUTROS USOS	75%	75%	70%	75%

Fonte: Código de obras (2013)

Como citado anteriormente, a taxa de permeabilidade mínima permitida é de 20% da área do território. O Art. 249 define Taxa de Permeabilidade (TP) como sendo o percentual mínimo de área descoberta e permeável do terreno em relação a sua área total, dotada de vegetação que contribua para o equilíbrio climático e propicie alívio para o sistema público de drenagem urbana.

Ainda com relação a impermeabilização, atualmente, a PMCG está com o projeto “Cresce Campina” com um aporte financeiro de mais de 10 milhões de reais, no qual mais de 400 ruas receberam pavimentação asfáltica entre os anos de 2013 a 2016 e mais de 100 ruas da área urbana estão com previsão de pavimentação asfáltica para o ano de 2017.

Diante disso, as medidas compensatórias a serem escolhidas deverão se adequar e cumprir as especificações das legislações supracitadas.

3.2.3.4 - Devem haver estratégias para a implantação das medidas

Para alcançar uma maior aplicabilidade das medidas, nos lotes construídos e nos espaços livres, elas devem ter possíveis aplicações em pelo menos um desses casos (já ocupados ou ainda disponíveis para ocupação).

3.2.3.5 – Escolha das medidas

Após a definição dos critérios e levantamento das medidas compensatórias de drenagem urbana mais utilizadas, são apresentadas a seguir as medidas compensatórias escolhidas para as microbacias de estudo: coberturas verdes, pavimentos permeáveis e jardins de chuva.

Entende-se que essas medidas poderão ser usadas em nível de loteamento ou lote, ou seja, na microdrenagem; podem auxiliar no resfriamento evaporativo da cidade, seja com suas vegetações ou com dispositivos de acumulação de água, auxiliando, inclusive,

em época da seca; são adequadas para a implantação de acordo com a legislação vigente e; têm aplicações em áreas construídas e em espaços livres.

3.2.4 Simulações hidrológicas

As simulações foram feitas através do *software* computacional *Storm Water Management Model – SWMM*. Com o SWMM é possível analisar o comportamento da bacia através de simulações hidrológicas. Trata-se de um modelo simulador chuva-vazão que representa quantitativa e qualitativamente o escoamento superficial, especialmente em áreas urbanizadas. Além de parâmetros hidrológicos, é necessária a inserção dos parâmetros físicos das sub-bacias de drenagem contribuintes para o trecho em estudo.

Para a modelagem do sistema foram utilizados os cenários 1 e 2 de uso do solo, com suas taxas de ocupações, a fim de melhor averiguar o nível de comprometimento real da área. O software de simulação adotado disponibiliza várias aplicações, dentre as quais, analisar os valores dos volumes de escoamento (VE) antes e depois das implantações das medidas compensatórias. Os volumes são expressos através de intervalos e cores (tabela 3.7).

Tabela 3-7 - Intervalos usados no SWMM para caracterizar o escoamento

COR	VOLUME DE ESCOAMENTO (pés³/s)	VOLUME DE ESCOAMENTO (m³/s)
Azul escuro	Menor que 0.01	Menor que 0.0002
Azul claro	Entre 0.05 e 0.01	Entre 0.001 e 0.0002
Verde	Entre 0.10 e 0.05	Entre 0.002 e 0.001
Amarelo	Entre 0.50 e 0.10	Entre 0.014 e 0.002
Vermelho	Maior que 0.50	Maior que 0.14

Fonte: Rossman (2015)

A entrada de dados pluviométricos foi baseada no conceito de *período de retorno* – o inverso da probabilidade de um determinado evento ser igualado ou superado em um ano qualquer (TUCCI, 2005). Tucci e Bertoni (2003) classificam os intervalos de tempos de retorno para sistemas de macrodrenagem, microdrenagem e zoneamento de áreas ribeirinhas (Tabela 3.8). Como a abordagem para intervenção dessa dissertação é na

microdrenagem, áreas que são predominantemente residenciais e comerciais, serão usadas os tempos de retorno de dois (2) e cinco (5) anos nas análises.

Tabela 3-8 - Tempos de retorno de acordo com o sistema analisado

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

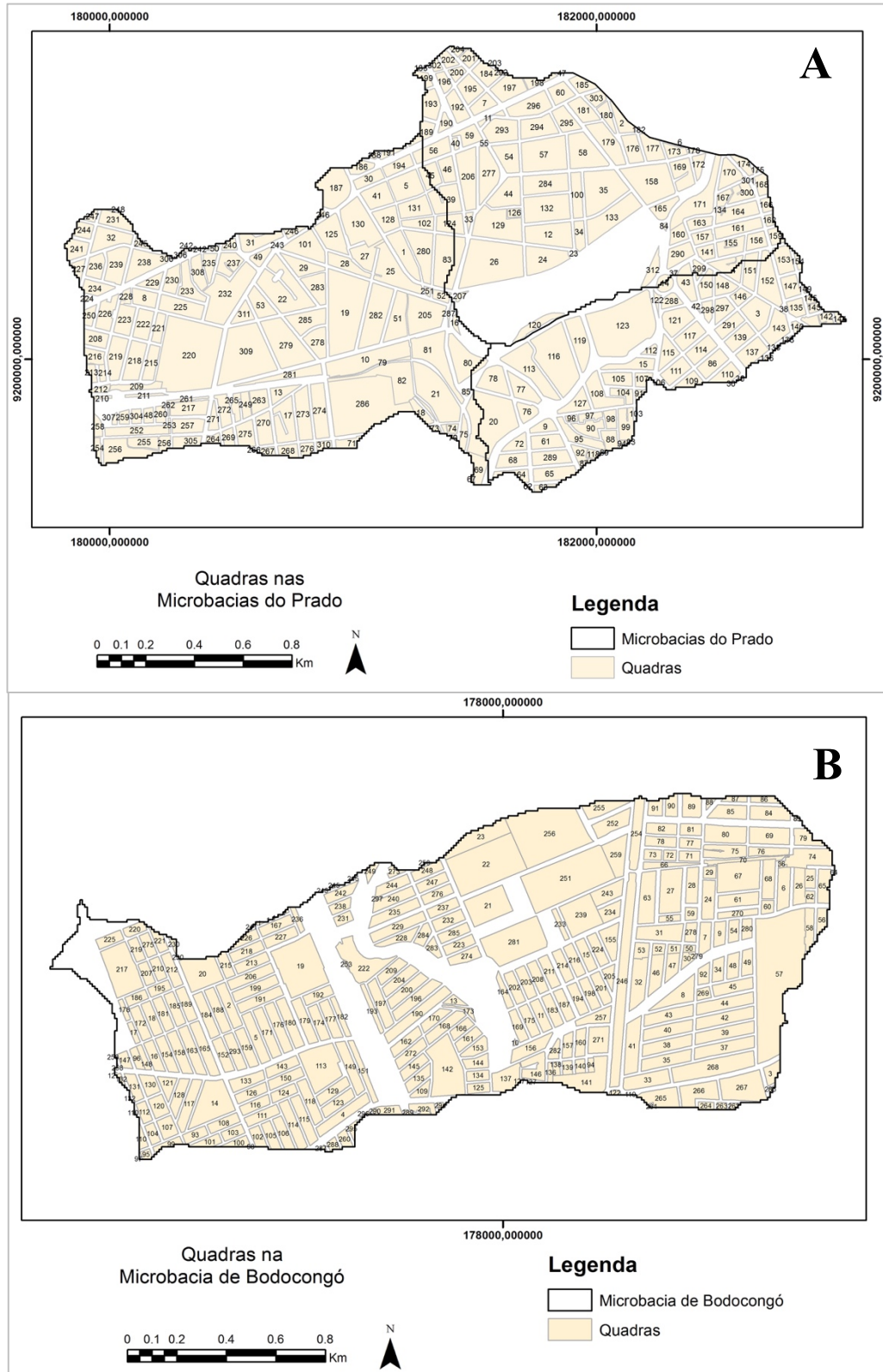
Fonte: Tucci e Bertoni (2003)

A presente pesquisa utilizou, ainda, o conceito de “tempos de recuperação” para as áreas de estudo, como sendo o tempo necessário para que elas retornem as suas condições iniciais antes de ocorrer a precipitação (SANTOS, 2015). O SWMM disponibiliza mapeamentos nos instantes “imediatamente após” e “com diferentes tempos de recuperação” após a precipitação. Assim se torna possível analisar como as microbacias de estudo se comportam e se recuperam.

3.2.4.1 – Entrada e pré-processamento de dados das microbacias de estudo

A princípio, as microbacias foram divididas por “*subcatchments*” ou “sub-bacias” (nomenclatura dada pelo SWMM), que serão referidas como “quadras” nessa dissertação. São áreas de detalhamento (dentro das microbacias de estudo) que devem ser caracterizadas através de parâmetros e analisadas no momento das simulações. Com os dados oficiais disponibilizados pela PMCG e pelo uso do *Google Earth*, levantou-se que as microbacias do Riacho do Prado têm um total de 312 quadras enquanto a do Riacho Bodocongó tem um total de 297 quadras (figuras 3.19a e 3.19b).

Figura 3-19 – Quadras das microbacias do a) Prado e b) Bodocongó;



No SWMM, é necessária a inserção de parâmetros para a caracterização dessas quadras. A tabela 3.9 mostra uma síntese de todos os parâmetros necessários para a simulação.

Tabela 3-9 - Parâmetros 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	%

Os parâmetros da área, largura equivalente, declividade e porcentagens de áreas impermeáveis foram calculados a partir de técnicas de geoprocessamento com os dados disponibilizados pela PMCG e imagens do *Google Earth*, para cada quadra de cada microbacia. A declividade média de cada quadra foi calculada a partir do MDE elaborado por Tsuyuguchi (2015) e auxílio do ArcGis.

A escolha dos valores dos coeficientes de Manning seguiram a recomendação do manual do SWMM (ROSSMAN, 2015) para as áreas impermeáveis e permeáveis. Em síntese, os valores mais comuns são mostrados na tabela 3.10.

Tabela 3-10 – Valores dos coeficientes de Manning

Coefficientes de Manning	
TIPO DE SUPERFÍCIE	COEFICIENTE
Asfalto liso	0,011
Concreto	0,012
Argila	0,015
Superfície cimentada	0,024
Solos com vegetação natural	0,04 – 0,08

Fonte: Rossman (2015)

Nessa dissertação, através da análise da ortofoto de Campina Grande e das visitas de campo, percebeu-se que a superfícies mais comum nas áreas impermeáveis era o asfalto liso e nas áreas permeáveis era do solo com vegetação natural.

Para Rossman (2005), a largura da quadra (W) é a característica do escoamento superficial. O parâmetro W relaciona o comprimento máximo que o escoamento superficial alcançará de acordo com a sua área de aplicação. Garcia (2005) desenvolveu as equações que caracterizam o escoamento da seguinte forma:

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

$$kc = 0,282x \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$W = \frac{A}{le}$$

Onde: *le* é a largura do retângulo equivalente; *kc* é o coeficiente de compacidade; *A* é a área da quadra e *P* é o perímetro da quadra.

Os parâmetros *DI* e *DP* indicam a profundidade de armazenamento em depressão em áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente. Nóbrega (2012) calibrou os parâmetros *DI*, *DP* e *AINC* para todo o município de Campina Grande – PB, com análises também por sub-bacias. Na presente pesquisa, os valores foram considerados como *input* (entrada) de dados (tabela 3.11). O parâmetro *AINC* indica a porcentagem de área impermeável sem armazenamento na depressão.

Tabela 3-11 - Valores de *DI*, *DP* e *AINC*

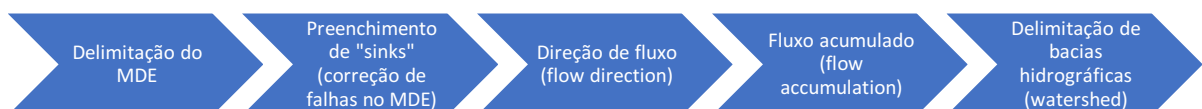
PARÂMETROS	VALORES
Capacidade de armazenamento em depressões - Impermeáveis	1,01mm
Capacidade de armazenamento em depressões - Permeáveis	5,08 mm
Áreas impermeáveis não conectadas	10%

Fonte: Nóbrega (2012)

No SWMM, cada quadra se comporta como uma “bacia”, portanto, o conceito hidrológico que uma bacia deve ter apenas um exutório deve ser seguido. A distribuição da direção do fluxo das quadras foi feita através do processo de delimitação automática de bacia hidrográfica desenvolvido no ambiente ArcGIS, juntamente com as extensões *Spatial Analyst e Hydrology Modeling (ESRI)*.

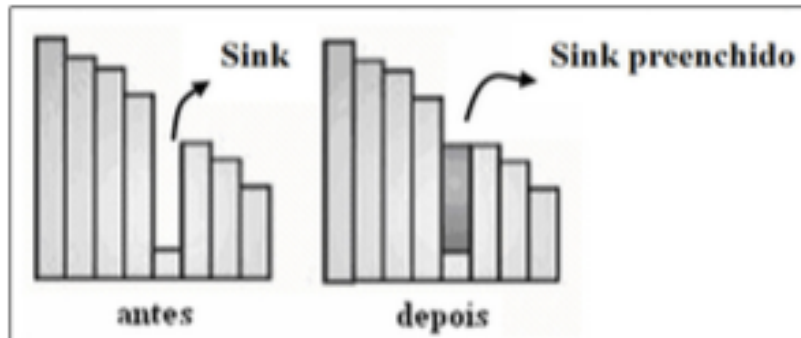
Para a obtenção automática de bacias hidrográficas em SIG, algumas etapas são necessárias. Um mapeamento da direção de fluxo para cada pixel do MDE, é a terceira etapa do processo de delimitação automática (Figura 3.20). Neste trabalho, para caracterização mais precisa das áreas, o processo prosseguiu até a quarta etapa.

Figura 3-20 - Processo completo de delimitação automática de bacias hidrográficas



As falhas no MNT advindas dos dados do MDE são denominadas de “sinks” que, conforme Mendes & Cirilo (2001), caracterizam-se por áreas rodeadas por elevações com valores de cotas superiores, semelhantes a uma depressão. São consideradas empecilhos ao escoamento. O preenchimento dessas pequenas depressões é o primeiro tratamento dado à matriz de altitudes (figura 3.21).

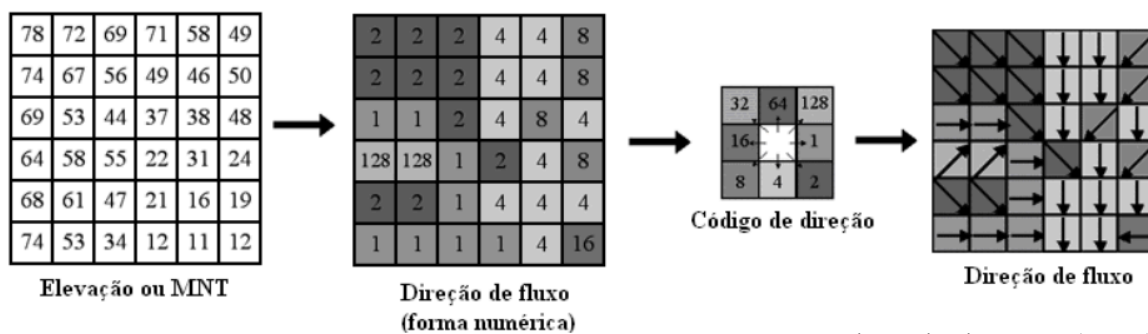
Figura 3-21 - Processo de preenchimento de “falhas”



Fonte: Sobrinho *et al.* (2010)

A direção de fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica e é obtida pela função “flow direction” no ArcGis, que gera uma grade regular definindo as direções de fluxo tomando-se por base a linha de maior declividade do terreno. A nova grade numérica gerada determina a direção de maior declividade de um “pixel” em relação a seus oito “pixels” vizinhos. Assim, ocorre a descrição numérica da direção que a água irá percorrer após atingir cada “pixel”, que pode ser representada graficamente por meio da aplicação do código de direção (figura 3.22).

Figura 3-22 – Função “flow direction”



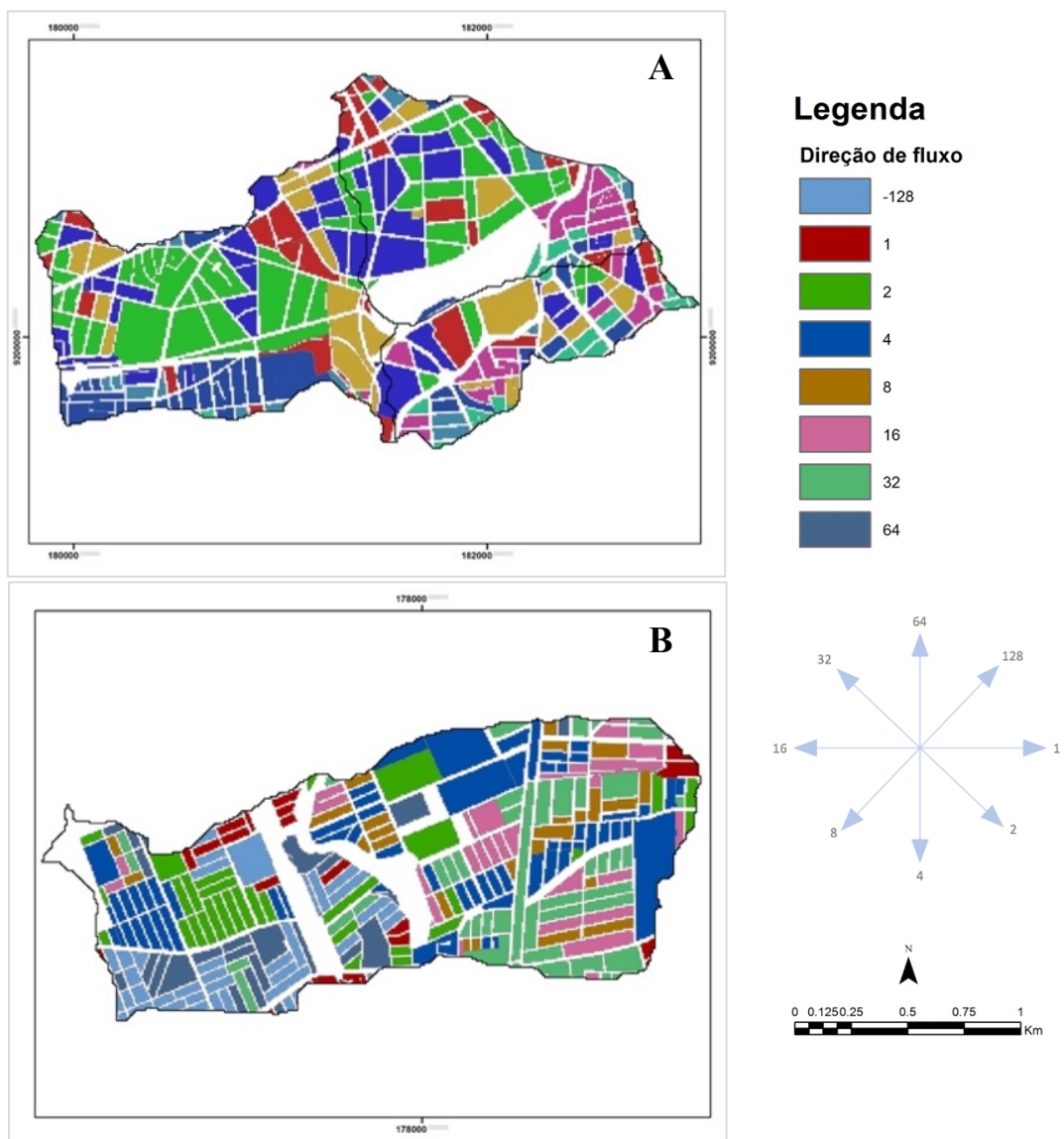
Fonte: adaptado de ESRI (2008)

O código de direção disponibilizará a direção de fluxo em cada pixel, nesse trabalho, para uma quantificação por quadras, foi realizada uma análise zonal de forma a

estabelecer a direção de fluxo com maior ocorrência nos pixels de cada quadra (*majority*). Os resultados obtidos para as microbacias de estudo estão localizados na figura 3.23. Já o fluxo acumulado (quarta etapa do processo) é um parâmetro que indica o grau de confluência do escoamento. De acordo com Mendes & Cirilo (2001), o fluxo acumulado representa a rede hidrográfica, sendo possível montar nova grade contendo os valores de acúmulo de água em cada “pixel”.

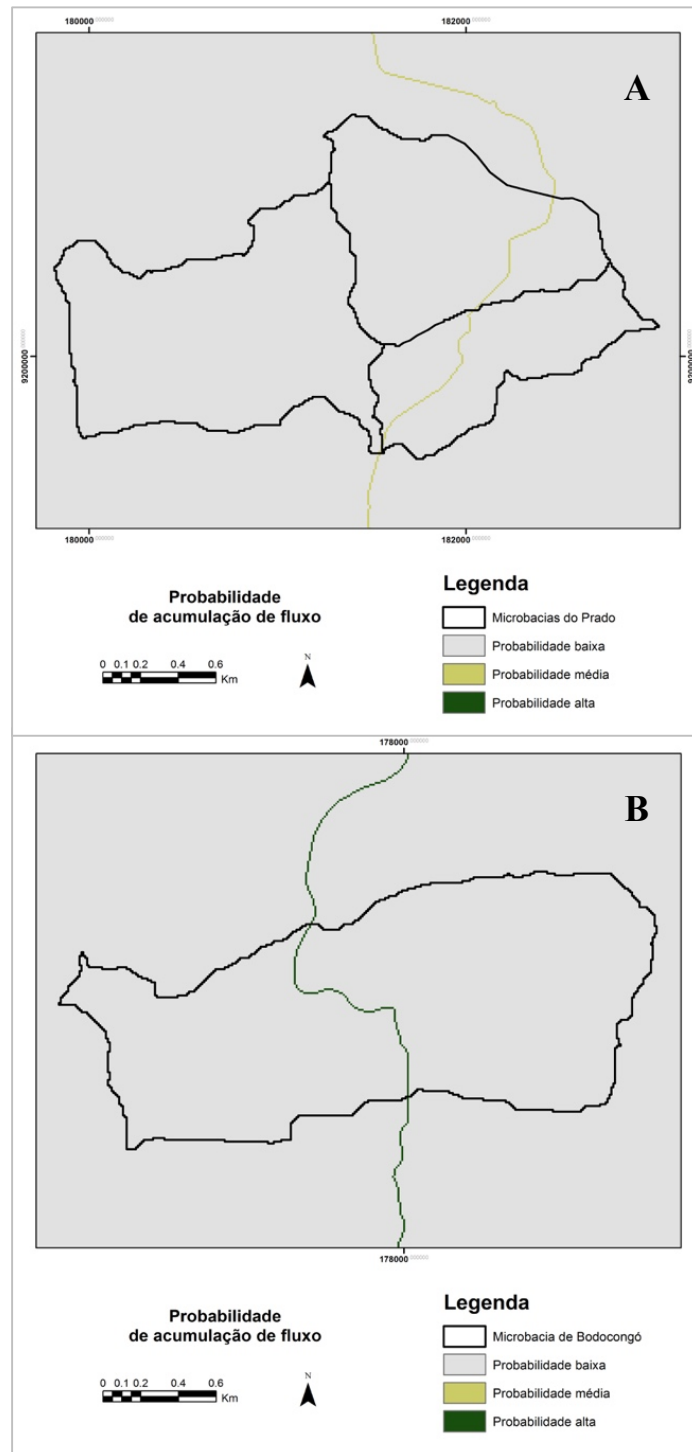
O mapa gerado fornece pontos com acumulação de fluxo, ou seja, locais onde provavelmente durante um evento mais concentrado de chuvas pode haver a ocorrência de alagamentos.

Figura 3-23 – Direção de fluxo majoritária das quadras do a) Prado; e b) do Bodocongó;



A figura 3.24 mostra a análise para as duas microbacias de estudo, percebe-se que a microbacia de Bodocongó trechos com alta probabilidade de acumulação de fluxo dentro dos seus limites. Essa análise buscou caracterizar e validar que as microbacias são áreas que, em casos de precipitações, poderão ter casos de alagamentos (acumulação de água) em seu território.

Figura 3-24 – Acumulação de água nas microbacias do a) Prado e b) Bodocongó;



Os conceitos dispostos e o processo de delimitação automática das bacias hidrográficas foram utilizados para definir o sentido a jusante das quadras e inserir do processo de simulação do SWMM.

3.2.4.2 – Entrada de dados de infiltração

No SWMM há três formas de inserir os dados de infiltração no modelo: através das Equações de *Horton*, do Método de *Green-Ampt* e do Método *SCS*. Paixão *et al.* (2009) desenvolveram uma pesquisa no município de Lagoa Seca – PB, cidade vizinha a Campina Grande, com cerca de 65 testes de infiltração. Essa pesquisa encontrou os valores de capacidade de infiltração inicial (mm/h), final (mm/h) e constante de decaimento (1/h) para a Equação de Horton.

Essa equação indica que a infiltração geralmente é maior no início e decai ao longo do processo até atingir um patamar constante. A relação proposta por Horton é a seguinte:

$$f_p = f_f + (f_0 - f_f)xe^{-kt}$$

Onde: f_p = taxa de infiltração no tempo t (cm/h); f_f = taxa de infiltração mínima (cm/h); f_0 = taxa de infiltração inicial (cm/h); k = constante da exponencial (/h); e t = tempo médio do intervalo (h).

Devido a proximidade das cidades e de suas semelhanças, os valores determinados (tabela 3.12) foram indicados por Paixão *et al.* (2009) para os estudos no município de Campina Grande e foram utilizados nas as simulações da presente pesquisa.

Tabela 3-12 - 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)

3.2.4.3 – Entrada de dados de precipitação

Os volumes de escoamento em uma bacia hidrográfica são determinados por fatores de natureza climática (precipitação, evaporação, temperatura, umidade do ar, vento, etc) e por suas características físicas, geológicas e topográficas.

Dessa forma, em prol de executar as simulações de forma efetiva, é necessário introduzir a precipitação de forma coerente no *software*. Na estimativa da precipitação utilizou-se a equação geral da curva de intensidade-duração-frequência. Aragão (2000) calculou os coeficientes B, n, m e K para Campina Grande (tabela 3.13) através da equação genérica de intensidade (6). O gráfico da curva para todo o município está na figura 3.25.

Tabela 3-13 - Coeficientes da curva IDF para Campina Grande - PB

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

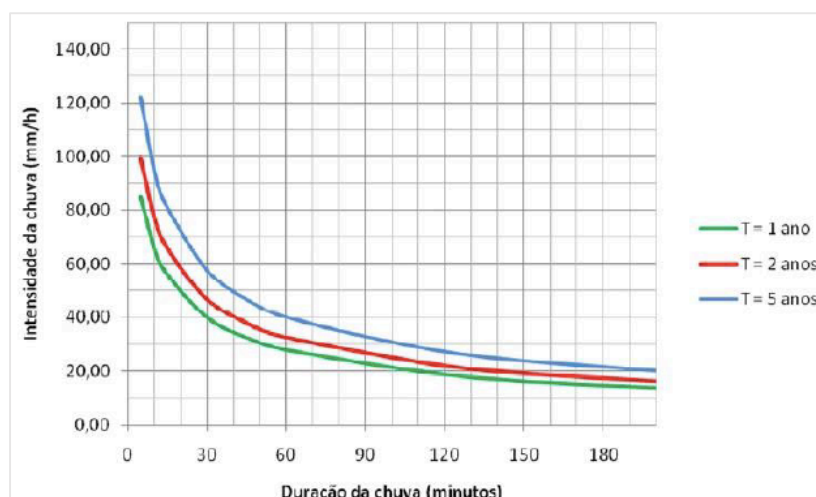
Fonte: Aragão (2000)

A equação utilizada foi a genérica para curvas IDF, mostrada abaixo:

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

Onde: i é a intensidade em mm/h, T_r o tempo de retorno em anos, t a duração da chuva em minutos e K, b, c e d são os parâmetros locais.

Figura 3-25 - Gráfico da curva IDF para Campina Grande - PB



Fonte: Nóbrega (2012)

Os valores da precipitação acumulada, em *mm*, foram inseridos no SWMM. Os valores foram calculados utilizando um passo (intervalo) de seis minutos para os períodos de retorno de dois e cinco anos (tabela 3.14).

Tabela 3-14 - Valores utilizados para a precipitação acumulada para TR 2 anos e TR 5 anos

Tempo (minutos)	Precipitação acumulada para TR de 2 anos (mm)	Precipitação acumulada para TR de 5 anos (mm)
6	9,36	11,53
12	14,45	17,79
18	18,10	22,28
24	21,02	25,88
30	23,48	28,91
36	25,65	31,58
42	27,58	33,96
48	29,34	36,13
54	30,97	38,13
60	32,48	39,99
66	33,89	41,73
72	35,23	43,38
78	36,50	44,94
84	37,70	46,42
90	38,86	47,84
96	39,96	49,20
102	41,02	50,51
108	42,05	51,77
114	43,03	52,98
120	43,99	54,16

Com o auxílio da fórmula de *Kirpich* (equação 5) foram calculados os tempos de concentração (*tc*) das microbacias de estudo (KIRPICH, 1940). O *tc* mede o tempo gasto para que toda a bacia contribua para o escoamento superficial na seção considerada.

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

Sendo: *tc*= tempo de concentração (min); *L*= comprimento do talvegue (m); *S*= declividade do talvegue (m/m).

Os dados necessários para a inserção das equações das microbacias foram obtidos a partir da PMCG e Tsuyuguchi (2015). O resultado mostrou o tempo de aproximadamente 2 horas, o que justifica o tempo máximo de 120 minutos na precipitação.

3.2.4.4 – Entrada de dados do sistema de drenagem urbana

Os elementos de drenagem são chamados de “condutos” e “nós” no SWMM. Os condutos são os elementos pelos quais as águas chegam a algum ponto. Eles representam as galerias pluviais, as sarjetas e os canais. Os nós são os poços de visita e bocas de lobo.

Como não foi possível obter os projetos de drenagem para o município, os valores de declividade e dimensões internas foram inseridos de acordo com a NBR 9649 e pelo manual do SWMM (2015). O comprimento das galerias pluviais foi definido pela distância entre dois nós. Nessa dissertação não foi utilizada a propagação de escoamento nos condutos e nós do sistema, devido a insuficiência dos dados obtidos para dar entrada nas simulações, no entanto, alguns pontos verificados foram inseridos para validar os resultados.

3.2.4.5 – Entrada de dados de LID (medidas compensatórias)

As medidas compensatórias (MCs) têm entradas distintas no SWMM. No *software* existem seis tipos de camadas (níveis) possíveis para a modelagem de LIDs, no entanto, não necessariamente a medida utilizará todas as camadas. A tabela 3.15 mostra quais camadas são necessárias para a simulação das medidas compensatórias escolhidas.

Rossman (2015) enfatiza a importância de encontrar valores precisos em todas as entradas nas camadas para que a simulação final tenha resultados satisfatórios.

Tabela 3-15 - Camadas para modelagem de LID

	PAVIMENTO PERMEÁVEL	COBERTURA VERDE	JARDIM DE CHUVA
SUPERFICIAL	X	X	X
PAVIMENTO	X		
SOLO	X	X	X
ARMAZENAMENTO	X		
DRENO PROFUNDO			
DRENAGEM		X	

Fonte: Rossman (2015)

Os dados da camada do tipo de solo devem ser da área de estudo. Segundo o Zoneamento Agropecuário da Paraíba (1978) e AESA, o solo da região em que se encontra o município de Campina Grande, com denominação SS8, é uma associação de:

SOLONETZ SOLODIZADO, textura média, fase caatinga hiperxeróla, relevo plano e suave ondulado + SOLOS LITÓLICOS EUTRÓFICOS, textura arenosa e/ou média, fase pedregosa, caatinga hiperxeróla, relevo suave ondulado, substrato gnaisse e granito + AFLORAMENTOS DE ROCHA. Pela nova classificação adotada (EMBRAPA, 2007), esses solos são chamados atualmente, de PLANOSSOLO HÁPLICO SÁLICO e NEOSSOLOS LITÓLICOS, respectivamente.

Ainda segundo a EMBRAPA (2007), esses solos são arenosos, com profundidade moderada e susceptíveis a erosão. Pesquisas anteriores como Lima *et al.* (2007) e Baracuhy *et al.* (2003) realizaram ensaios e mostraram que o solo de Campina Grande é predominantemente arenoso. Rossman (2015) traz quatro grupos de classes de solos (tabela 3.16) baseados na análise do NCRS (*National Resources Conservation Service*).

Dessa forma, devido aos dados do solo da Campina Grande, das pesquisas e da classificação feita pelo SWMM, nesta pesquisa, assume-se que o solo que melhor aproxima da caracterização oficial é do grupo B tipo solo lemo-arenoso. Feito isso, foram levantadas as características do solo (tabela 3.17) de acordo com o especificado no Manual do SWMM (2015).

Tabela 3-16 – Classes hidrológicas de solos do SWMM

GRUPO	SIGNIFICADO
A	Escoamento superficial potencialmente baixo. Solos com altas taxas de infiltração, mesmo quando completamente saturados. Areia drenada excessivamente ou cascalhos.
B	Solos com taxa de infiltração moderada, com profundidade moderada a profundo. Têm textura moderadamente fina a grosseira. Por exemplo, solo lemo-arenoso.
C	Solos com taxas de infiltração lenta quando saturados, com textura fina. Por exemplo, solo lemo argiloso ou arenoso com profundidade rasa.
D	Potencial escoamento alto. Taxa de infiltração muito lenta, consistindo em solos argilosos com potencial de expansão.

Fonte: adaptado de Rossman (2015)

Tabela 3-17 - Características do solo

CLASSE DO SOLO	COND. HIDRÁULICA SATURADA (pol/h)	PRESSÃO DE SUCCÃO (pol)	POROSIDADE (fração)	CAPACIDADE DE CAMPO (fração)	PONTO DE MURCHA (fração)
Lemo-arenoso	0,43	4,33	0,453	0,190	0,085

Fonte: adaptado de Rossman (2015)

As demais camadas das MCs foram calculadas com base em pesquisas anteriores e na verificação nos intervalos permitidos no manual do SWMM. O pavimento permeável se baseou em pesquisas de Korkealaakso *et al.* (2013) e Silveira & Goldenfum (2007) (tabela 3.18).

Tabela 3-18 - Parâmetros para o pavimento permeável

SUPERFÍCIE		PAVIMENTO		ARMAZENAMENTO	
Profundidade (mm)	10	Espessura (mm)	100	Espessura (mm)	350
Fração de cobertura vegetal	-	Índice de vazios	0,2	Índice de vazios	0,6
Rugosidade Superficial	0,05	Fração de superfície impermeável	0	Taxa de filtração	7
Declividade da superfície (%)	6	Permeabilidade (mm/h)	5.4	Fator de Colmatação	180
		Fator de Colmatação	180		

A cobertura verde foi dimensionada com base nas pesquisas de Leite *et al.* (2016) e Palla *et al.* (2008) (tabela 3.19). E, por fim, os jardins de chuva por Rosa *et al.* (2015) e Matlock *et al.* (2010) (tabela 3.20).

Tabela 3-19 - Parâmetros para a cobertura verde

SUPERFÍCIE		DRENAGEM	
Profundidade (mm)	15	Espessura (mm)	3
Fração de cobertura vegetal	0.11	Índice de vazios	0,6
Rugosidade Superficial	0,15	Rugosidade	0,1
Declividade da superfície (%)	2.5		

Tabela 3-20 - Parâmetros para os jardins de chuva

SUPERFÍCIE	
Profundidade (mm)	15
Fração de cobertura vegetal	0.11
Rugosidade Superficial	0,1
Declividade da superfície (%)	1.0

Os valores de cada parâmetro, em cada camada e em cada medida compensatória fornece um comportamento diferente nas simulações. Todas as medidas que possuem a camada “pavimento” e “armazenamento”, por exemplo, estarão sujeitas ao fator de colmatação de suas superfícies. Esse parâmetro indicará, na realidade, se haverá ou não a

detenção temporária do escoamento superficial e se as estruturas serão danificadas e trarão custos extras. Valores como os da “espessura“ e “profundidade“ ou a “presença de cobertura vegetal“ também se mostram essenciais para a obtenção de resultados satisfatórios.

Ressalta-se, portanto, que os valores dos parâmetros de cada medida compensatória são de extrema importância para os resultados finais dessa pesquisa. Isso determinará possíveis “ótimos” resultados com situações “irreais” ou de difícil exequibilidade (altos valores de espessuras, por exemplo). Nesse sentido, essa dissertação procurou utilizar valores já utilizados e validados em outras pesquisas (anteriormente citados) de modo a proporcionar “reais” atenuações de escoamento.

3.2.4.6 – Critérios para a implementação de LID (medidas compensatórias)

Os critérios escolhidos para a implementação das medidas compensatórias, em cada cenário e diferentes tempos de retorno, estão descritos nos fluxogramas nas figuras 3.26 e 3.27.

As simulações foram executadas para cada medida compensatória em cada cenário proposto, em cada tempo de retorno e em cada microbacia. Foram identificadas as quadras mais críticas (volume de escoamento superior a $0,50 \text{ pés}^3/\text{s}$ ou $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$) e nelas foram inseridas as MCs. Ao final, uma operação de combinação foi realizada para a obtenção de todas as propostas para o cenário mais crítico.

Figura 3-26 – Fluxograma de implementação das medidas

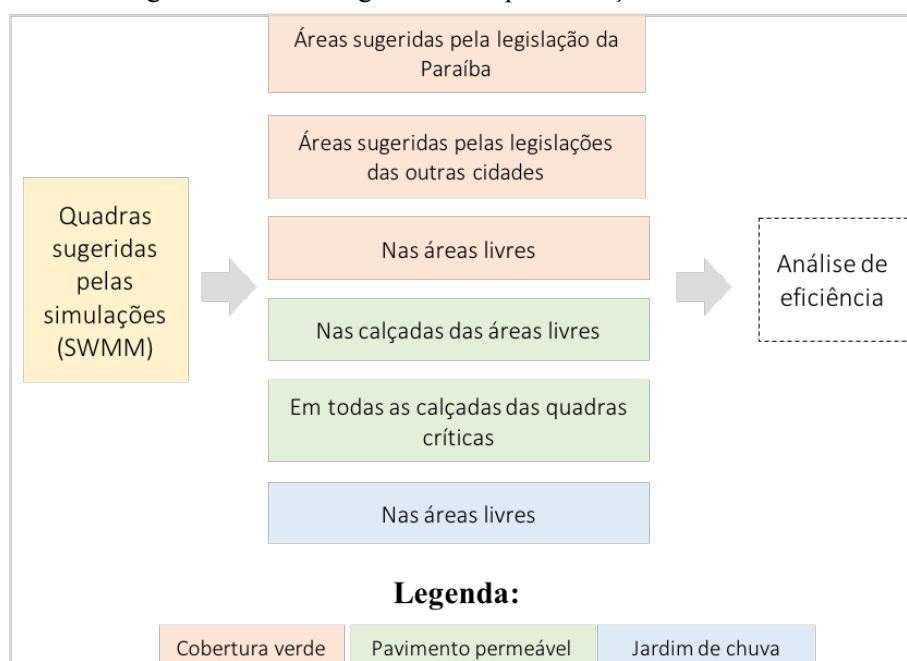
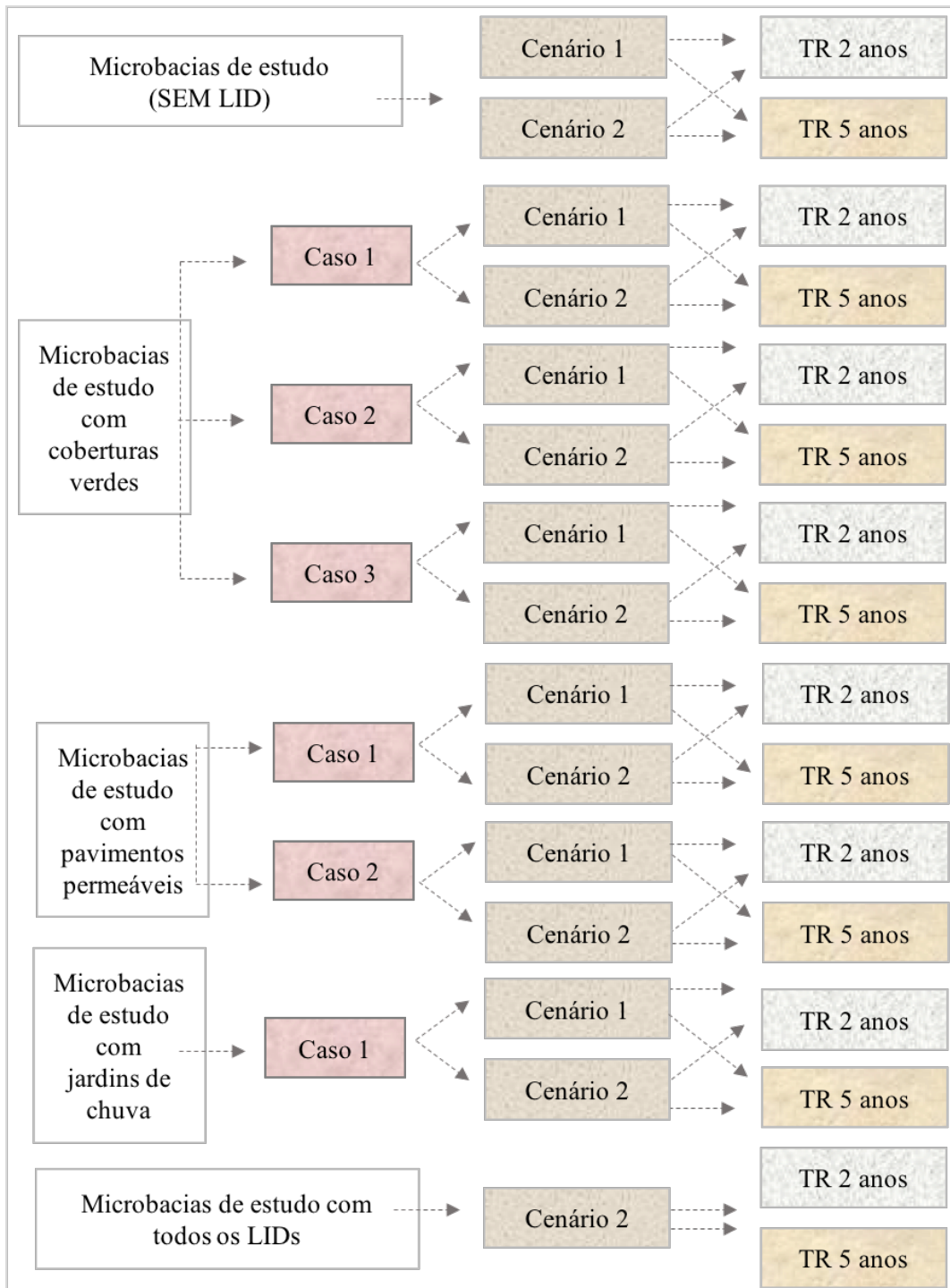


Figura 3-27 – Fluxograma resumo das situações simuladas



Os efeitos do uso do LID nas áreas de estudo foram investigados através da comparação dos volumes gerados com o tempo de recuperação de 30 minutos. A redução de escoamento pode ser considerada um indicador de melhoria nos casos de alagamentos, sendo a diferença do total escoado entre os cenários propostos e os com a inserção de LID.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados das simulações

4.1.1. Sem a adoção de medidas compensatórias

Como detalhado nas figuras 3.26 e 3.27, a princípio, foram realizadas simulações das duas microbacias sem a adoção de nenhuma das medidas compensatórias estudadas, nos cenários 1 e 2 de uso e ocupação do solo. Todos os parâmetros de análise foram inseridos em cada uma das quadras (consideradas pelo SWMM como sub-bacias). Todas as análises levaram em consideração os tempos de retorno de precipitação de 2 e 5 anos e o tempo de recuperação de 30 minutos em cada microbacia.

Os resultados das simulações podem ser vistos nos mapas de alagamentos e inundações (figuras 4.1 e 4.2) gerados a partir dos parâmetros de calibração já descritos. As cores indicam o valor do volume de escoamento (tabela 3.7), sendo a cor vermelha a mais crítica e a azul a mais baixa.

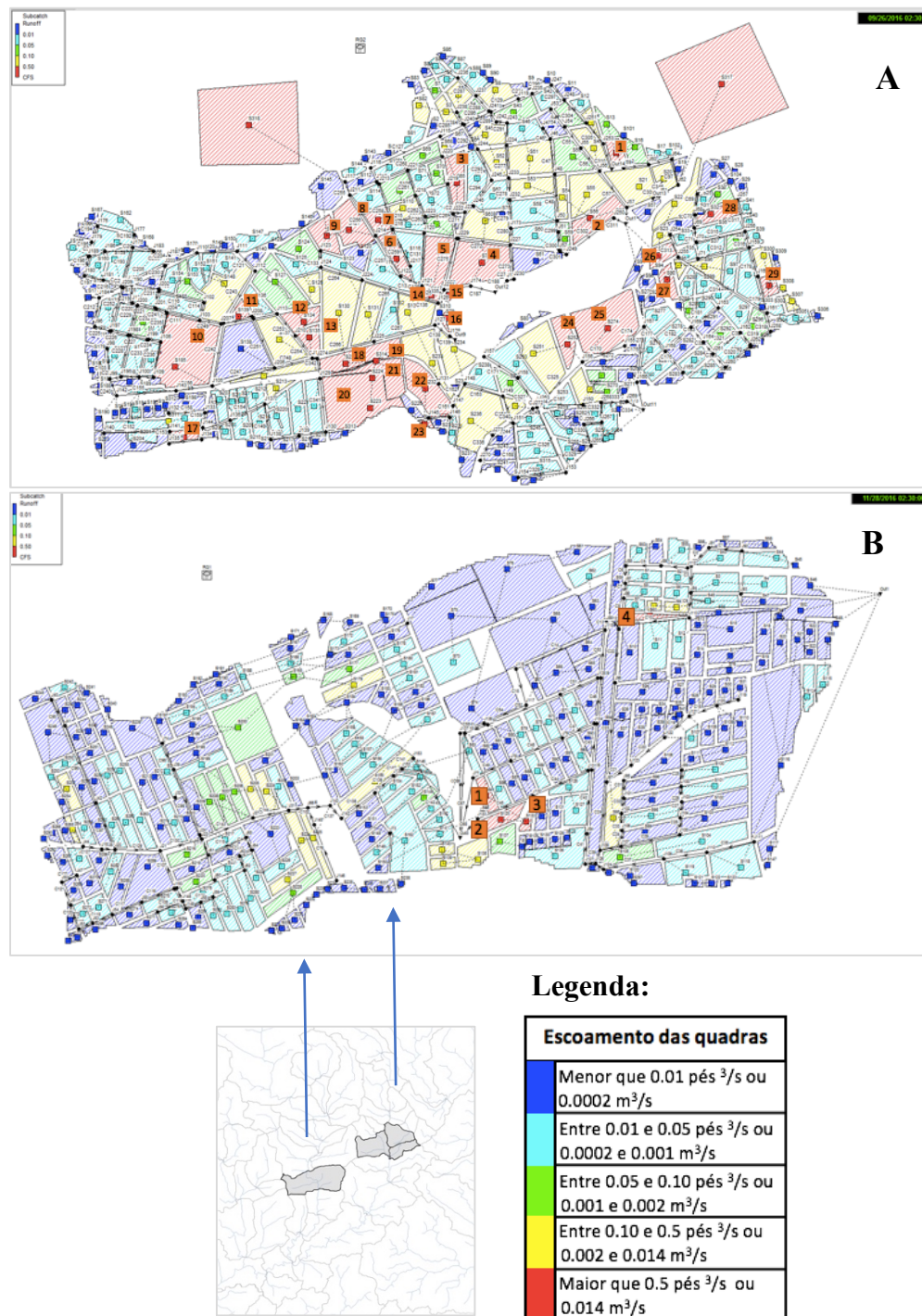
➤ **Cenário 1:**

- Para o tempo de retorno de 2 anos:

No cenário 1 (de uso atual), sem a adoção de medidas compensatórias, percebe-se que a microbacia do Prado tem maiores percentuais de áreas críticas em seu território. Os altos índices de taxas de impermeabilização (Zona Central da cidade) e declividades se tornam agravantes para esse fato. Em contrapartida, na microbacia de Bodocongó, há um menor percentual de áreas críticas, apenas quatro, mas ainda há a presença delas.

A mesma situação ocorre para o tempo de retorno de 5 anos, mas com valores diferentes de volume de escoamento. A figura 4.1 mostra os mapas gerados pelas simulações para as microbacias de estudo.

Figura 4-1 –Mapeamento das microbacias críticas sem LID no cenário 1 para TR de 2 anos: a) Prado e b) Bodocongó;

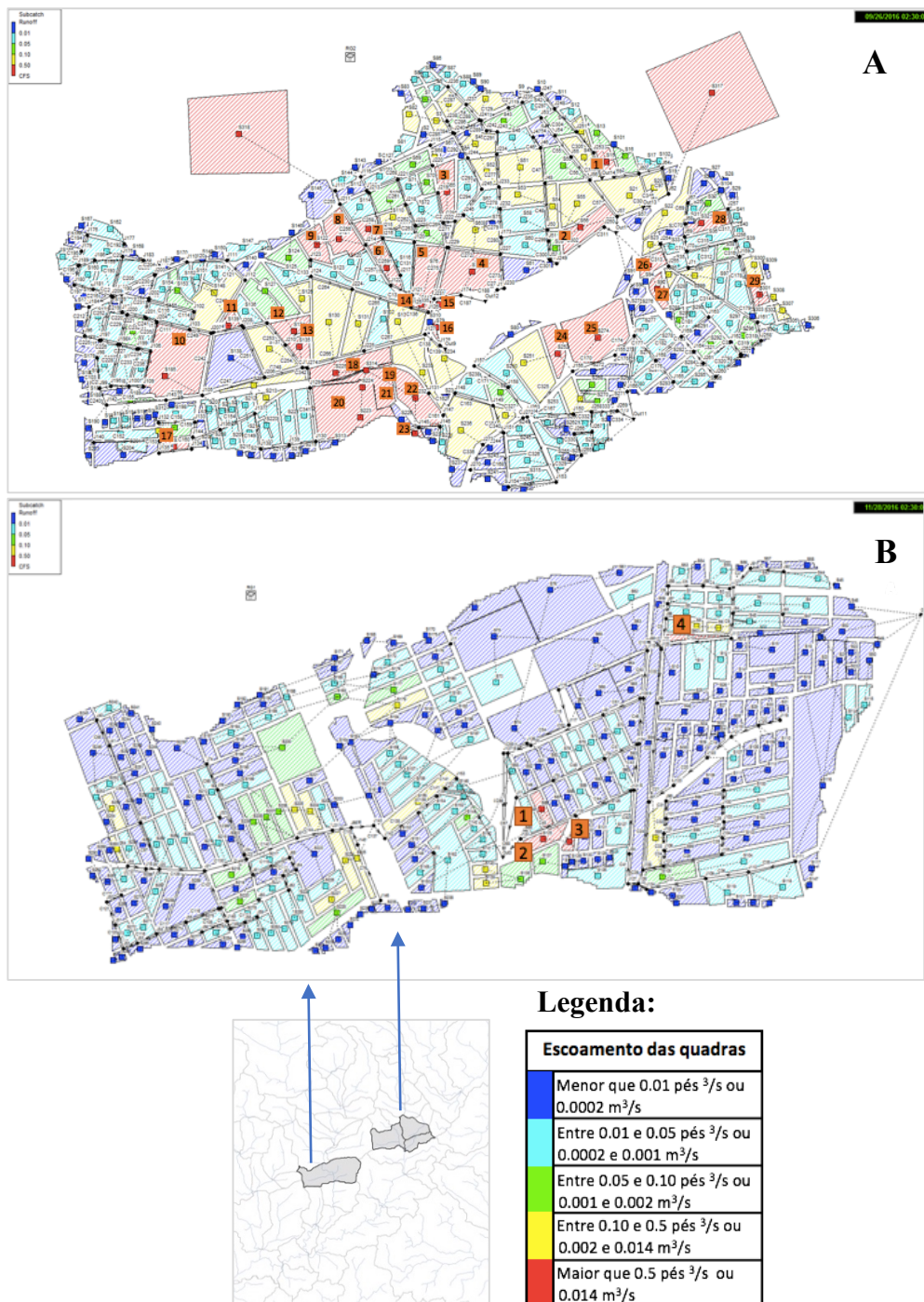


- Para o tempo de retorno de 5 anos:

Como a precipitação acumulada para o tempo de retorno de cinco anos é maior que o de dois anos, 54,16 mm e 43,99 mm respectivamente, e todas as outras condições são constantes nas quadras, os valores dos volumes de escoamento são maiores para a

chuva de cinco anos de retorno. Para todas as análises subsequentes foram selecionadas apenas as quadras classificadas como “críticas” para a inserção das medidas compensatórias (indicadas por números das quadras nas figuras). Nessa situação, as microbacias do Prado possuem 29 quadras críticas e a microbacia de Bodocongó 4 quadras críticas. Os mapas gerados pelo SWMM para as microbacias estão detalhados na figura 4.2.

Figura 4-2 – Mapeamento das microbacias críticas sem LID no cenário 1 para TR de 5 anos: a) Prado e b) Bodocongó;



Os mapas de alagamentos gerados nas microbacias para os tempos de retorno de 2 e 5 anos mostram a mesma quantidade de quadras críticas e valores semelhantes de volumes de escoamento. Os volumes de escoamento de cada quadra estão descritos nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4-1 - Volumes de escoamento das quadras críticas do Prado (cenário 1);

Quadras	VE sem LID - TR 2 ANOS (pés³/s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (pés³/s)	VE sem LID - TR 2 ANOS (m³/s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (m³/s)
1	0,57	0,59	0,016	0,017
2	0,65	0,72	0,018	0,020
3	0,61	0,66	0,017	0,018
4	0,55	0,58	0,015	0,016
5	1,4	1,9	0,039	0,053
6	2,7	2,94	0,076	0,082
7	0,94	1	0,026	0,028
8	2,91	3,33	0,081	0,093
9	0,55	0,65	0,015	0,018
10	1,35	1,67	0,038	0,047
11	1,07	1,4	0,030	0,039
12	1,14	1,26	0,032	0,035
13	3,91	4,4	0,109	0,123
14	3,83	5,12	0,107	0,143
15	2,15	2,99	0,060	0,084
16	11,63	16,65	0,326	0,466
17	0,86	1,03	0,024	0,029
18	0,75	0,81	0,021	0,023
19	7,35	8,44	0,206	0,236
20	0,63	0,82	0,018	0,023
21	1,62	2,04	0,045	0,057
22	28,31	32,04	0,793	0,897
23	74,9	86,48	2,097	2,421
24	0,52	0,6	0,015	0,017
25	2,9	3,39	0,081	0,095
26	1,41	1,55	0,039	0,043
27	0,5	0,53	0,014	0,015
28	0,59	0,64	0,017	0,018
29	1,99	2,21	0,056	0,062

Tabela 4-2 - Volumes de escoamento das quadras críticas de Bodocongó (cenário 1);

Quadras	VE sem LID - TR 2 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 2 ANOS (m ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (m ³ /s)
1	2,44	2,68	0,069	0,076
2	2,38	2,5	0,067	0,071
3	2,02	2,14	0,057	0,061
4	0,52	0,55	0,015	0,016

➤ **Cenário 2: limiares máximos de ocupação permitidos por lei**

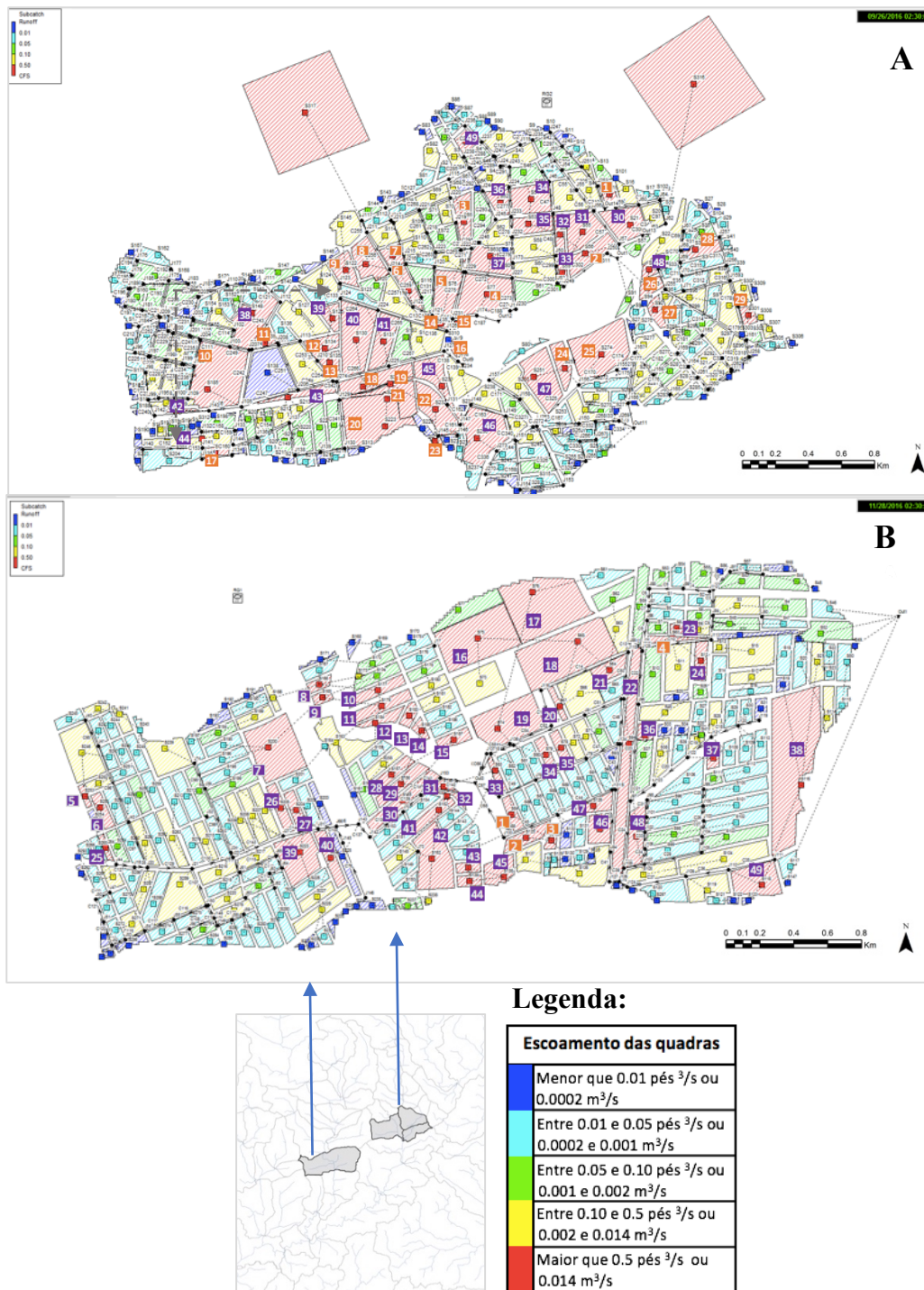
A mesma análise foi feita para o cenário mais extremo, caso a legislação municipal seja cumprida com 80% da área dos lotes impermeabilizada. Os resultados mostraram variações no comportamento das quadras. Nesse cenário, 49 quadras do Prado (tempo de retorno de 2 e 5 anos) se encontram em condições críticas e, em Bodocongó, 49 (tempo de retorno de 2 anos) e 51 quadras (tempo de retorno de 5 anos) se classificaram como críticas.

- Para o tempo de retorno de 2 anos:

A partir da análise da figura 4.3, pode-se observar que, caso a legislação seja cumprida, ou seja, os limiares máximos de ocupação/impermeabilização sejam atingidos, haverá, provavelmente, casos de alagamentos e inundações em vários pontos distintos nas microbacias de estudo. Além do aumento considerável na quantidade de quadras críticas, cerca de 70% para as quadras do Prado e mais de 1000% nas de Bodocongó. Outras quadras tiveram alterações no volume de escoamento e consequentemente influenciam na quadra imediatamente à jusante.

O aumento na quantidade de quadras críticas na microbacia de Bodocongó no cenário 2 indica que, provavelmente, alterações no cenário 1 (atual) podem evitar que situações de risco a alagamentos ocorram no futuro nessa área. Sugere-se, assim, que medidas sejam tomadas no momento atual. As mesmas condições ocorreram com o tempo de retorno de 5 anos.

Figura 4-3 – Mapeamento das microbacias críticas sem LID no cenário 2 para TR de 2 anos: a) Prado e b) Bodocongó;

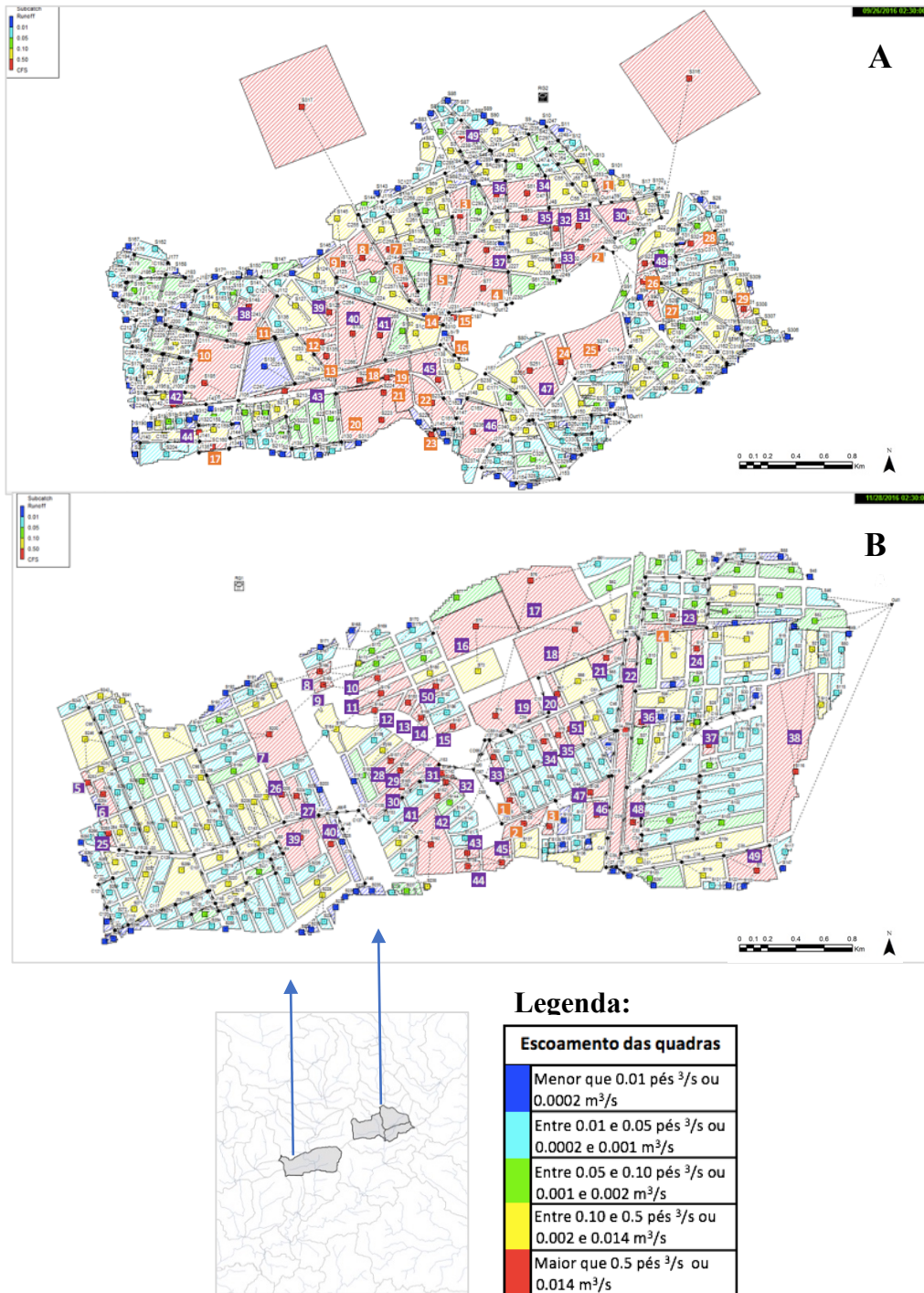


- Para o tempo de retorno de 5 anos:

Em ambos tempos de retorno, os mapas de alagamentos mostram a necessidade de estabelecer modificações na legislação local e/ou implementar medidas

compensatórias no sistema de drenagem para atenuar os altos índices de escoamento superficial.

Figura 4-4 – Mapeamento das microbacias críticas sem LID no cenário 2 para TR de 5 anos: a) Prado e b) Bodocongó;



As tabelas 4.3 e 4.4 mostram os valores definidos na simulação para os volumes de escoamento em cada quadra crítica. O uso das medidas foi selecionado a partir da

possibilidade de aplicação em áreas construídas e em espaços livres (modificar o ambiente que já existe e aqueles que ainda poderão ser edificados, a partir da legislação por exemplo). Todos os critérios foram previamente estabelecidos nas figuras 3.26 e 3.27 e seus parâmetros nas tabelas 3.18, 3.19 e 3.20.

Tabela 4-3 - Volumes de escoamento das quadras críticas do Prado (cenário 2);

Quadras	VE sem LID - TR 2 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 2 ANOS (m ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (m ³ /s)	Quadras	VE sem LID - TR 2 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 2 ANOS (m ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (m ³ /s)
1	0,63	0,65	0,018	0,018	26	2,04	2,13	0,057	0,060
2	4,81	5,11	0,135	0,143	27	0,61	0,63	0,017	0,018
3	0,91	0,95	0,025	0,027	28	0,48	0,5	0,013	0,014
4	3,48	3,66	0,097	0,102	29	1,39	1,46	0,039	0,041
5	2,8	3,01	0,078	0,084	30	0,92	0,96	0,026	0,027
6	2,98	3,17	0,083	0,089	31	0,65	0,68	0,018	0,019
7	1,38	1,45	0,039	0,041	32	1,5	1,57	0,042	0,044
8	2,9	3,05	0,081	0,085	33	0,74	0,77	0,021	0,022
9	0,99	1,02	0,028	0,029	34	0,65	0,67	0,018	0,019
10	2,73	2,85	0,076	0,080	35	0,97	1,01	0,027	0,028
11	1,24	1,3	0,035	0,036	36	0,57	0,59	0,016	0,017
12	1,7	1,77	0,048	0,050	37	0,54	0,56	0,015	0,016
13	3,54	3,72	0,099	0,104	38	0,75	0,78	0,021	0,022
14	4,34	4,71	0,122	0,132	39	0,54	0,56	0,015	0,016
15	6,12	6,85	0,171	0,192	40	0,92	0,95	0,026	0,027
16	9,46	10,78	0,265	0,302	41	0,66	0,68	0,018	0,019
17	0,53	0,56	0,015	0,016	42	0,61	0,63	0,017	0,018
18	2,25	2,34	0,063	0,066	43	0,6	0,62	0,017	0,017
19	5,95	6,26	0,167	0,175	44	0,5	0,51	0,014	0,014
20	2,13	2,23	0,060	0,062	45	0,82	0,85	0,023	0,024
21	2,93	3,09	0,082	0,087	46	1,01	1,04	0,028	0,029
22	13,34	14,15	0,374	0,396	47	0,86	0,89	0,024	0,025
23	15,47	16,41	0,433	0,459	48	0,51	0,53	0,014	0,015
24	1,57	1,64	0,044	0,046	49	0,5	0,51	0,014	0,014

As quadras das microbacias do Prado apresentam volumes de escoamento com valores de 0,5 a 16,41 pés³/s ou 0,014 a 0,396 m³/s. Embora ainda discrepantes, todos esses são considerados críticos de acordo com o SWMM.

É importante afirmar que a “eficácia” de cada escolha (cada medida compensatória escolhida) está diretamente influenciada pelo percentual de área ocupado com uma (ou mais) destas medidas em cada quadra. Os maiores picos de escoamento são encontrados nas quadras 43 a 47, na bacia de Bodocongó (tabela 4.4). Essas quadras estão posicionadas na área de risco definida pela Defesa Civil e no exutório da bacia.

Tabela 4-4 - Volumes de escoamento das quadras críticas de Bodocongó (cenário 2);

Quadras	VE sem LID - TR 2 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 2 ANOS (m ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (m ³ /s)	Quadras	VE sem LID - TR 2 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (pés ³ /s)	VE sem LID - TR 2 ANOS (m ³ /s)	VE sem LID - TR 5 ANOS (m ³ /s)
1	8,97	9,91	0,251	0,277	27	1,44	1,55	0,040	0,043
2	3,64	3,83	0,102	0,107	28	80,43	106,26	2,252	2,975
3	5,48	5,87	0,153	0,164	29	5,81	7,49	0,163	0,210
4	2,26	2,38	0,063	0,067	30	182,12	241,88	5,099	6,773
5	0,7	0,73	0,020	0,020	31	24,51	34,07	0,686	0,954
6	1,44	1,54	0,040	0,043	32	3,67	4,41	0,103	0,123
7	1,24	1,29	0,035	0,036	33	40,27	53,94	1,128	1,510
8	1,29	1,39	0,036	0,039	34	5,47	6,78	0,153	0,190
9	1,79	1,89	0,050	0,053	35	1,25	1,35	0,035	0,038
10	6,03	7,75	0,169	0,217	36	0,62	0,65	0,017	0,018
11	18,55	24,14	0,519	0,676	37	0,75	0,82	0,021	0,023
12	46,63	65,42	1,306	1,832	38	3,03	3,27	0,085	0,092
13	1,22	1,33	0,034	0,037	39	1,33	1,38	0,037	0,039
14	4,04	5,12	0,113	0,143	40	0,69	0,74	0,019	0,021
15	156,92	205,4	4,394	5,751	41	3,5	4,87	0,098	0,136
16	2,11	2,21	0,059	0,062	42	1,55	1,91	0,043	0,053
17	1,76	1,83	0,049	0,051	43	517,48	835,92	14,489	23,406
18	7,36	7,84	0,206	0,220	44	508,55	809,26	14,239	22,659
19	4,54	4,78	0,127	0,134	45	505,69	834,99	14,159	23,380
20	13,15	14,41	0,368	0,403	46	485,29	753,84	13,588	21,108
21	0,51	0,53	0,014	0,015	47	778,1	1351,72	21,787	37,848
22	4,15	4,45	0,116	0,125	48	1,11	1,14	0,031	0,032
23	0,52	0,54	0,015	0,015	49	6,4	7,1	0,179	0,199
24	0,51	0,52	0,014	0,015	50	-	0,5	-	0,014
25	5,13	6,37	0,144	0,178	51	-	0,51	-	0,014
26	0,56	0,58	0,016	0,016					

4.1.2. Com a adoção de medidas compensatórias (MC's)

Os percentuais de redução de escoamento com a aplicação de cada medida compensatória estão dispostos no Apêndice B desta dissertação. Os resultados para essa seção baseiam-se em análises feitas com: (i) a representação da mudança dos volumes de escoamento antes e depois da inserção das medidas compensatórias dispostas em gráficos; (ii) tabelas comparativas com as porcentagens finais de quadras não-críticas após a inserção e; (iii) a quantidade de quadras críticas e não-críticas ao fim das simulações.

4.1.2.1. Coberturas verdes (CV)

O uso das coberturas verdes nas microbacias de estudo considerou três situações: (i) áreas sugeridas pela legislação da Paraíba (ii) pelas legislações de outras cidades e; (iii) áreas livres. Com auxílio das técnicas de geoprocessamento, calculou-se o percentual de área que essas situações correspondem para a entrada (*input*) no SWMM.

Levou-se em consideração:

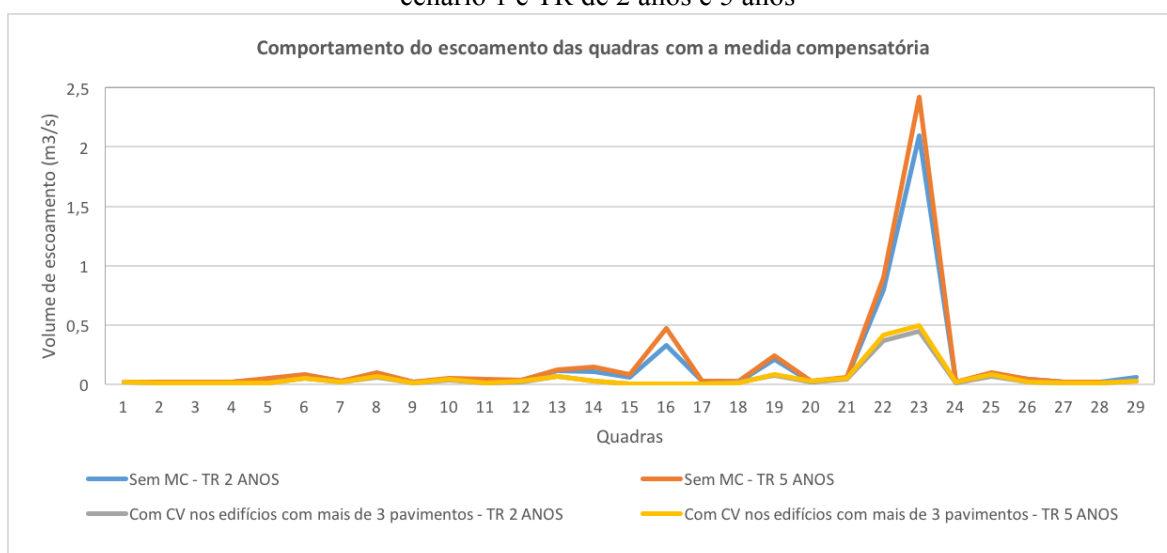
- i. Como citado previamente, a Paraíba, através da lei 10.047/2013 institui que os condomínios edificadas, residenciais ou não, com mais de 3 (três) unidades agrupadas verticalmente deverão prever a construção do “Telhado Verde”. Não havendo nenhum condomínio com ao menos três edifícios nas áreas de estudo, fez-se o levantamento dos prédios com mais de 3 pavimentos (figura 4.4).
- ii. Grande parte das cidades, como Chicago – EUA, aplicam as coberturas verdes prioritariamente em áreas institucionais.
- iii. A partir dos dados disponibilizados pela PMCG, foram identificados os espaços livres nas quadras.

Os casos (i) e (iii) não se aplicam às quadras críticas de Bodocongó no cenário 1 pois as mesmas não possuem edifícios com mais de 3 pavimentos e/ou espaços livres em suas áreas.

- Caso (i): Edifícios com mais de 3 pavimentos

Como caracterizado anteriormente, o uso do solo na área do Prado é misto, residencial e comercial, com a presença de prédios em seu território. Isso tornou a aplicação da cobertura verde possível em várias quadras críticas. Assim, houveram resultados satisfatórios para ambos os cenários e tempos de retorno. Nas microbacias do Prado, no cenário 1, os resultados mostraram que o uso das coberturas verdes promoveu a redução de escoamento, algumas quadras tiveram maiores reduções e outras reduções mais discretas (figura 4.5).

Figura 4-5 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos



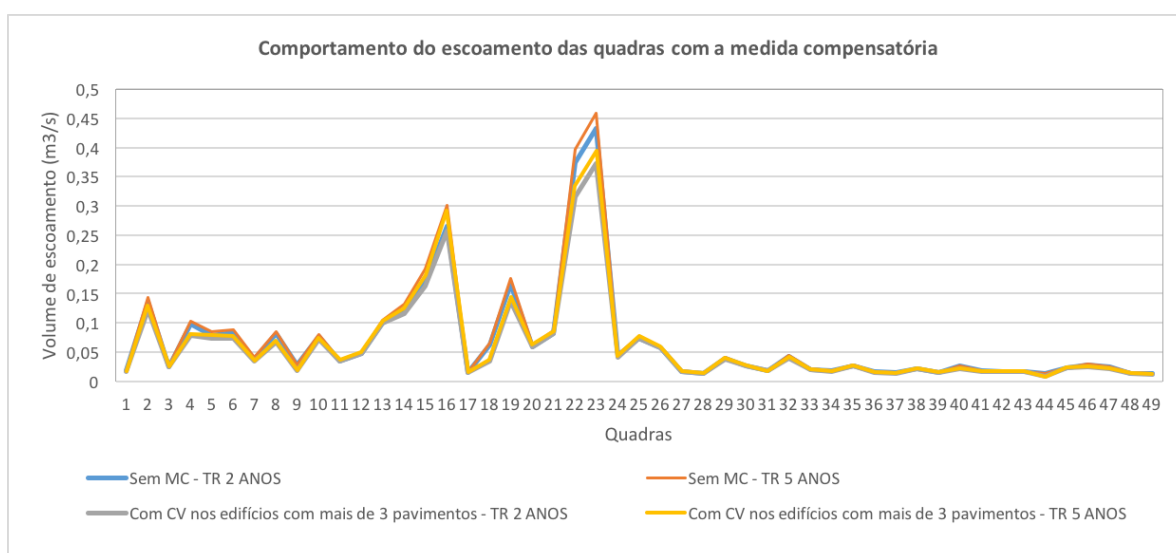
Pelo mapa gerado (figura 3.13) na caracterização das microbacias, percebe-se que não há presença de edifícios com mais de 3 pavimentos em todas as quadras que tiveram reduções (todas essas estão detalhadas no apêndice B dessa dissertação), ou seja, quadras sem os edifícios também reduziram o escoamento gerado. Isso indica que a redução não está condicionada apenas à presença dos edifícios nas quadras, entende-se, portanto, que quando a vazão de uma quadra à montante é reduzida então a vazão à jusante desta será reduzida automaticamente. As quadras 15, 16, 17 e 23 tiveram reduções de escoamento entre 79% e 100%.

As quadras com maior percentual de área disponível para a adoção das MCs saíram da situação crítica. Por exemplo, as quadras 9 e 28, no cenário 1, com 28,7% e 60,1% de área com edifícios de mais de 3 pavimentos respectivamente.

A implantação das medidas no cenário 2 (figura 4.6) também proporcionou reduções nos volumes de escoamento, no entanto, essas reduções são mais evidentes no cenário 1 do que no 2. Com o aumento da impermeabilização do solo nas quadras, o percentual de áreas com edifícios de 3 pavimentos se tornou baixo (considerando a disponibilidade atual) para compensar os valores dos volumes de escoamento. Mesmo no cenário 2 as coberturas trouxeram a redução do escoamento.

Isso pode indicar vantagens na aplicação das coberturas ainda no cenário atual do uso do solo.

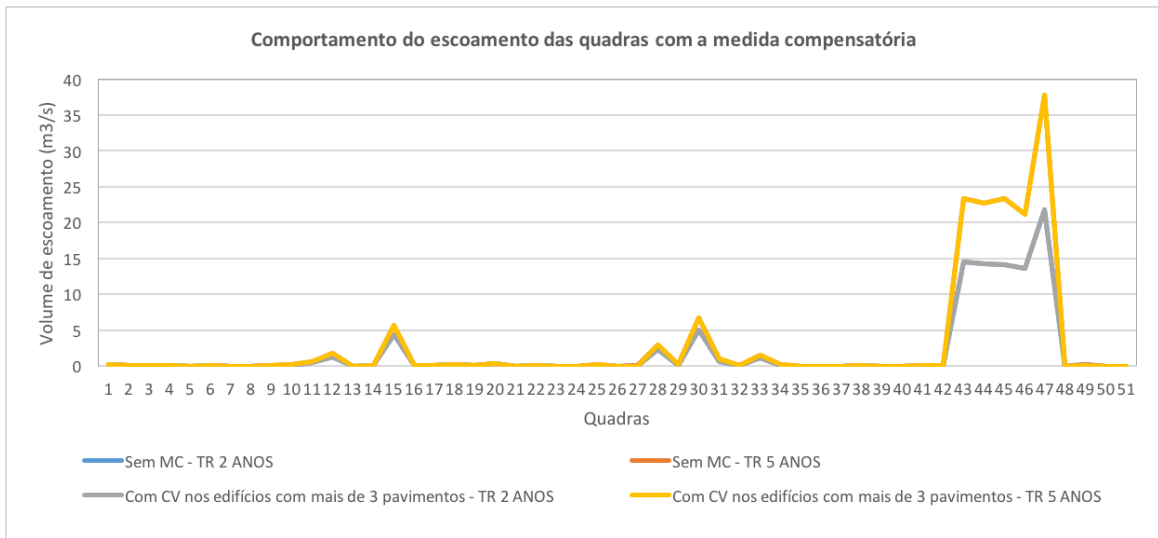
Figura 4-6 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



Da mesma forma que no cenário 1, as quadras com maiores áreas de prédios com 3 pavimentos, mudaram de estado crítico (quadras 44 e 49, no cenário 2). Os maiores índices de reduções se deram nas quadras 9, 18 e 44, com valores entre 32% e 44%.

Na microbacia de Bodocongó, praticamente não houve variação na redução de escoamento pois na área total da bacia havia pouquíssimos prédios com mais de 3 pavimentos. Os resultados podem ser visualizados na figura 4.7.

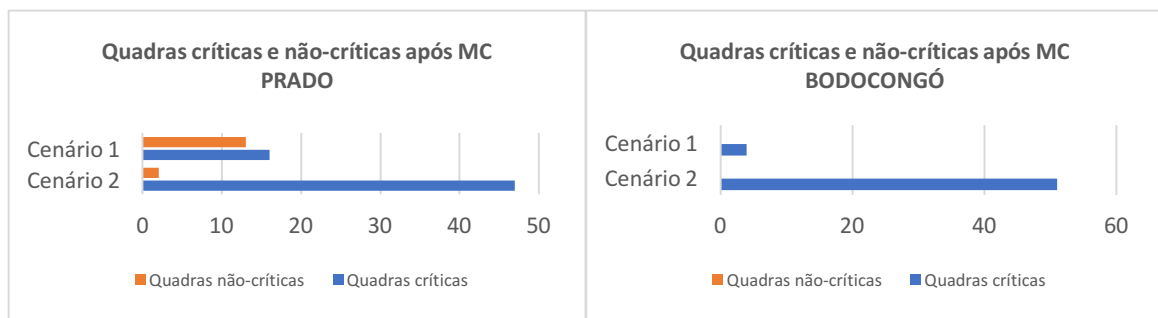
Figura 4-7 – Comportamento do escoamento superficial após CV para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



Ainda assim, as quadras 27 e 49, com áreas disponíveis para a implantação, tiveram reduções de aproximadamente 44% e 39% nos valores do escoamento. Essa redução não foi suficiente para alterar o estado crítico das quadras ou atenuar o escoamento das quadras à jusante, mas trouxe melhoramentos.

Com relação a quantidade de quadras críticas e não-críticas após a inserção das coberturas verdes nos edifícios., percebe-se, através da análise da figura 4.8, a eficiência desse tipo de caso para as microbacias de CG.

Figura 4-8 – Quadras críticas após cobertura verde nos edifícios com 3 pavimentos;



- Caso (ii): Em espaços institucionais:

A aplicação das CVs em espaços institucionais também gerou alterações nos volumes de escoamento na grande maioria das quadras. Embora esses espaços sejam mais frequentes em ambas microbacias de estudo, ainda há algumas quadras críticas que não os possuem em seus territórios.

As figuras 4.9 e 4.10 mostram as diferenças dos escoamentos gerados com e sem as coberturas verdes nos cenários 1 e 2 nas microbacias do Prado.

Figura 4-9 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos

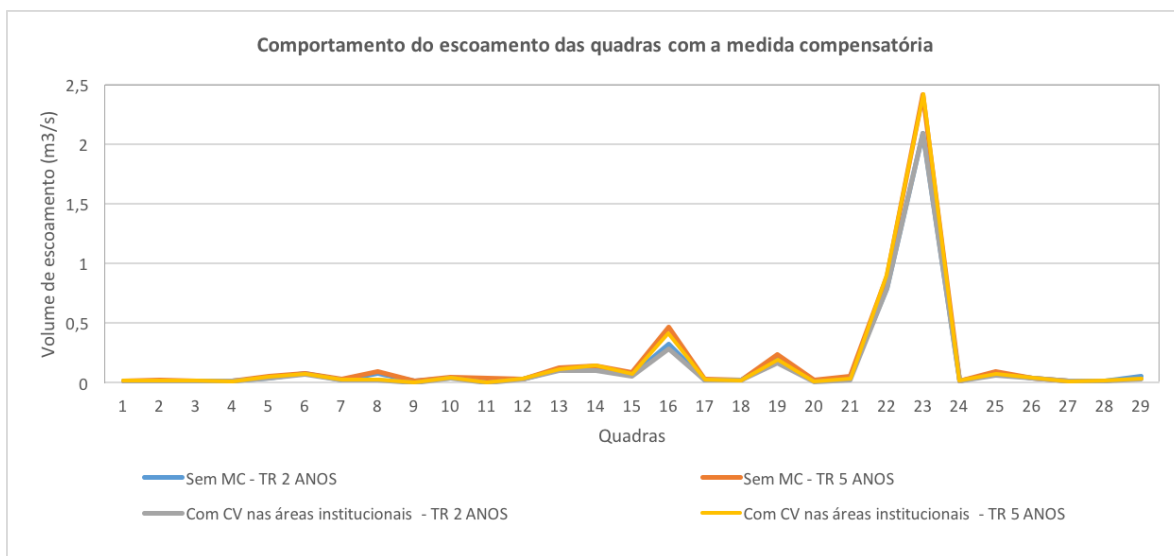
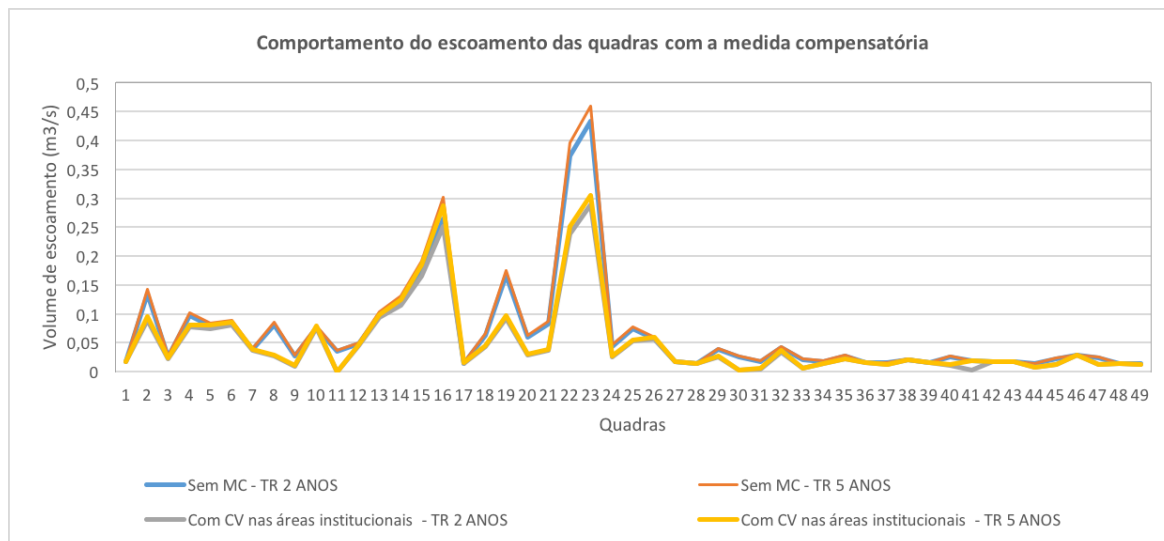


Figura 4-10 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



No cenário 1, as maiores reduções ocorreram nas quadras 9, 11 e 20 (respectivamente 90,91%, 100% e 63,49%). Com a inserção, essas quadras passaram a ser não-críticas. Outras quadras também tiveram alterações nos valores de VE.

No cenário 2, podem ser vistas maiores diferenças nos escoamentos pois as quadras críticas possuem áreas institucionais disponíveis para implantação das coberturas

verdes. As quadras 9, 11, 30, 31, 33, 37, 40, 41, 44, 45, 47 e 50 saíram do estado crítico e outras tiveram reduções.

Já na microbacia de Bodocongó, no cenário 1, todas as quadras saíram do volume crítico (100% de eficiência) e no cenário 2, 9 quadras saíram do nível mais crítico (figuras 4.11 e 4.12).

Figura 4-11 – Comportamento do escoamento superficial após CV para Bodocongó no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos

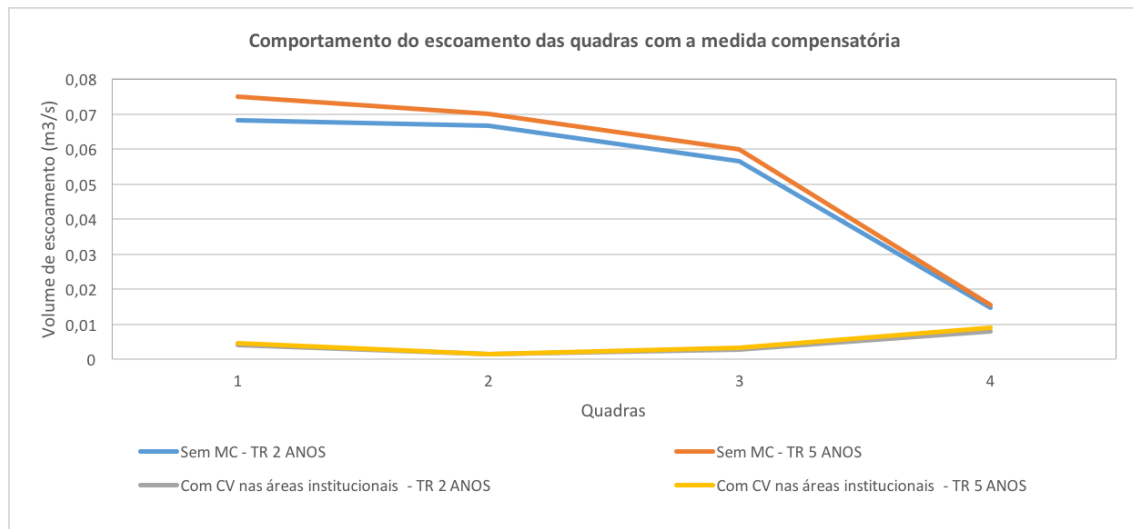
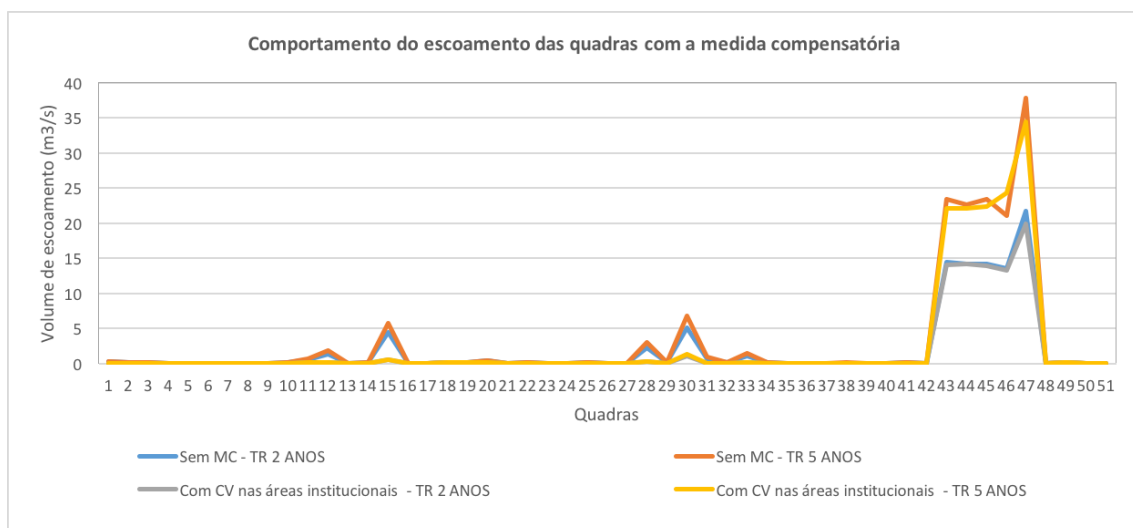
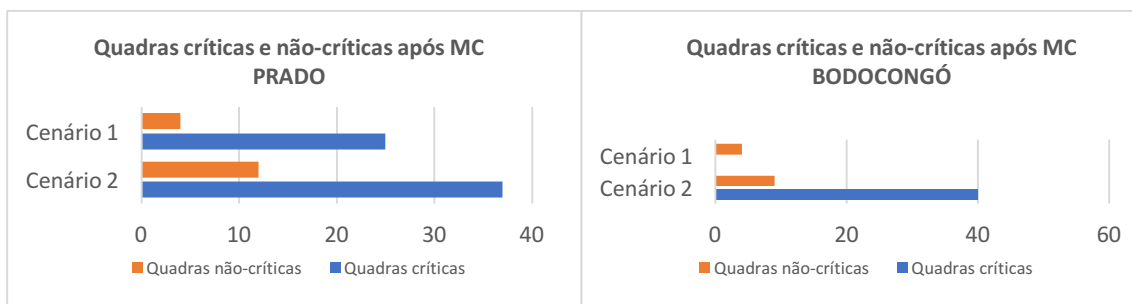


Figura 4-12 – Comportamento do escoamento superficial após CV para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



Esse caso de aplicação é sugerido para áreas com maiores índices de instituições em seu território. Se assim houver, haverá redução de escoamento superficial nos níveis dos lotes e loteamentos. Percebe-se que mais quadras passaram a ser não-críticas nesse caso que no anterior em ambas microbacias (figura 4.13).

Figura 4-13 – Quadras críticas após CV nas edificações institucionais;



- Caso (iii): Em áreas livres

Os dados de uso do solo disponibilizados pela PMCG mostram os lotes com áreas livres. Após compatibilizadas através de técnicas de geoprocessamento, sucedeu-se para as simulações. Como várias quadras possuem espaços livres em seu território, é possível ver maiores variações de VE. No entanto, a presença não garante que a quadra terá condições melhores de superar sua situação crítica, mas sim que o volume de escoamento será reduzido.

Os volumes de escoamento das quadras de ambas microbacias tiveram altos percentuais de redução. As figuras 4.14 e 4.15 mostram o comportamento das quadras do Prado para os dois cenários propostos.

Figura 4-14 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos

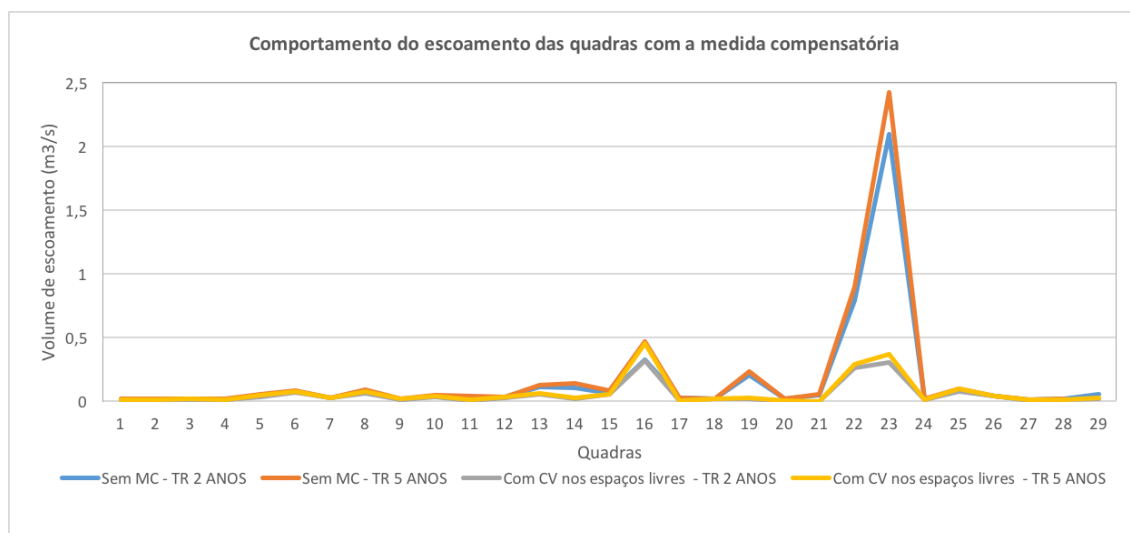
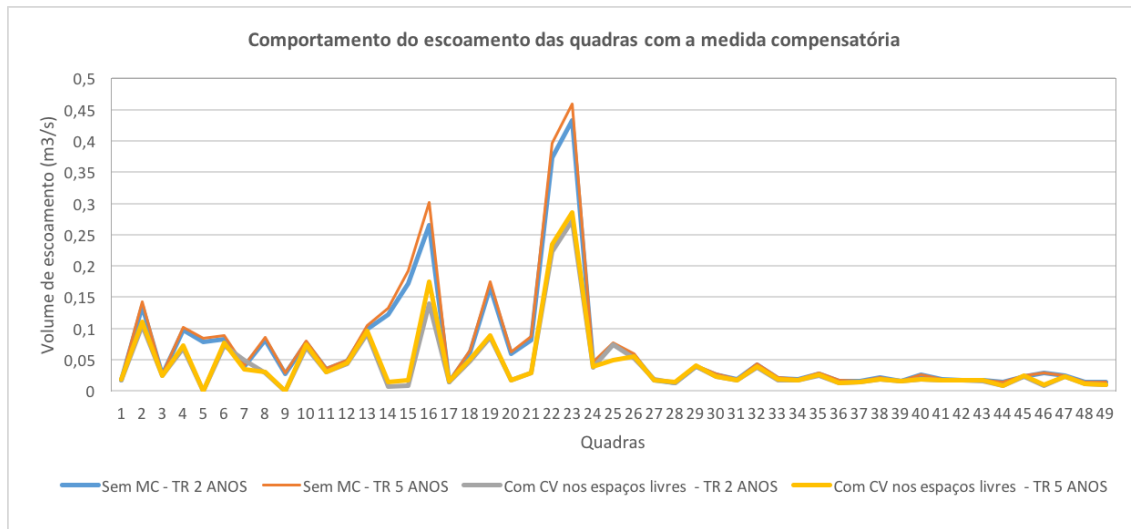


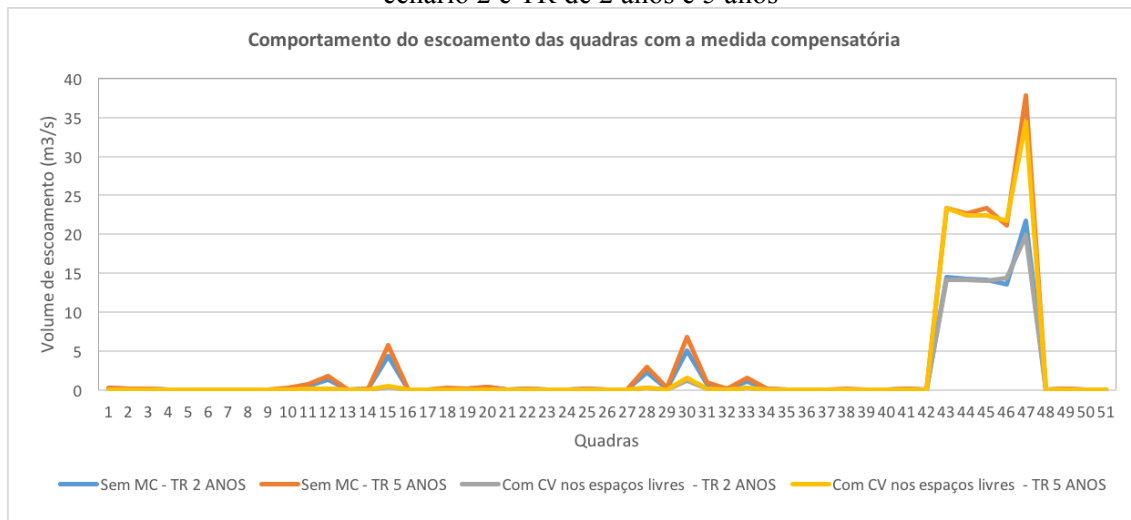
Figura 4-15 – Comportamento do escoamento superficial após CV para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



Nas microbacias do Prado, houveram grandes reduções de VE, como nas quadras 21 a 24, do cenário 1, e as quadras 14 e 15, do cenário 2. A quadra 20, no cenário 1, passou a ter escoamento 0 (melhor situação) caso a MC fosse implementada em sua área (aproximadamente 42.5%). A quadra 24 teve metade do seu escoamento reduzido com CV em 18.6% da sua área. No cenário 2, os resultados mais discrepantes estão nas quadras 16 e 23, nas quais o VE apresenta alta redução, mas ainda está no intervalo crítico.

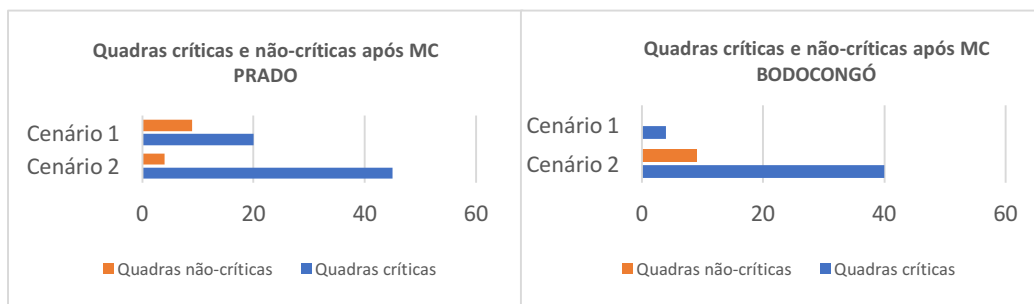
Como as quadras críticas do cenário 1, da microbacia de Bodocongó, não apresentam áreas livres, não houveram resultados para essa análise. Em contrapartida, o cenário 2 apresentou ótimos resultados devido à presença de espaços livres em suas quadras (figura 4.16), nove quadras passaram a ser não-críticas.

Figura 4-16 – Comportamento do escoamento superficial após CV para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



O caso (iii) obteve resultados satisfatórios quando as quadras de aplicação apresentavam maiores índices de espaços livres em seus lotes (figura 4.17). Dessa forma, esse caso é sugerido para espaços com menores índices de adensamento do solo e mais áreas vazias no ambiente urbano.

Figura 4-17 – Quadras críticas com após o CV nas áreas livres;



O quadro síntese com as reduções (em porcentagem) das quantidades de quadras não-críticas após as coberturas verdes (CVs) em todos os casos pode ser visto abaixo. Pode-se afirmar que as coberturas verdes trazem benefícios (redução de escoamento) para os sistemas de drenagem proporcionais aos critérios (áreas e localizações) para sua implementação. Esses diversos critérios mostram a importância em avaliar o espaço de estudo e aplicar a tecnologia adequada por meio de instrumentos técnicos e legais.

Tabela 4-5 – Porcentagem de quadras não-críticas após cobertura verde

	Prado – cenário 1	Prado – cenário 2	Bodocongó – cenário 1	Bodocongó – cenário 2
Edifícios com mais de 3 pavimentos	44,83%	4,1%	0%	0%
Áreas institucionais	13,80%	24,5%	100%	17,7%
Áreas livres	31,01%	8,17%	0%	17,7%

4.1.2.2. Pavimentos permeáveis (PP)

O uso dos pavimentos permeáveis nas microbacias de estudo considerou duas situações: (i) todas as calçadas dos espaços livres e; (ii) todas as calçadas das quadras críticas. Com auxílio das técnicas analíticas de geoprocessamento, calculou-se o percentual de área que essas situações corresponderiam para a entrada (*input*) no SWMM.

A largura média da calçada foi considerada em 2 m (dois metros - valor previsto pelo Código de Obras do município).

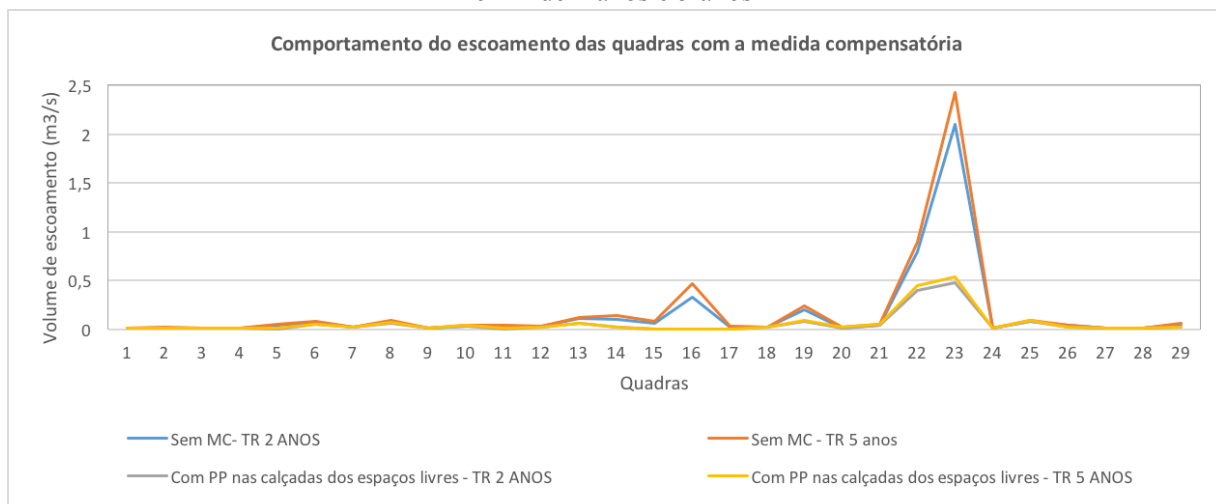
O caso (i) não se aplicará às quadras da microbacia do Riacho de Bodocongó no cenário 1 pois as mesmas não possuem espaços livres em suas áreas.

- Caso (i): Todas as calçadas dos espaços livres

Como o caso (i) se aplica apenas nas calçadas dos espaços livres, as porcentagens de área para inserção dos pavimentos permeáveis são menores (valores entre 0,20% até 3% da área total do lote). As quadras que são usadas para “praças” na cidade tiveram 100% de sua área simulada com PP.

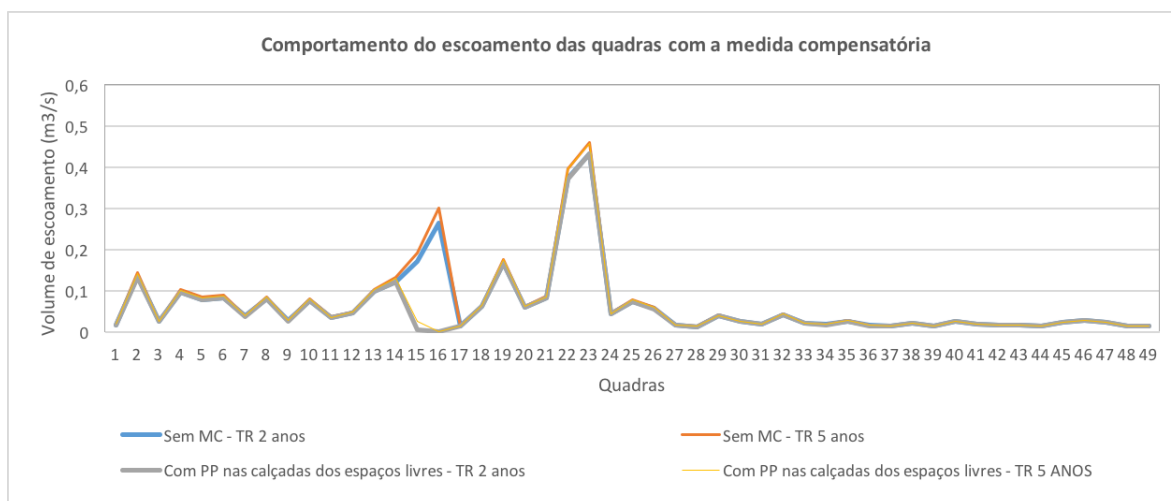
Os resultados das figuras 4.18 e 4.19 indicam que essa inserção mitigou até 100% (quadras 15 e 16) dos escoamentos gerados nessas quadras, nos cenários 1 e 2. Essa situação pode ser vista nas quadras 15 e 16 das microbacias do Prado, no cenário 1.

Figura 4-18 – Comportamento do escoamento superficial após PP para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos



No cenário 1, outras quadras também reduziram o escoamento, com valores de até 80% (apêndice B). Pela análise da figura 4.18, verifica-se que dez quadras passaram a ser não críticas. No entanto, no cenário 2, com o aumento da impermeabilização e maiores volumes de escoamento, apenas duas quadras saíram da situação crítica.

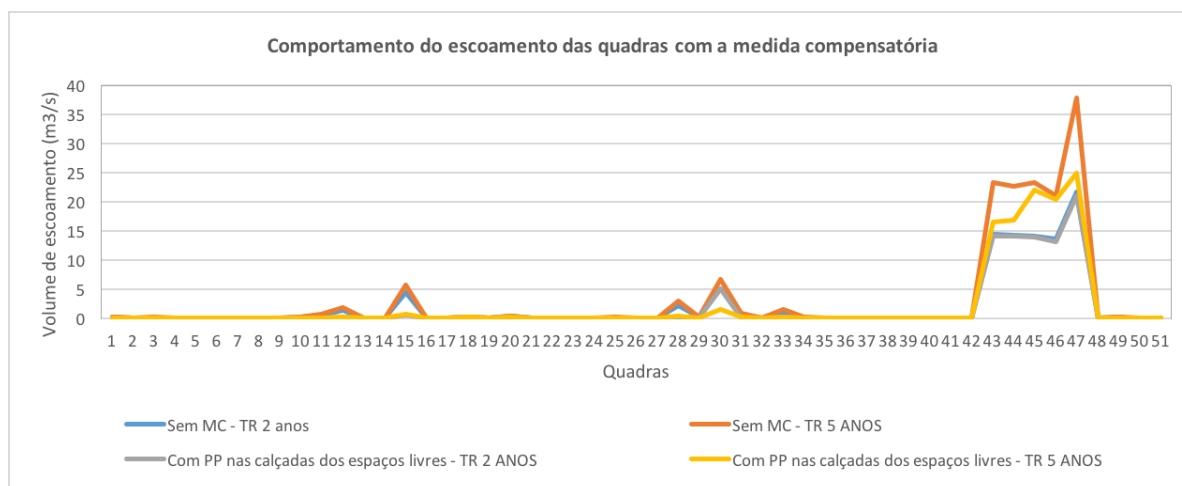
Figura 4-19 – Comportamento do escoamento superficial após PP para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



Os resultados, porém, foram mais evidentes na microbacia de Bodocongó do que na microbacia do Prado (figura 4.20). Percebe-se que em Bodocongó grande parte das quadras mantiveram valores menores, sem grandes picos. Com exceção das quadras pertencentes ao exutório da bacia (mesmo local da área de risco) que mesmo com as medidas compensatórias mantêm com altos picos.

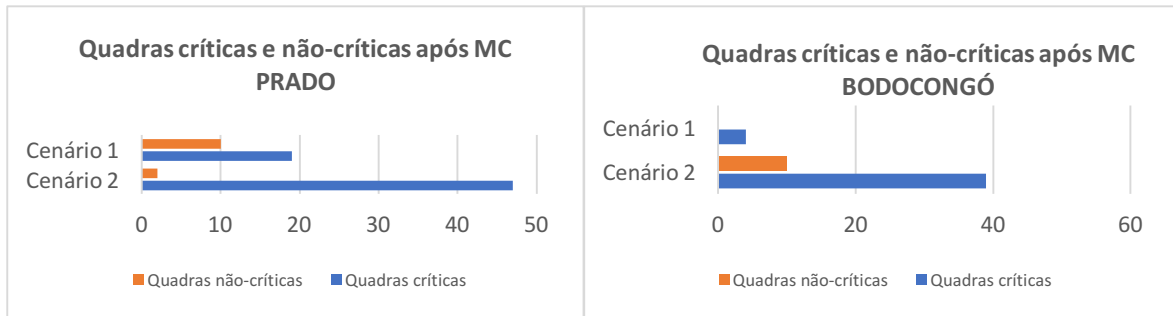
A implantação gerou a mudança de estado crítico de dez quadras no cenário 1 de Bodocongó.

Figura 4-20 – Comportamento do escoamento superficial após PP para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



Os gráficos abaixo exemplificam as diferenças da quantidade de quadras não-críticas após os pavimentos permeáveis serem introduzidos.

Figura 4-21 – Quadras críticas após o PP nas áreas livres;



- Caso (ii): Em todas as calçadas das quadras críticas

Os resultados com os pavimentos permeáveis em todas as calçadas das quadras críticas se mostram mais eficientes do que apenas usando as calçadas dos espaços livres. A área que eles representam na área total da quadra é geralmente em torno de 10%.

A alta eficiência do PP é vista principalmente no cenário atual do uso do solo. Quando o máximo da impermeabilização é inserido nas quadras, a eficiência do PP é reduzida, mas ainda assim alcança bons resultados.

Dezesseis quadras do Prado, no cenário 1, apresentaram reduções suficientes para as tornar não-críticas. Nesse caso, a menor redução de VE encontrada é de cerca de 13% do valor prévio encontrado. Como já era esperado, apenas cinco quadras mudaram de estado no cenário 2. As figuras abaixo mostram os volumes de escoamento para o Prado em ambos cenários

Figura 4-22 – Comportamento do escoamento superficial após PP para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos

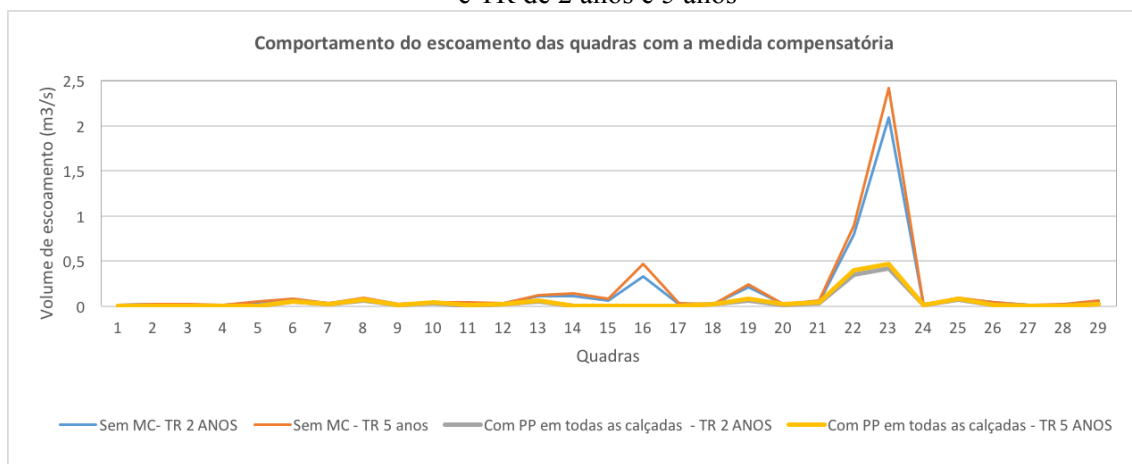
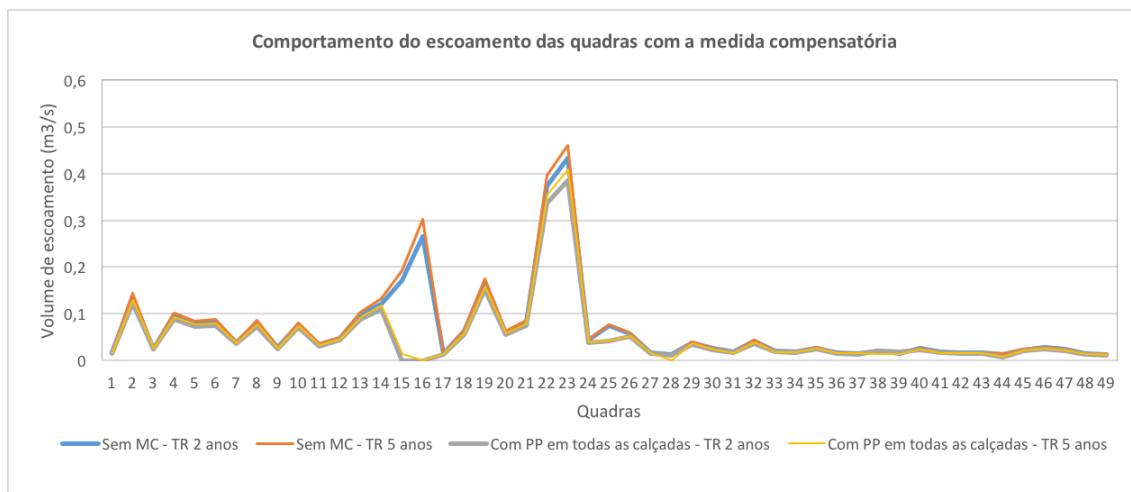


Figura 4-23 – Comportamento do escoamento superficial após PP para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



PP em todas as calçadas é o suficiente para reduzir os volumes de escoamento de todas as quadras de Bodocongó, no cenário 1, e dez quadras no cenário 2. Esses valores indicam a eficiência na atenuação de VE pelos pavimentos permeáveis, pois eles obtêm ótimos resultados com baixos índices de área de implantação.

Figura 4-24 – Comportamento do escoamento superficial após PP para Bodocongó no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos

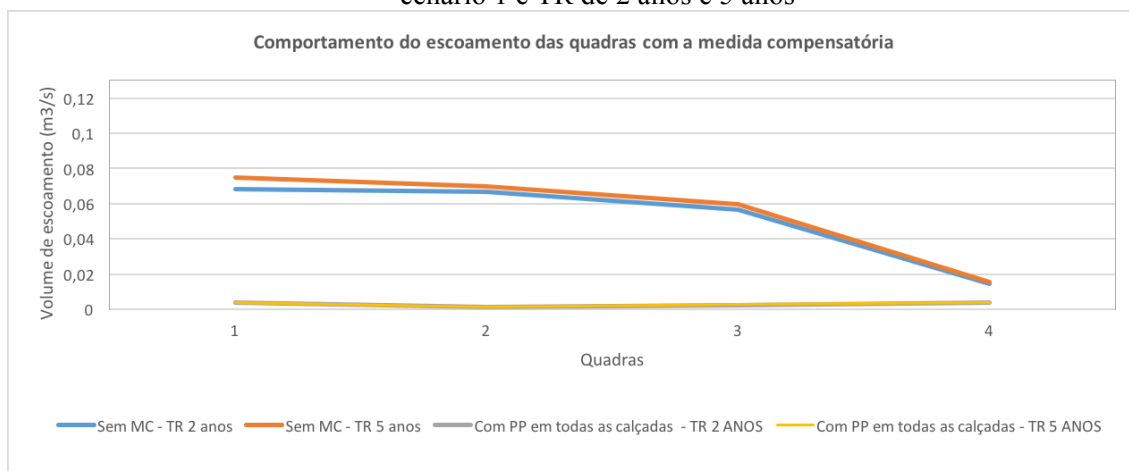
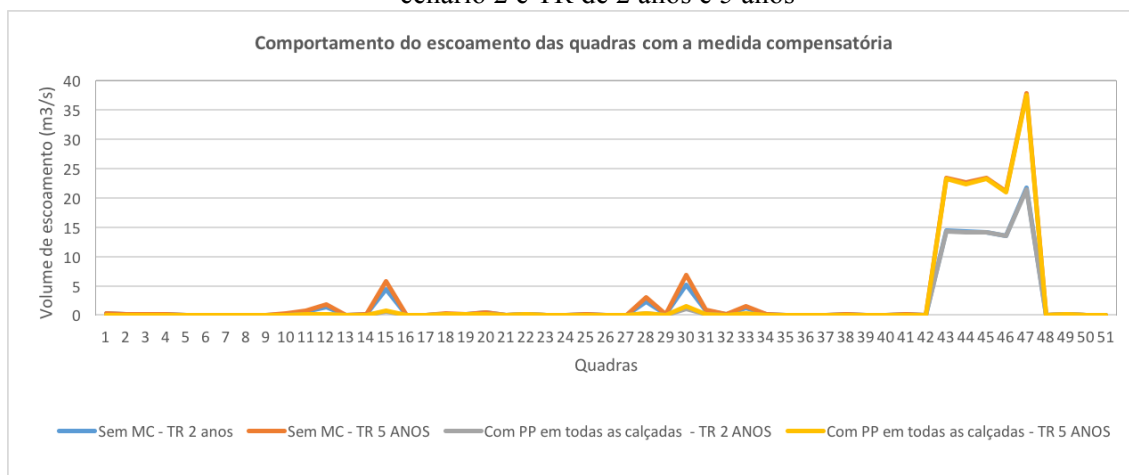


Figura 4-25 – Comportamento do escoamento superficial após PP para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



Os resultados (figura 4.26) também sugerem que a implantação dos pavimentos permeáveis em todas as calçadas das quadras, no cenário 1 (uso atual do solo), tem resultados mais altos para ambas as microbacias (tabela 4.6), trazendo, assim, a responsabilidade em aplica-los no momento atual de impermeabilização das quadras.

As análises da mudança de estado crítico das quadras após a medida compensatória (tabelas 4.5 e 4.6 e figura 4.26) demonstram a eficiência dos PPs para mitigar os escoamentos superficiais.

Figura 4-26 – Quadras críticas após o PP em todas as calçadas;

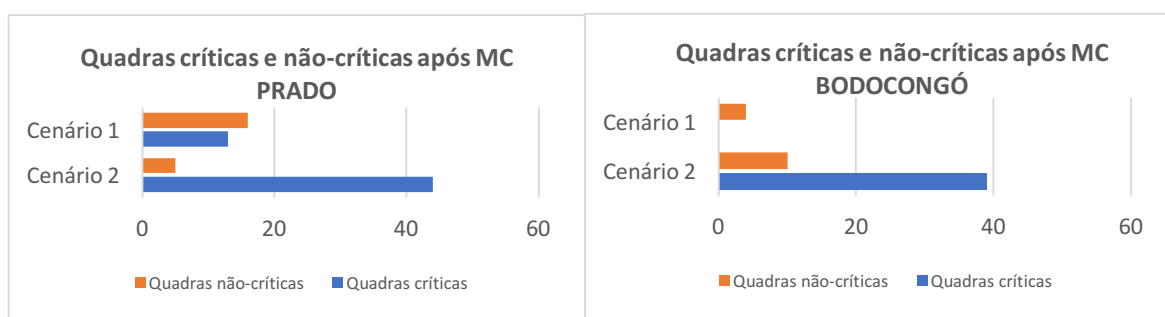


Tabela 4-6 – Porcentagem de quadras não-críticas após pavimentos permeáveis

	Prado – cenário 1	Prado – cenário 2	Bodocongó – cenário 1	Bodocongó – cenário 2
Calçadas das áreas livres	34,48%	4,1%	0%	19,60%
Calçadas de todas as quadras	55,18%	10,20%	100%	19,60%

4.1.2.3. Jardins de chuva (JC)

Pela necessidade de área disponível para a sua implantação, os jardins de chuva foram implementados nas áreas livres das quadras críticas das microbacias. Embora a eficiência da medida compensatória seja proporcional a presença de áreas livres para a sua implementação, os jardins de chuva ainda assim obtiveram resultados bastante satisfatórios. Cerca de 49% das quadras passaram a ser não críticas do Prado, no cenário 1, e aproximadamente 9 quadras no cenário 2 (aproximadamente 19%).

Além disto, a medida compensatória se destaca por altos índices de redução de escoamento nas demais quadras, mostrando, assim, sua eficiência na mitigação de alagamentos.

Figura 4-27 – Comportamento do escoamento superficial após JC para o Prado no cenário 1 e TR de 2 anos e 5 anos

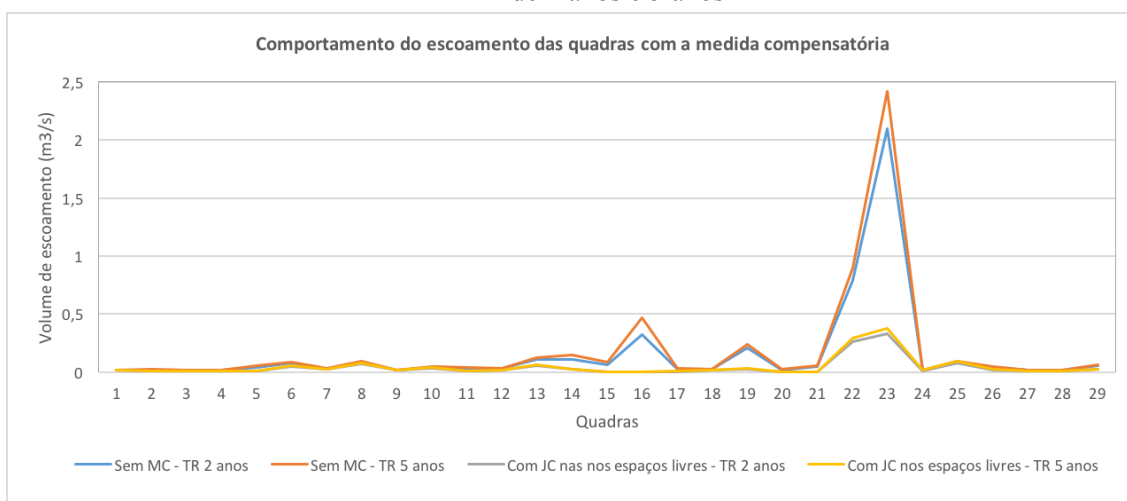
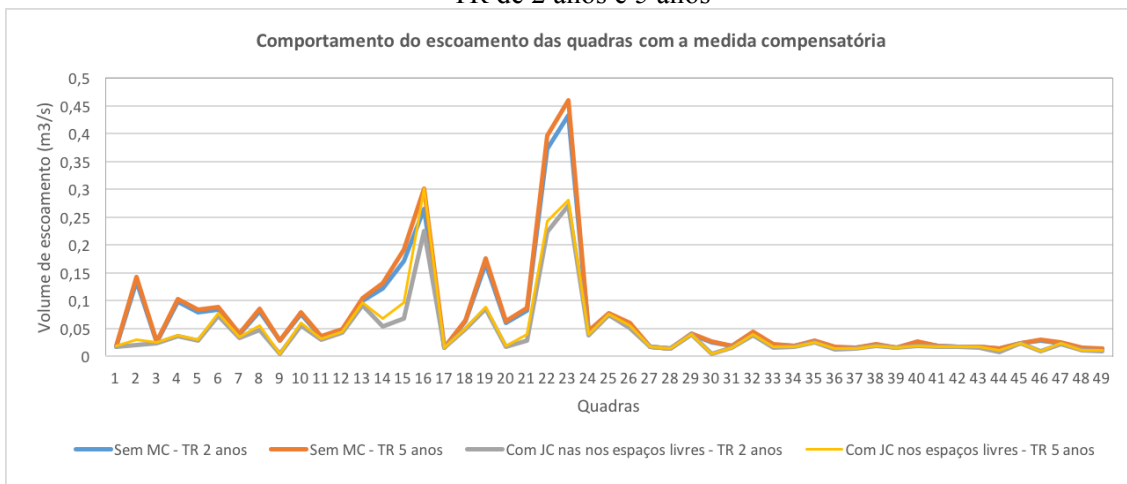
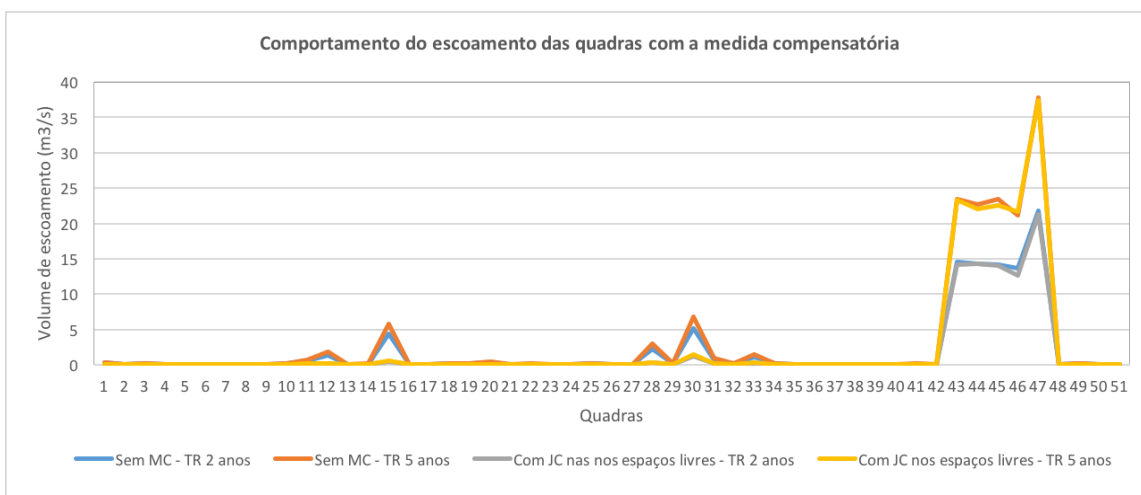


Figura 4-28 – Comportamento do escoamento superficial após JC para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



A microbacia de Bodocongó não apresentou resultados no cenário 1, devido a falta de áreas livres, e doze quadras (23,53%), no cenário 2, passaram a ser não-críticas.

Figura 4-29 – Comportamento do escoamento superficial após JC para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



A figura 4.30 e a tabela 4.7 mostram os resultados para as quadras críticas com a implantação dos jardins de chuva nas microbacias de estudo.

Figura 4-30 – Quadras críticas após a inserção dos jardins de chuva

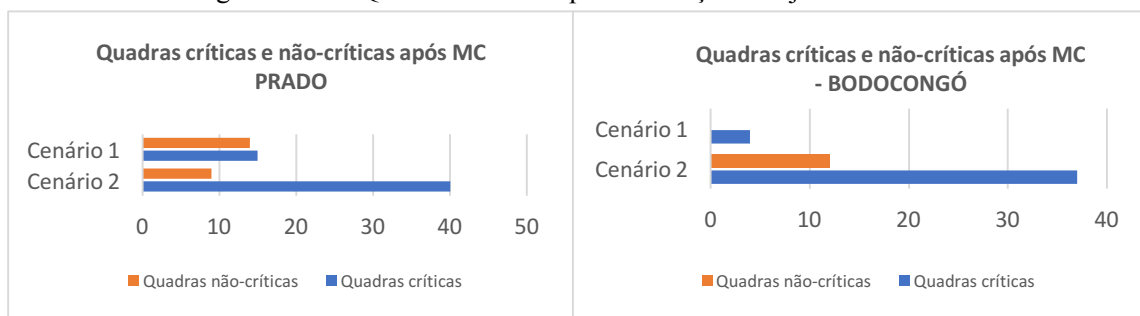


Tabela 4-7 – Porcentagem de quadras não-críticas após jardins de chuva

	Prado – cenário 1	Prado – cenário 2	Bodocongó – cenário 1	Bodocongó – cenário 2
Áreas livres	48,28%	18,37%	0%	23,53%

A implantação de medidas compensatórias em áreas livres foi realizada para os jardins de chuva e as coberturas verdes. Ao comparar os resultados, é possível perceber que os jardins de chuva possuem maiores atenuações do escoamento superficial (tabela 4.7) do que as coberturas verdes (tabela 4.5) em todas as microbacias e cenários.

As simulações indicam que, caso a área de aplicação possua muitos espaços livres, os jardins de chuva obterão maiores reduções de escoamento e trarão melhores condições de vida para a população.

4.1.2.4. Situação ideal: União das MCs

Visando obter os melhores resultados, em áreas já construídas e a construir, foi elaborado um cenário com a união das três medidas compensatórias propostas nas microbacias de estudo. Para isso determinou-se que:

- A cobertura verde será aplicada nas áreas públicas;
- O pavimento permeável será aplicado nas calçadas das quadras críticas;
- O jardim de chuva será aplicado nas áreas livres;

O cenário 2 foi escolhido para simulação da combinação de medidas compensatórias pois possui os maiores índices de volumes de escoamento. Os resultados indicaram que, em ambos os casos, todas das quadras tiveram seus escoamentos reduzidos com a aplicação das três MCs.

Figura 4-31 – Comportamento do escoamento superficial após MCs para o Prado no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos

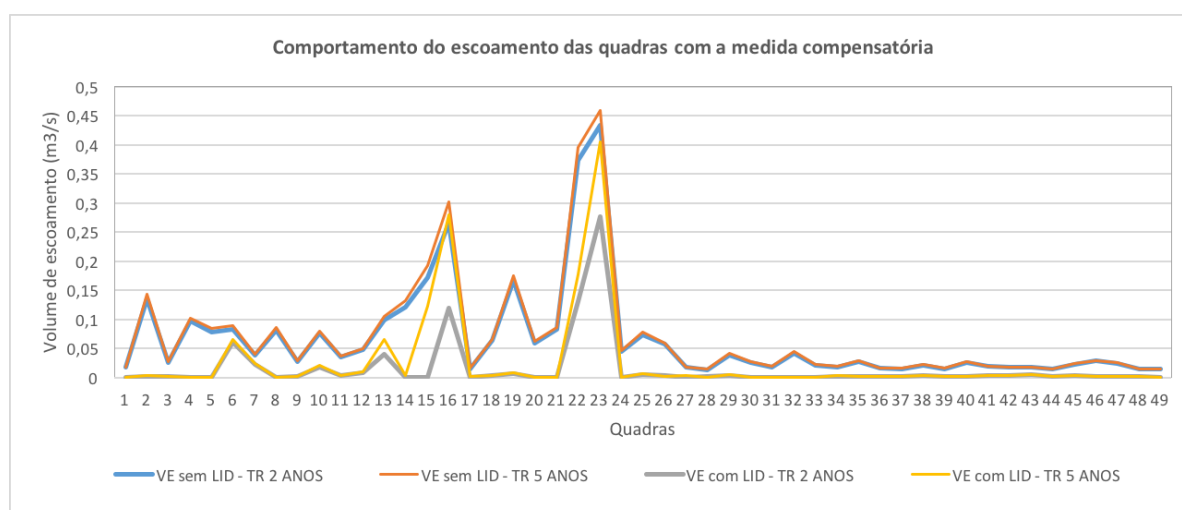
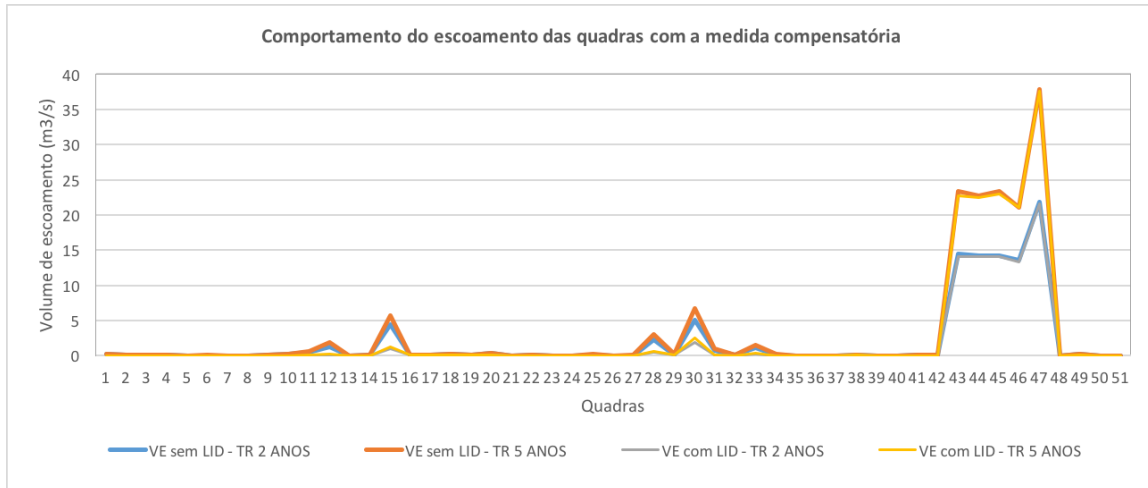


Figura 4-32 – Comportamento do escoamento superficial após MCs para Bodocongó no cenário 2 e TR de 2 anos e 5 anos



Nas microbacias do Prado, apenas 7 quadras das 49 quadras que se apresentaram como críticas sem a aplicação das medidas compensatórias continuaram na mesma situação. Na microbacia de Bodocongó, 28 das 51 quadras permaneceram críticas mas tiveram os seus picos de escoamentos reduzidos em até mais que 80%. A menor eficiência na redução de escoamento em Bodocongó era prevista considerando que o espaço não possui grandes espaços livres e públicos em suas quadras.

A figura 4.33 e a tabela 4.8 mostram os resultados da implementação com relação à mudança de estado das quadras críticas.

Figura 4-33 – Quadras críticas após a inserção de todas as medidas compensatórias;

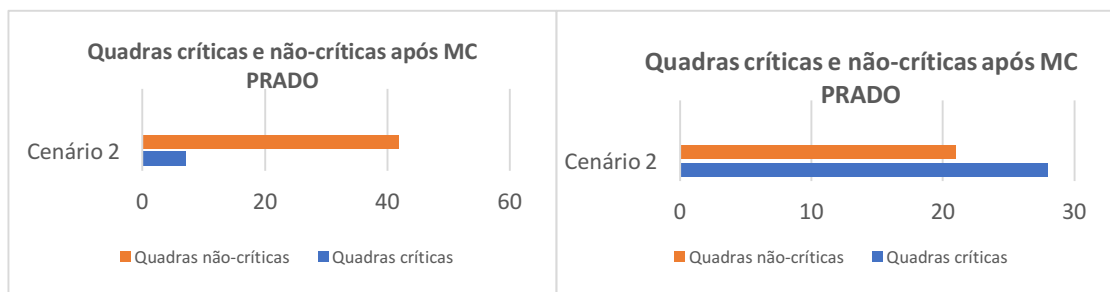


Tabela 4-8 – Porcentagem de quadras não-críticas após implementação da situação ideal

	Prado – cenário 2	Bodocongó – cenário 2
Situação ideal (união das 3 MCs)	85,72%	41,70%

As quadras mais críticas (no exutório) da microbacia de Bodocongó continuaram com altas taxas de escoamento superficial. Sugere-se um estudo mais aprofundado sobre elas e a implantação de medidas compensatórias em locais mais a montante da bacia, a fim de trazer maiores benefícios.

Os mapas gerados pela simulação da combinação de MCs mostram o comportamento final das microbacias após a inserção em conjunto das medidas compensatórias (figuras 4.34 a 4.35).

Figura 4-34 – Comportamento das microbacias após MCs (TR 2 anos); a) Prado b) Bodocongó

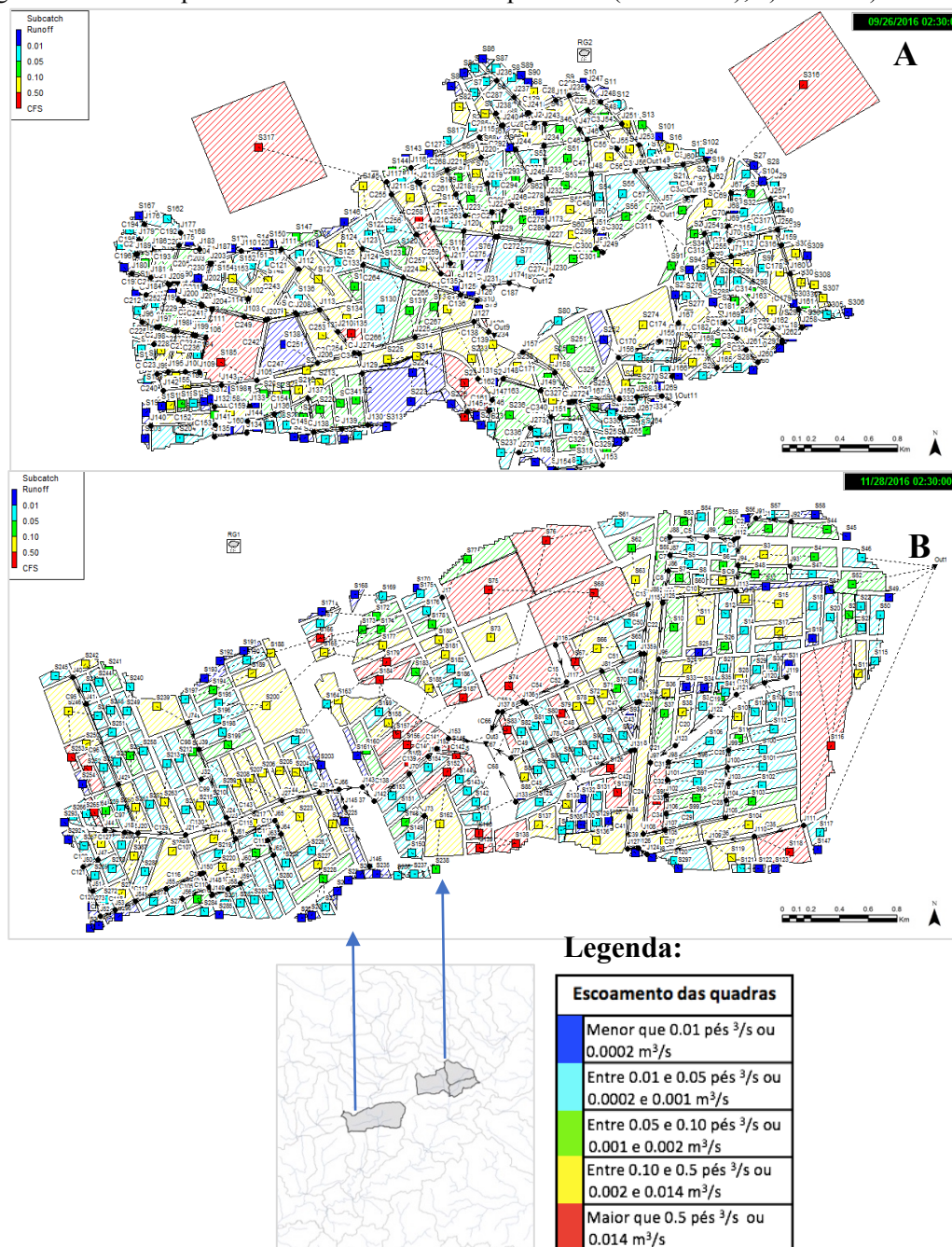
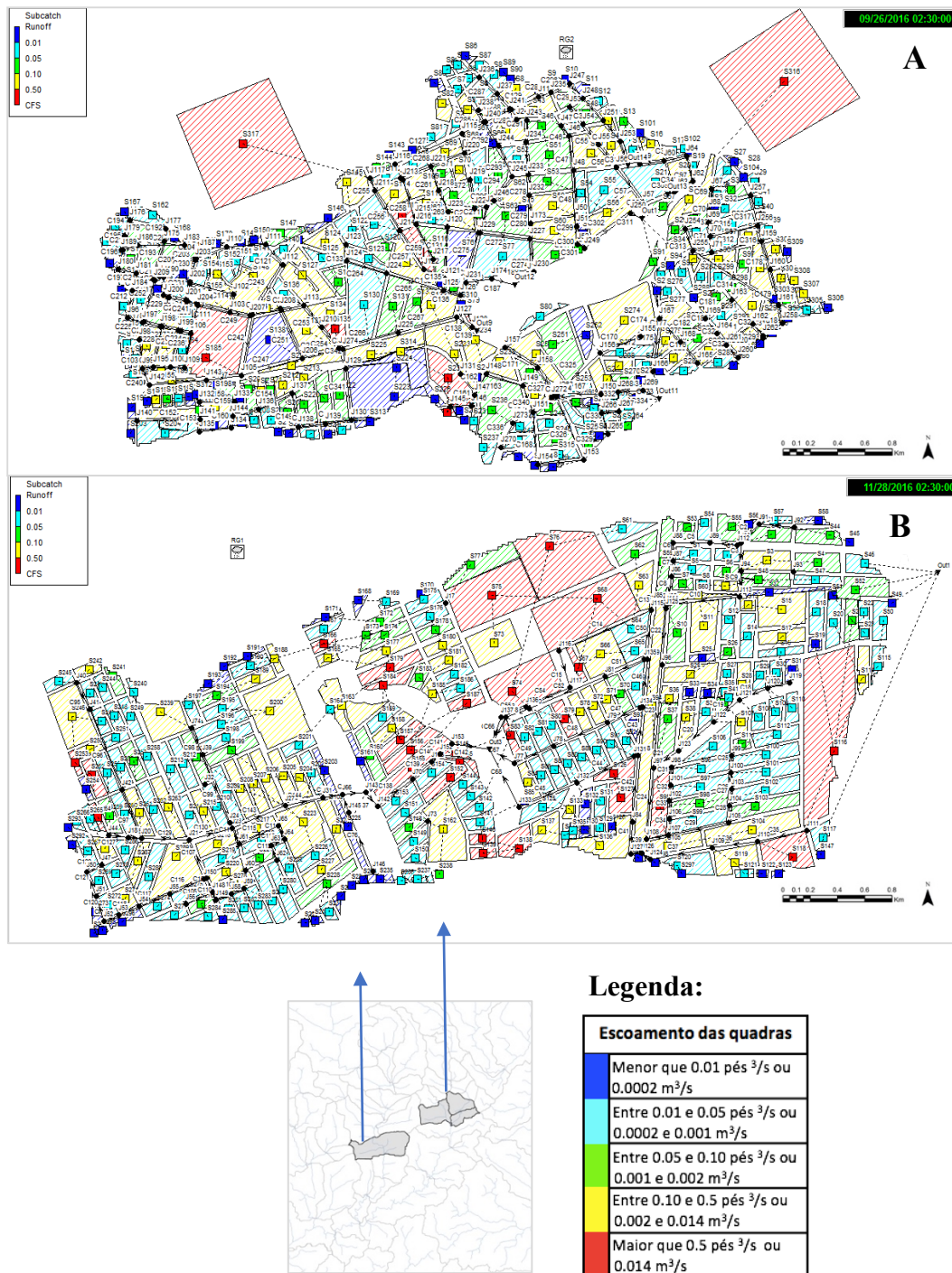


Figura 4-35 – Comportamento das microbacias após MCs (TR 5 anos); a) Prado b) Bodocongó



A comparação desses com os mapas iniciais das microbacias sem nenhuma medida compensatória demonstra a eficiência dessa implantação em ambas microbacias de estudo. O quadro resumo disposto na tabela 4.9 descreve os resultados encontrados em todas as implantações das medidas compensatórias nos casos descritos anteriormente.

Tabela 4-9 – Quadro resumo dos resultados obtidos em todos os casos de implantação das medidas compensatórias

	PRADO		BODOCONGÓ	
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2
Cobertura verde (CV)				
Edifícios com mais de 3 pavimentos	Quase metade das quadras saíram das condições críticas	Dois quadras (4,1%) passaram a ser não-críticas	Nenhuma quadra saiu das condições críticas	Nenhuma quadra saiu das condições críticas
Áreas institucionais	Quatro quadras (13,80%) passaram a ser não críticas	Doze quadras saíram das condições críticas	Todas as quadras saíram de condições críticas	Nove quadras (17,7%) passaram a ser não-críticas
Áreas livres	Quase um terço das quadras (31,01%) saíram de condições críticas	Quatro quadras (8,17%) passaram a ser não-críticas	Nenhuma quadra saiu das condições críticas	Nove quadras (17,7%) passaram a ser não-críticas
Pavimento permeável (PP)				
Calçadas das áreas livres	Mais de um terço das quadras (34,48%) saíram de condições críticas	Dois quadras (4,1%) passaram a ser não-críticas	Nenhuma quadra saiu das condições críticas	Dez quadras (19,6%) passaram a ser não-críticas
Todas as calçadas das quadras críticas	Mais da metade (55,18%) das quadras saíram das condições críticas	Cinco quadras saíram das condições críticas	Todas as quadras saíram de condições críticas	Dez quadras (19,6%) passaram a ser não-críticas
Jardins de chuva (JC)				
Áreas livres	Quase metade (48,28%) das quadras saíram das condições críticas	Nove quadras (18,37%) passaram a ser não-críticas	Nenhuma quadra saiu das condições críticas	Doze quadras (23,53%) passaram a ser não-críticas
Situação ideal (CV / PP / JC)				
CV - Áreas institucionais PP – Todas as calçadas JC – Áreas livres		Quarenta e duas quadras (85,72%) saíram das condições críticas		Vinte e uma quadras (41,70%) passaram a ser não-críticas

As variações nos resultados de eficiência das implantações das medidas compensatórias, sugerem, mais uma vez, que seus usos dependerão das características da área (se há ou não áreas livres, institucionais e edifícios com 3 pavimentos, por exemplo) e do tipo de LID a ser utilizado (coberturas verdes, pavimentos permeáveis e jardins de chuva, por exemplo).

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Essa dissertação buscou implementar três diferentes medidas compensatórias sustentáveis no sistema de drenagem de Campina Grande, a partir do estudo de duas microbacias, com técnicas de geoprocessamento, simulações computacionais e modelagem hidrológica. A escolha das áreas de estudo e das medidas compensatórias foi feita através de processos de análise multicriterial por meio de estudos de referência bibliográfica, técnicas de geoprocessamento e possibilidade de aplicações em áreas construídas e a construir na área urbana.

Através do uso do *software* SWMM, resultados satisfatórios foram obtidos nas simulações embora seu manuseio não seja de forma prática. Foram gerados mapas de alagamentos e inundações, mostrando pontos críticos das áreas de estudo no cenário atual de uso do solo e o cenário com a impermeabilização máxima prevista na legislação vigente, com a inserção de precipitações com dois tempos de retorno diferentes. Os resultados mostraram que grande parte das microbacias estariam em situação crítica (com altos volumes de escoamento) caso nenhuma medida técnica ou legal seja tomada para solucionar os problemas no sistema de drenagem. Inclusive, o cenário 2, com 80% de impermeabilização do solo, apresentou um aumento de mais de 70% na quantidade de quadras críticas, nas microbacias do Prado, e de mais de 1000% na microbacia de Bodocongó.

Os resultados obtidos para o cenário 2 demonstraram a ineficiência hidrológica das taxas de permeabilidade adotadas no Plano Diretor do município de Campina Grande, o que irá potencializar os problemas com drenagem urbana existente. Esse fato ainda é agravado por não haver um plano de drenagem urbana para o município, onde se oriente a expansão da urbanização compatibilizada com a análise dos recursos hídricos e drenagem urbana. Essa análise mostra a necessidade em estabelecer modificações na legislação local e/ou implementar medidas compensatórias no sistema de drenagem para atenuar os altos índices de escoamento superficial.

As análises mostraram a eficiência de cada implementação através do valor final de volume de escoamento gerado em cada quadra das microbacias. Os resultados basearam-se na redução de quadras críticas através das MCs e foram bastante satisfatórios nas três medidas compensatórias, com reduções de até 100% do volume do escoamento em casos distintos e em ambos tempos de retorno.

As coberturas verdes apresentaram três situações de aplicação nas microbacias: (i) em edifícios com mais de 3 pavimentos, (ii) em áreas institucionais e (iii) áreas livres. Para essa medida, os melhores resultados aplicaram-se nas áreas institucionais, pois são mais frequentes na maioria das quadras e com áreas consideráveis. O pavimento permeável foi aplicado em duas situações distintas, nas calçadas dos espaços livres e nas calçadas de todas as quadras críticas. Como o percentual de área usada para todas as calçadas é bem maior considerando apenas as dos espaços livres, os resultados se sobressaíram. Os jardins de chuva foram implementados em todos os espaços livres de ambas as áreas, com reduções de aproximadamente 48% e 18% nas quadras dos cenários 1 e 2 do Prado e aproximadamente 23% no cenário 2 de Bodocongó.

Visto que as coberturas verdes e os jardins de chuva foram aplicados nas mesmas áreas (espaços livres), pôde-se perceber maiores atenuações dos volumes de escoamentos para os jardins de chuva. Nesse caso, as simulações apontam para maior eficiência no uso dos jardins.

Por fim, foi feita a simulação do cenário mais extremo com a combinação dos casos mais eficientes de cada medida compensatória proposta: coberturas verdes nas áreas institucionais, pavimento permeável em todas as calçadas e jardins de chuva nas áreas livres. Essa formulação trouxe os melhores resultados com reduções do escoamento em todas as quadras, onde aproximadamente 85% e 46% das quadras do Prado e Bodocongó se tornaram não críticas.

Conclui-se que o modelo proposto apresenta resultados satisfatórios e coerentes quanto a redução dos volumes de escoamento e dos picos de cheia, podendo ser uma solução para a atenuação dos alagamentos e inundações das áreas de estudo e caso seja aplicado em todo o município. Todo o processo de modelagem tem limitações como, por exemplo, o dimensionamento real das galerias, bocas de lobo e sarjetas do sistema de drenagem e a definição dos parâmetros para o solo e para cada medida compensatória. É importante ressaltar que grandes são os benefícios trazidos através do uso das técnicas de LID não só para as regiões de aplicação mas para as regiões próximas que passam a receber menor carga de volume superficial.

Entende-se que apenas o uso das medidas propostas não é capaz de minimizar todos os impactos hidrológicos da eventual má gestão do uso do solo. A eficiência dos LID's é substancialmente afetada por suas dimensões e propriedades, portanto, é necessário um estudo prévio de locais prioritários de "possíveis aplicações" na área desejada para uma verificação de eficiência. É importante ressaltar que as medidas

também têm sua eficiência afetada pela má manutenção das mesmas. É necessário o comprometimento do órgão público responsável pela drenagem da cidade com a correta e periódica manutenção das infraestruturas que integram o sistema de drenagem.

Os resultados deste estudo sugerem que as infraestruturas de LID devem ser discutidas como um novo método de controle de alagamentos e inundações urbanas, juntamente com o manejo do uso do solo. O momento atual de revisão do Plano Diretor de Campina Grande parece bastante oportuno para a introdução de aspectos do planejamento urbano sensível aos recursos hídricos, através das medidas compensatórias sustentáveis de drenagem.

A partir das conclusões deste trabalho, sugerem-se as seguintes pesquisas:

- Simular outros cenários de impermeabilização do solo, considerando análise de tendências através da dinâmica espacial e temporal das bacias e implementação de índices urbanísticos mais restritivos, análise de custos e análise de sensibilidade.
- Simular medidas compensatórias nas microbacias de drenagem à montante do perímetro urbano da cidade de Campina Grande a fim de observar quais mudanças ocorreriam nos valores dos volumes de escoamento nas microbacias à jusante.
- Simular medidas compensatórias específicas para as quadras que permaneceram críticas mesmo com a implantação das medidas compensatórias sugeridas nessa dissertação.
- Estudos mais aprofundados sobre os tipos de vegetações e formas de acumulação de água a serem aplicados nas medidas compensatórias de drenagem, para que sejam consideradas as peculiaridades das áreas de estudo e para uma garantia de sustentabilidade das mesmas.
- Realizar levantamentos pontuais sobre os equipamentos de drenagem urbana de Campina Grande, considerando que os dados disponibilizados pela prefeitura não estão atualizados. Espera-se uma melhor qualidade dos resultados caso o sistema de drenagem (bocas de lobo, poços de visita e condutos) esteja representado fielmente como é na realidade.
- Sugere-se, também, uma nova elaboração dos parâmetros para a curva IDF de Campina Grande, com maiores intervalos de tempo de estudo.

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABI AAD, M. P.; SUIDAN, M. T.; SHUSTER, W. D. **Modeling Techniques of Best Management Practices: Rain Barrels and Rain Gardens Using EPA SWMM-5.** Journal of Hydrologic Engineering. (2010). Vol. 15.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

_____. 16416 de 2015: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. 15220 de 2003: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2003.

ALAMY FILHO, JOSÉ EDUARDO et al. **Eficiência hidrológica de telhados verdes para a escala de loteamentos residenciais.** Soc. nat., Uberlândia, v. 28, n. 2, p. 257-272, 2016.

AL – RUBAEI, A. M., ENGSTROM, M.; VIKLANDER, M; TOBIAS-BLECKEN, G. **Long-term Hydraulic Performance of Stormwater Infiltration Systems – a field survey.** Novatech, 2013.

ALESSI, F., KOKOT, P. J. e GOMES, J. **Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso.** Da Vinci, Curitiba, v. 3 , n. 1, p. 139-156, 2006

ALMEIDA, RODRIGO BRAGA DE; FERREIRA, OSMAR MENDES. **Calçadas Ecológicas: construção e benefícios sócio-ambientais.** Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental. Goiânia: PROPE. PUC, junho/2008. 28p.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J.L. DE M.; SPAROVEK, G. 2014. **Köppen's climate classification map for Brazil.** Meteorologische Zeitschrift 22, 711–728.

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.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana,** Porto Alegre: ABRH, 2005. 318 p.

BARACUHY, J. G. de V.; KURTZ, S. M. de J.; KURTZ, F. C.; DUARTE, S. M. A.; LIMA, V. L. A. de; ROCHA, J. S. M. da; NETO, J. D. **Deterioração físico-conservacionista da microbacia hidrográfica do riacho Paus Brancos, Campina Grande, PB.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.1, p.159-164, 2003

BARROS, A.H.C.; ARAÚJO FILHO, J.C. DE; SILVA, A.B. DA; SANTIAGO. G.A.C.F. 2012. **Climatologia do Estado de Alagoas.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n.211. Recife: Embrapa Solos, 32p.

BERNDTSSON, J. C. **Green Roof Performance towards management of runoff water quantity and quality: a review.** Ecological Engineering, 36 (2010) 351-360.

BRASIL. **Programa Drenagem Urbana Sustentável.** Ministério das Cidades. 2006. Manual para apresentação de propostas. 23 p. 2006

BRASIL.

_____. Lei Federal nº 9.433, de 8 de jan. de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.**

_____. Lei Federal nº11.445, de 5 de jan. de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico.**

_____. Lei Estadual da Paraíba nº10.047, de 09 de Julho de 2013. **Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do “Telhado Verde” nos locais que especifica, e dá outras providências**

_____. Lei Municipal de Recife nº18.112, de 12 de jan. de 2015. **Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências.**

_____. Lei Municipal de Recife nº18.111, de 12 de jan. de 2015. **Define limites e mecanismos de compensação para os Setores de sustentabilidade ambiental 2 -SSA, no Entorno das unidades de equilíbrio ambiental -Uea, Referentes às praças e parques da cidade.**

BRATTEBO, B. O., BOOTHE, D. B. **Long-term Stormwater Quantity and Quality Performance of Permeable Pavement Systems.** Water research, 2003BRUNDTLAND, Comissão. Nosso Futuro Comum, Relatório sobre Desenvolvimento Sustentável. 1987.

CHOCAT, B.; KREBS, P.; MARSALEK, J.; RAUCH, W.; SHILLING, W. **Urban drainage redefined: from stormwater removal to integrated management.** Water Science & Technology. Volume 43, Issue 5, 2001. p.61-68

CHANG, YU-HERN; YEH, CHUNG-HSING AND CHANG, YU-WEI. **“A new method selection approach for fuzzy group multicriteria decision making”.** Applied Soft Computing, Volume 13, Issue 4 (2013) 2179-87.

CHEN A. S., HAMMOND M. J., DJORDJEVIĆ S., BUTLER D., KHAN D. M. AND VEERBEEK W. (2016) **From hazard to impact: the flood damage assessment tools for mega cities,** Natural Hazards, 82, 857-890.

CHEN, SHYI-MING AND HONG, JIA-AN. **“Multicriteria linguistic decision making based on hesitant fuzzy linguistic term set and the aggregation fuzzy sets”.** Information Sciences, Volume 286 (2014). 63-74.

CHI (Computational Hydraulics International). 2013. **Creating a PCSWMM 2D Model. Guelph: CHI Support.** <http://support.chiwater.com/support/solutions/articles/29927-creating-a-pcswmm-2d-model>.

CHI (Computational Hydraulics International). 2014b. **Changes to 2D Modeling in PCSWMM Version 5. Guelph: CHI Support.** <http://support.chiwater.com/support/solutions/articles/3000017428-changes-to-2d-modeling-in-pcswmm-version-5-5>.

COFFMAN, L. S; GOO, R.; FREDERICK, R. **Low-Impact Development: An Innovative Alternative Approach to Stormwater Management.** 29th Annual Water Resources Planning and Management Conference. 1999, Tempe, Arizona, United States

COLLODEL. M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão.** Dissertação de mestrado – USP, São Carlos, 2009.

COSTA J., ALEANDRI, G. A; POLETO C. **Experimental Studies of Green Roof Systems as part of Sustainable Urban Watershed in order to minimize the problems of flooding.** XII International Conference on Urban Drainage. Porto Alegre/Brazil, 2011.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa (Campina Grande – Paraíba).** Ministério de Minas e Energia –Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Brasília, 2013.

DOMINGUES; C. V; FRANÇOSO, M. T. **Aplicação de Geoprocessamento no processo de modernização da gestão municipal.** Revista Brasileira de Cartografia. n. 60, p. 71-78, 2008.

ELMQVIST T.; SETALA H.; HANDEL, S.; PLOEG, S VAN DER.; ARONSON, J.; BLIGNAUT, JN; GOMEZ-BAGGETHUN, E; NOWAK, DJ.; KRONENBERG, J.; AND GROOT, R DE. **Benefits of restoring ecosystem services in urban areas.** *Environmental Sustainability.* 2015, 14: 101-108

ELLIS, J. B. **Sustainable surface water management and green infrastructure in UK urban catchment planning.** *Journal of Environmental Planning and Management.* Volume 56, 2013 – Issue 1

ESRI. **ArcGIS 10.1 - Tutorial interno.** Redlands, California, USA. 2014.

FERRARA, R. A & WITKOWSKI, P. **Stormwater quality characteristics in detention basins.** *Journal of Environmental Engineering.* Vol. 109, Issue 2 (1983)

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M. de; SANTOS, D; MATOS, R. M. de. **Classificação Climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba.** *Revista Brasileira de Geografia Física* V. 08 N. 04 (2015) 1006-1016.

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.**

GOLDENFUM, J. A.; TASSI, R.; MELLER, A. ALIASIA, D. G.; SILVEIRA, A. L. da. **Challenges for the Sustainable Urban Stormwater Management in Developing Countries: From basic education to technical and institutional issues.** NOVATECH'2007. Porto Alegre – Brazil

HERRMANN, T.; SCHMIDA, U. **Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects.** *Urban Water.* Volume 1, Issue 4, 2000. p. 307–316

ISHIMATSU, K., ITO, K., MITANI, Y. **Use of rain gardens for stormwater management in urban design and planning.** *Landscape Ecol Eng* (2017) 13: 205. doi:10.1007/s11355-016-0309-3

KELLAGHER R. (2012) - **Preliminary rainfall runoff management for developments.**

http://www.uksuds.com/information/SR744_Flood%20Risk%20User%20Guide.pdf. Wallingford, Inglaterra.

KENNEDY, A. & LEWIS, D. **Attaining the most sustainable solution in stormwater control in England and Wales**. LESAM 2007. Proc. of City: 2nd Leading Edge Conference on Strategic Asset Management, Lisbon, Portugal October 17-19, 2007.

KIRPICH, Z.P. (1940). **“Time of concentration of small agricultural watersheds”**. Civil Engineering 10(6), p.362.

KORKEALAAKSO, J.; KUOSA, H.; NIEMELAINEN, E.; & TIKANMAKI, M. **Review of pervious pavement dimensioning, hydrological models and their parameter needs**. State-of-the-art. Research report. (2014)

LEITE, B. P.; FUJIMIRA, J. M.; FERNANDES, J. S. de A.; **Avaliação dos impactos na drenagem com a implantação de telhados verdes na UFMT – Campus Cuiabá** utilizando o software SWMM. Anais 6º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Cuiabá, MT, 22 a 26 de outubro 2016 - Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 354-363

LINDHOLM, O., ENDRESEN, S., THOROLFFSSON, S., SÆGROV, S., JAKOBSEN, G. AND L., A. (2008) **Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering**, Hamar, Norway: Norsk Vann BA.

LIMA, R. DA C. C.; CAVALCANTE, A. M. B.; FILHO, J. F. **Avaliação do processo de desertificação no semiárido paraibano utilizando geotecnologias**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba-PR, 2011

LIMA, R. de L. S. de; SEVERINO, L. S.; FERREIRA, G. B.; SILVA, M. I. L. da; ALBUQUERQUE, R. C.; BELTRÃO, N. E. DE M. **Crescimento da mamoneira em solo com alto teor de alumínio na presença e ausência de matéria orgânica**. Rev. bras. ol. fibros., Campina Grande, v.11, n.1, p.15-21, jan./abr. 2007

LI Y; BABCOCK RW JR. **Green roof hydrologic performance and modeling: a review**. Water Science & Technology. 2014;69(4):727-38. doi: 10.2166/wst.2013.770.

LIN, WUGUANG; RYU, SUNGWOON; PARK, DAE GEUN; LEE, JAEHOON; CHO, YOON-HO; **Performance Evaluation of the Runoff Reduction with Permeable Pavements using the SWMM Model**. International Journal of Highway Engineering. Volume 17, Issue 4, 2015, pp 11-18.

MARSH, W & HILL-ROWLEY. **Water Quality, Stormwater Management, and Development Planning on the Urban Fringe**. UJ Urb. & Comtemp. L., 1989.

MARTIN, C.; RUPERD, Y. LEGRET. M. **Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices**. European Journal of Operational Research. Volume 181, Issue 1, 2007. P. 338 – 349

MASCARÓ, J. J. **A infraestrutura verde como estratégia de sustentabilidade urbana**. XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - outubro 2012 - Juiz de Fora

MATHEUS, C.; CAETANO, F. D. N.; MORELLI, D. D. de O.; LABAKI, L. C. **Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 71-81, jan./mar. 2016. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000100061>

- MATLOCK, M. **Low impact development manual for Arkansas**. Center for agricultural and rural sustainability. University of Arkansas, 2010.
- MAUS, V. W.; RIGHES, A. A.; BURIOL, G. A. **Pavimento permeável e Escoamento Superficial da água em áreas urbanas**. I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste. Cuiabá, 2007.
- MDE – Maryland Department of the Environment. **Maryland Stormwater Design Manual**. Volume 1. Baltimore, MD. 2000
- MELLER, A; PAIVA, E.M.C.D. (2007). **Simulação hidrodinâmica 1D de inundações em sistema de drenagem urbana**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, p-1-11.
- MELO FILHO, H.; FEITOSA, P. H. C.; FREIRE, J. R. P. E ROCHA, M. D. **“Avaliação do sistema de Drenagem Pluvial da cidade de Campina Grande – Paraíba”**. Apresentado no XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Natal, Rio Grande do Norte, 2014.
- MENDES, C.A.B.; CIRILO, J.A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001. 536 p.
- METROPOLITAN COUNCIL. Minnesota Urban Small Sites – BMP. **Manual: Stormwater Best Management Practices for Cold Climates**. St. Paul, MN, 2001.
- MERWADE V. AND F. OLIVERA, **Water Resources Analysis and Modeling Using ArcGIS**, ESRI Press, Redlands, 2015.
- MIGUEZ, M. G., AND MAGALHÃES, L. P. C. (2010). **“Urban flood control, simulation and management: An integrated approach.” Methods and techniques in urban engineering**, InTech, Vukovar, Croatia, 131–160.
- MIGUEZ, M. G., MASCARENHAS, F. C. B., AND MAGALHÃES, L. P. C. (2007). **“Multifunctional landscapes for urban flood control in developing countries.”** Int. J. Sustainable Dev. Plann., 2(2), 153–166.
- MINAKI, C; AMORIM, M C. de C. T. **Características das ilhas de calor em Araçatuba/SP: análise de episódios**. REVISTA GEONORTE, Edição Especial 2, V.2, N.5, p. 279 – 294, 2012.
- MOURA, PRISCILA MACEDO; BAPTISTA, MÁRCIO BENEDITO; BARRAUD, SYLVIE. **Avaliação Multicritério de Sistemas de Drenagem de Água**. REGA – Revista de Gestão de Água da América Latina, v.6, n.1, p.31-42, jan/jun.2009.
- MOTA, S. **Urbanização e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 353p
- 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.
- NUCCI, J. C. **Qualidade Ambiental e Adensamento Urbano: um estudo de planejamento da paisagem do distrito de Santa Cecília (MSP)**. 1996, 229p. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PALLA, A., GNECCO, I., LANZA, L.G., 2012. **Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic model of a green roof**. Hydrol. Process. 26, 73–84, <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8112>.

PAIXÃO, F.J.R.; ANDRADE, A.R.S.; AZEVEDO, C.A.V.; COSTA, T.L.; GUERRA, H.O.C. **Ajuste da curva de infiltração por meio de diferentes modelos empíricos. Pesquisa aplicada & Agrotecnologia**, volume 2, nº 1, p 108-112. Guarapuava-PR, 2009.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho de Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano**. 256p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PMCG - PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINA GRANDE. Lei 3968/01 de 28 de novembro de 2001. **Promove a revisão do Plano Diretor do Município de Campina Grande**.

_____. **Relatório Técnico do Plano Municipal de Campina Grande**. 2015.

_____. Lei Complementar nº 042 de 29 de setembro de 2012. **Institui o código de defesa do meio ambiente do município de campina grande e dá outras providências**. 2007.

_____. Lei Nº 5410/13 de 23 de dezembro de 2013.

POLIDORI, M.C. **Crescimento urbano e ambiente: Um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade**. Tese de Doutorado. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/6191>, acessado em 09/03/2014. UFRS, Rio Grande do Sul: 2004.

RAMALHO, PRISCILA B.; RUFINO, IANA A.A.; FEITOSA, P. H. C.. **Estimativa de potenciais problemas na microdrenagem urbana a partir de uma avaliação multicriterial espacial**. Anais da 5a Reunião de Estudos Ambientais, Porto Alegre, 2015.

RAMCHUNDER, S. J. & HOLDEN, L. E. B. J. **Environmental effects of drainage, drain-blocking and prescribed vegetation burning in UK upland peatlands**. Progress in Physical Geography. Vol 33. Issue 1, 2009

RIBEIRO, C. A. A. S. et al. **O desafio da delimitação de áreas de preservação permanente**. Revista *Árvore*, v. 29, n. 2, p. 203-212, 2005.

RIBEIRO, MARIA ELIANA JUBÉ. **Infraestrutura verde: uma estratégia de conexão entre pessoas e lugares. Por um planejamento urbano ecológico para Goiânia**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). São Paulo: FAUUSP, 2010. 179p.

ROSA, D. J.; CLAUSEN, J. C.; DIETZ, M. E. **Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development**. Paper No. JAWRA-14-0014-P of the Journal of the American Water Resources Association (JAWRA). 2015.

ROSSMAN, L.A., 2010. **Storm Water Management Model User's Manual Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0**. United States Environ. Prot.Agency.Rossmann, L., 2015. Storm

RUFINO, IANA A. A.; SANTOS, RODOLFO C. TSUYUGUCHI, BÁRBARA. **Estimativas de taxas de impermeabilização do solo nas bacias urbanas do município de Campina Grande-PB utilizando sensoriamento remoto**. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa, 2015.

SANTOS, R. B.; MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; MASCARENHAS, F. C. B.; SERPA, M. C. **Soluções Alternativas para Sistemas de Drenagem Urbana Integrando Áreas de Favelas com a Cidade Formal**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XX, 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

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, L. P. S. S.; CUBA, R. M. F.L LEITAO, V. S. e NETO. A. S. S. **Análise da eficiência de calçadas ecológicas como sistema de drenagem sustentável nos centros urbanos: estudo de caso no Parque Flamboyant, Goiânia – Goiás.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria, v. 19, n. 3, set-dez. 2015, p. 837-849. Rennó, C. D.; Soares, J. V. (2010)

SEMADENI-DAVIES, A., HERNEBRING, C., SVENSSON, G. AND GUSTAFSSON, L. G. (2008) **The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system.** J. Hydrol., 350(1-2), 100-113.

SILVA, REGINALDO MACEDÔNIO DA. **Introdução ao Geoprocessamento: Conceitos, técnicas e aplicações.** Editora feevale, 2007

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

SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A. **Sustainable approach applied for the development of urban drainage manuals in Brazil** In: Novatech 2004, 2004, Lyon - França. Novatech 2004. Lyon - França: GRAIE. v.2. p.1325 – 1332.

SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A. (2007) **Metodologia generalizada para pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte.** RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 12 – n.2 – abril/junho 2007. 157-168.

SHNMA, T. A. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada a transformação chuva-vazão.** Dissertação de mestrado – USP - São Paulo - 2011

SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B.B.; AYRES, F. M. **Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.1, p.46-57, jan./fev. 2010

SOLECKI W, MARCOTULLIO PJ: **Climate change and urban biodiversity vulnerability. In Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities.** Springer; 2013:485-504.

TANG, S., LUO, W., JIA, Z. **Evaluating Retention Capacity of Infiltration Rain Gardens and Their Potential Effect on Urban Stormwater Management in the Sub-Humid Loess Region of China.** Water Resources Management (2016) 30: 983. doi:10.1007/s11269-015-1206-5

TAN, C.; YI, WENTAO AND CHEN, X. **“Hesitant fuzzy Hamacher aggregation operators for multicriteria decision making”.** A Soft Computing, V. 26 2015. 325-49

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G. **Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

“THE GREEN BERLIN”, Senatsverwaltung fuer Stadtentwicklung, Oktoberdruck, Berlin, Abril 2011

- THIEKEN, A.; PETROW, T. KREIBICH, H.; MERZ, B. **Insurability and Mitigation of Flood Losses in Private Households in Germany.** Risk Analysis. Volume 26, Issue 2, 2006. p. 383–395
- TODESCHINI, S.; PAPIRI, S.; CIAPONI, C. **Performance of stormwater detention tanks for urban drainage systems in northern Italy.** Journal of Environmental Management. Volume 101, 201. p. 33–45
- TUCCI, C. E. M. e BERTONI, J. C. B. **Inundações Urbanas na América do Sul.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.
- TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas.** Rio Grande do Sul: Ministério das Cidades, 2003.
- TSUYUGUCHI, B. B. “**Macrodrenagem 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.
- TSUYUGUCHI, B. B; RUFINO, IANA. A.A.; SANTOS, RODOLFO C. **Estudos de delimitação de microbacias urbanas no Município de Campina Grande – PB.** Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal, ABRH:2014.
- UNITED NATIONS POPULATION FOUND. **The State of World Population.** [S.l.]: United Nations Population Found, 2013. 140 p.
- WING, C. C.; **Managing flood problems in Malaysia.** Buletin Ingeniur, 1971.
- ZHOU, H., SHI, P., WANG, J., YU, D., AND GAO, L. (2011). “**Rapid urbanization and implications for river ecological services restoration: Case study in Shenzhen, China.**” J. Urban Plann. Dev., 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000051, 121–132.

APÊNDICE A

As figuras abaixo mostram os esquemas utilizados nas análises multicriterial para os métodos 1 e 2 (relativo ao capítulo 3).

Figura A-1 – Esquema utilizado no Model Builder no Método 1;

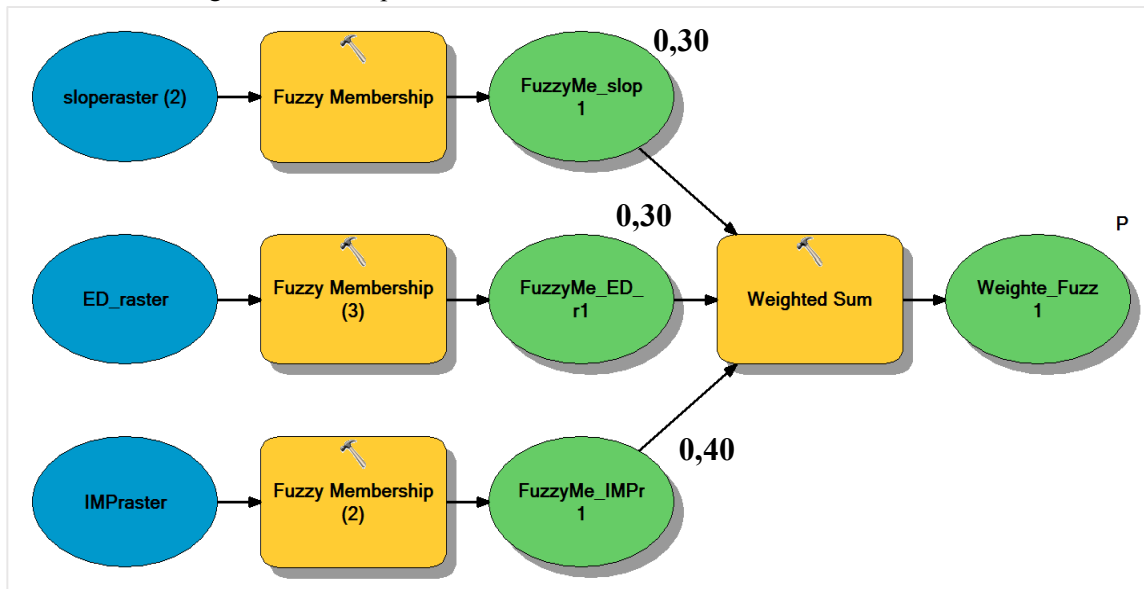


Figura A-2 – Esquema utilizado no Model Builder no Método 2;



APÊNDICE B

Coberturas verdes:

Tabela B-1 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação das coberturas verdes para o Prado no cenário 1

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)	Caso (ii) - % (TR 2 anos)	Caso (ii) - % (TR 5 anos)	Caso (iii) - % (TR 2 anos)	Caso (iii) - % (TR 5 anos)
1	12,28	11,86	3,51	3,39	3,51	3,39
2	40,00	41,67	21,54	22,22	21,54	22,22
3	34,43	36,36	11,48	12,12	6,56	7,58
4	29,09	29,31	14,55	13,79	29,09	29,31
5	75,00	79,47	3,57	3,16	7,14	5,79
6	36,30	36,73	5,19	5,10	10,00	9,86
7	24,47	24,00	7,45	8,00	10,64	11,00
8	32,99	32,73	74,23	72,97	19,93	19,82
9	49,09	56,92	90,91	87,69	10,91	10,77
10	10,37	10,18	0,00	0,00	7,41	6,59
11	72,90	74,29	100,00	94,29	73,83	74,29
12	35,09	37,30	9,65	9,52	14,04	13,49
13	43,48	45,91	5,63	5,91	49,36	51,59
14	77,28	80,27	0,52	0,00	78,85	80,86
15	100,00	100,00	10,23	7,69	4,19	30,10
16	100,00	99,94	11,87	10,03	1,46	2,52
17	81,40	80,58	0,00	0,00	77,91	80,58
18	9,33	62,96	0,00	0,00	12,00	12,35
19	65,44	65,88	19,18	16,23	89,39	87,91
20	1,59	2,44	63,49	57,32	92,06	86,59
21	14,81	11,76	46,91	42,16	100,00	100,00
22	53,34	53,96	0,00	0,00	67,11	67,45
23	78,61	79,48	0,00	0,00	85,29	84,83
24	7,69	8,33	0,00	0,00	26,92	25,00
25	16,90	11,21	24,14	22,42	3,10	0,00
26	55,32	50,97	3,55	3,87	1,42	1,94
27	40,00	33,96	0,00	0,00	42,00	33,96
28	35,59	37,50	0,00	0,00	35,59	37,50
29	55,28	57,01	37,19	37,56	59,80	56,11

Tabela B-2 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação das coberturas verdes para Bodocongó no cenário 1

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)	Caso (ii) - % (TR 2 anos)	Caso (ii) - % (TR 5 anos)	Caso (iii) - % (TR 2 anos)	Caso (iii) - % (TR 5 anos)
1			94,26	94,03		
2			97,90	98,00		
3			95,05	94,39		
4			46,15	41,82		

Tabela B-3 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação das coberturas verdes para o Prado no cenário 2

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)	Caso (ii) - % (TR 2 anos)	Caso (ii) - % (TR 5 anos)	Caso (iii) - % (TR 2 anos)	Caso (iii) - % (TR 5 anos)
1	7,94	7,69	4,76	4,62	0,00	0,00
2	9,56	9,59	34,30	33,66	22,04	22,31
3	5,49	5,26	9,89	9,47	5,49	5,26
4	20,11	20,49	20,40	20,77	29,31	28,96
5	6,07	4,98	4,29	4,65	100,00	100,00
6	11,74	11,67	3,36	3,15	13,42	13,56
7	11,59	11,72	4,35	4,83	-28,26	15,17
8	17,93	18,03	66,90	67,21	63,79	63,93
9	32,32	31,37	64,65	63,73	100,00	100,00
10	6,23	5,96	0,00	0,00	8,06	8,07
11	0,00	0,00	100,00	100,00	12,10	16,15
12	0,00	0,00	7,06	6,78	10,00	10,17
13	0,00	0,00	5,37	5,65	8,19	8,33
14	4,84	4,88	5,76	5,73	94,01	89,38
15	4,90	4,96	3,76	3,80	94,93	90,66
16	3,07	3,06	5,07	5,10	47,04	42,02
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	44,00	44,02	31,11	31,62	23,11	23,50
19	17,65	17,57	44,37	44,89	48,57	49,36
20	0,00	0,00	51,17	52,02	70,89	71,30
21	0,00	0,00	54,61	54,69	65,19	66,02
22	15,52	15,41	36,13	36,61	40,18	40,71
23	14,09	14,02	33,23	33,64	37,17	37,78
24	6,37	6,71	40,13	40,24	14,65	14,63
25	0,00	0,00	28,79	29,24	0,00	36,10
26	0,00	0,00	0,00	0,00	8,82	8,45
27	0,00	0,00	0,00	0,00	-9,84	0,00
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	2,16	2,05	32,37	32,88	0,00	0,00
30	0,00	0,00	90,22	90,63	13,04	12,50
31	3,08	4,41	72,31	72,06	7,69	8,82
32	6,00	5,73	18,00	17,83	10,00	9,55
33	2,70	2,60	67,57	68,83	16,22	15,58
34	6,15	5,97	23,08	22,39	9,23	8,96
35	5,15	5,94	19,59	19,80	8,25	8,91
36	5,26	5,08	0,00	0,00	19,30	20,34
37	7,41	8,93	18,52	17,86	9,26	10,71
38	0,00	0,00	5,33	5,13	13,33	12,82
39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40	16,30	16,84	56,52	54,74	28,26	28,42
41	7,58	7,35	86,36	0,00	7,58	7,35
42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	4,84
44	42,00	41,18	42,00	41,18	42,00	41,18
45	0,00	0,00	48,78	49,41	0,00	0,00
46	9,90	9,62	0,00	0,00	68,32	68,27
47	6,98	6,74	51,16	51,69	6,98	6,74
48	0,00	0,00	0,00	0,00	23,53	24,53
49	10,00	9,80	10,00	9,80	30,00	29,41

Tabela B-4 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação das coberturas verdes para Bodocongó no cenário 2

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)	Caso (ii) - % (TR 2 anos)	Caso (ii) - % (TR 5 anos)	Caso (iii) - % (TR 2 anos)	Caso (iii) - % (TR 5 anos)
1	0,00	0,00	90,19	90,82	89,97	90,62
2	0,00	0,00	96,70	96,87	96,43	96,61
3	0,00	0,00	90,33	89,95	90,15	90,46
4	0,00	0,00	41,59	42,02	44,25	44,96
5	0,00	0,00	21,43	19,18	21,43	21,92
6	0,00	0,00	38,89	40,91	38,89	40,26
7	0,00	0,00	37,90	38,76	8,06	8,53
8	0,00	0,00	48,06	48,92	48,06	48,92
9	0,00	0,00	42,46	35,98	20,67	22,22
10	0,00	0,00	78,28	81,55	79,44	82,97
11	0,00	0,00	79,03	83,39	77,68	81,61
12	0,00	0,00	88,31	90,86	88,31	90,78
13	0,00	0,00	41,80	33,08	100,00	100,00
14	0,00	0,00	70,05	74,02	93,32	93,55
15	0,00	0,00	87,48	89,82	90,08	90,60
16	0,00	0,00	3,79	4,07	3,79	4,07
17	0,00	0,00	4,55	1,09	4,55	4,92
18	0,00	0,00	13,72	16,45	100,00	100,00
19	0,00	0,00	8,37	10,25	51,76	52,30
20	0,00	0,00	45,25	47,68	96,65	96,81
21	0,00	0,00	9,80	-9,43	31,37	30,19
22	0,00	0,00	41,45	43,15	46,75	48,54
23	0,00	0,00	23,08	53,70	23,08	53,70
24	0,00	0,00	13,73	5,77	23,53	23,08
25	0,00	0,00	76,61	79,75	76,61	80,06
26	0,00	0,00	23,21	18,97	23,21	22,41
27	44,44	45,81	44,44	46,45	45,14	46,45
28	0,00	0,00	88,18	89,62	87,96	89,37
29	0,00	0,00	65,75	70,76	76,76	79,44
30	0,00	0,00	78,79	81,26	77,35	77,57
31	0,00	0,00	89,60	91,49	81,27	83,80
32	0,00	0,00	90,74	79,82	57,49	60,32
33	0,00	0,00	88,20	85,82	80,85	82,11
34	0,00	0,00	76,78	70,80	83,73	85,99
35	0,00	0,00	41,60	22,22	53,60	54,81
36	0,00	0,00	64,52	55,38	64,52	64,62
37	0,00	0,00	60,00	34,15	74,67	75,61
38	0,00	0,00	28,71	29,05	28,71	30,89
39	0,00	0,00	41,35	42,03	30,08	30,43
40	0,00	0,00	27,54	29,73	27,54	29,73
41	0,00	0,00	93,71	91,17	84,29	85,83
42	0,00	0,00	100,00	100,00	52,26	58,12
43	0,00	0,00	2,70	5,44	2,70	0,40
44	0,00	0,00	0,28	2,38	0,39	0,90
45	0,00	0,00	1,26	4,04	1,26	3,85
46	0,00	0,00	2,49	4,49	1,26	3,85
47	0,00	0,00	8,77	8,87	8,77	8,87
48	0,00	0,00	10,81	8,77	24,32	24,56
49	39,53	42,25	43,75	46,34	94,06	94,37
50		0,00		24,00		14,00
51		0,00		13,73		3,92

Pavimentos permeáveis:

Tabela B-5 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos pavimentos permeáveis para o Prado no cenário 1

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)	Caso (ii) - % (TR 2 anos)	Caso (ii) - % (TR 5 anos)
1	15,79	16,95	71,93	91,53
2	41,54	44,44	93,85	94,44
3	37,70	39,39	93,44	93,94
4	23,64	24,14	92,73	91,38
5	77,86	81,58	99,29	99,47
6	29,63	29,59	36,67	36,73
7	15,96	16,00	23,40	23,00
8	16,49	16,52	27,49	27,33
9	9,09	9,23	16,36	16,92
10	0,00	0,00	17,04	16,17
11	72,90	74,29	76,64	77,14
12	35,96	38,10	40,35	41,27
13	43,99	46,59	48,85	51,14
14	80,16	82,81	100,00	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00
17	77,91	80,58	80,23	81,55
18	5,33	7,41	13,33	16,05
19	60,82	59,72	67,89	66,35
20	0,00	0,00	22,22	19,51
21	13,58	12,75	30,86	28,92
22	49,17	49,63	55,56	55,90
23	76,98	77,76	80,05	80,67
24	7,69	8,33	32,69	33,33
25	0,00	0,00	13,45	12,98
26	48,94	50,97	78,01	78,06
27	32,00	33,96	94,00	94,34
28	5,08	37,50	94,92	95,31
29	54,27	56,11	59,30	60,63

Tabela B-6 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos pavimentos permeáveis para Bodocongó no cenário 1

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)	Caso (ii) - % (TR 2 anos)	Caso (ii) - % (TR 5 anos)
1			94,67	95,15
2			98,32	98,40
3			95,54	95,33
4			73,08	74,55

Tabela B-7 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos pavimentos permeáveis para o Prado no cenário 2

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)	Caso (ii) - % (TR 2 anos)	Caso (ii) - % (TR 5 anos)
1	0,00	0,00	11,11	10,77
2	1,25	1,17	8,94	9,00
3	0,00	0,00	6,59	7,37
4	0,57	0,82	8,91	9,02
5	0,36	0,66	7,50	7,64
6	1,01	0,95	9,73	9,78
7	1,45	1,38	7,25	7,59
8	1,03	0,98	9,66	9,84
9	2,02	0,98	9,09	8,82
10	0,00	0,00	7,33	7,37
11	0,81	0,77	10,48	10,00
12	1,18	1,13	9,41	9,60
13	0,56	0,27	11,02	11,29
14	0,92	0,85	10,14	10,19
15	97,06	86,72	100,00	92,55
16	100,00	100,00	100,00	100,00
17	3,77	0,00	5,66	7,14
18	0,44	0,43	12,00	11,97
19	0,34	0,00	9,24	9,27
20	0,00	0,00	7,04	7,17
21	0,34	0,32	8,87	9,06
22	0,37	0,28	10,04	10,25
23	0,39	0,37	11,05	11,15
24	1,27	1,22	13,38	13,41
25	0,00	0,00	43,56	44,04
26	0,98	0,94	10,78	10,80
27	0,00	0,00	8,20	7,94
28	0,00	2,00	14,58	92,00
29	0,00	0,68	10,79	10,96
30	1,09	1,04	13,04	13,54
31	0,00	1,47	12,31	13,24
32	0,00	0,00	12,00	12,10
33	1,35	1,30	13,51	14,29
34	1,54	0,00	9,23	8,96
35	0,00	0,00	9,28	9,90
36	1,75	1,69	7,02	6,78
37	0,00	0,00	9,26	3,57
38	0,00	0,00	0,00	35,90
39	0,00	0,00	4,05	8,93
40	0,00	0,00	8,70	8,42
41	0,00	0,00	12,12	11,76
42	0,00	0,00	9,84	11,11
43	0,00	0,00	6,67	6,45
44	2,00	1,96	46,00	47,06
45	0,00	1,18	8,54	8,24
46	1,98	0,96	9,90	9,62
47	1,16	1,12	10,47	10,11
48	1,96	0,00	7,84	9,43
49	0,00	0,00	20,00	19,61

Tabela B-8 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos pavimentos permeáveis para Bodocongó no cenário 2

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)	Caso (ii) - % (TR 2 anos)	Caso (ii) - % (TR 5 anos)
1	89,97	90,62	17,78	17,20
2	96,15	96,08	21,43	26,67
3	90,15	90,46	14,81	16,07
4	41,59	42,44	11,36	11,68
5	21,43	15,07	5,45	14,52
6	38,89	35,71	9,09	16,16
7	8,06	6,98	10,53	12,50
8	48,06	20,14	5,97	40,54
9	20,67	17,46	11,97	17,31
10	78,77	82,19	7,81	8,70
11	77,04	81,11	13,85	14,04
12	87,30	90,19	11,15	9,97
13	46,72	48,87	4,62	2,94
14	72,77	76,95	4,55	5,08
15	86,89	87,90	3,94	2,01
16	3,79	1,36	5,91	8,72
17	4,55	6,56	5,36	3,51
18	16,44	17,47	2,93	2,78
19	11,89	12,55	3,00	3,11
20	46,92	47,88	4,15	5,59
21	13,73	15,09	2,27	2,22
22	34,70	35,28	8,49	10,42
23	23,08	24,07	40,00	39,02
24	13,73	5,77	6,82	14,29
25	76,61	67,03	15,00	49,05
26	23,21	5,17	9,30	25,45
27	0,69	45,16	49,65	11,76
28	87,50	89,12	10,85	9,34
29	67,30	62,88	6,32	29,50
30	0,00	77,56	78,25	4,02
31	79,89	82,42	5,68	7,51
32	57,49	44,90	15,38	38,68
33	82,20	81,70	-4,04	3,24
34	78,43	81,27	5,93	6,30
35	44,80	45,93	8,70	8,22
36	32,26	33,85	2,38	0,00
37	65,33	65,85	0,00	3,57
38	28,71	12,23	2,78	23,34
39	24,06	24,64	5,94	5,77
40	27,54	24,32	6,00	12,50
41	63,14	52,36	9,30	43,97
42	52,26	46,60	8,11	27,45
43	2,70	29,51	2,29	6,65
44	0,64	25,57	1,05	2,54
45	1,26	5,51	3,67	7,48
46	3,31	2,89	4,09	0,28
47	3,40	33,92	2,22	10,44
48	11,71	11,40	5,10	4,95
49	38,28	40,99	5,06	5,25
50		6,00		25,53
51		23,53		5,13

Jardins de chuva:

Tabela B-9 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos jardins de chuva para o Prado no cenário 1

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)
1	5,26	3,39
2	49,23	51,39
3	34,43	36,36
4	40,00	39,66
5	76,43	80,53
6	35,19	35,37
7	23,40	23,00
8	15,46	19,82
9	18,18	16,92
10	14,81	14,37
11	74,77	74,29
12	44,74	46,03
13	49,36	51,59
14	80,16	80,86
15	100,00	100,00
16	100,00	98,98
17	80,23	80,58
18	16,00	18,52
19	86,67	87,80
20	96,83	97,56
21	100,00	100,00
22	66,87	67,38
23	84,14	84,45
24	25,00	25,00
25	0,00	0,00
26	49,65	37,42
27	32,00	33,96
28	35,59	37,50
29	51,26	56,11

Tabela B-10 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos jardins de chuva para Prado no cenário 2

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)
1	0,00	0,00
2	84,62	78,67
3	5,49	5,26
4	62,64	62,57
5	63,57	63,79
6	13,42	13,56
7	15,22	15,17
8	41,03	35,08
9	81,82	82,35
10	27,11	24,21
11	12,10	12,31
12	10,00	10,17
13	8,19	6,99
14	55,30	48,62
15	60,46	49,93
16	15,22	0,00
17	0,00	0,00
18	23,11	23,50
19	48,57	49,36
20	70,89	71,30
21	65,19	53,72
22	40,18	38,87
23	37,23	38,94
24	14,65	14,02
25	0,00	2,89
26	10,78	8,45
27	0,00	0,00
28	0,00	0,00
29	0,00	2,05
30	82,61	82,29
31	16,92	17,65
32	10,00	9,55
33	22,97	23,38
34	9,23	8,96
35	8,25	8,91
36	19,30	20,34
37	9,26	10,71
38	13,33	12,82
39	0,00	0,00
40	28,26	28,42
41	7,58	7,35
42	0,00	0,00
43	5,00	4,84
44	42,00	19,61
45	0,00	1,18
46	68,32	68,27
47	6,98	4,49
48	23,53	24,53
49	30,00	29,41

Tabela B-11 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação dos jardins de chuva para Bodocongó no cenário 2

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)
1	89,97	90,62
2	96,43	96,61
3	90,15	90,46
4	58,85	57,98
5	21,43	21,92
6	38,89	40,26
7	8,06	8,53
8	48,06	87,77
9	20,67	22,22
10	79,44	82,97
11	77,68	81,61
12	88,31	90,78
13	100,00	100,00
14	95,79	95,70
15	90,22	90,72
16	3,79	4,07
17	4,55	4,92
18	100,00	100,00
19	51,76	52,30
20	74,45	75,23
21	31,37	30,19
22	42,89	44,72
23	23,08	24,07
24	23,53	23,08
25	80,90	82,57
26	30,36	29,31
27	45,14	66,45
28	87,96	89,38
29	73,15	63,15
30	77,47	77,66
31	76,78	79,66
32	58,86	61,45
33	81,10	82,31
34	83,73	85,99
35	53,60	54,81
36	64,52	64,62
37	74,67	75,61
38	28,71	30,89
39	30,08	30,43
40	27,54	29,73
41	64,86	72,07
42	52,26	58,12
43	2,70	0,40
44	0,53	2,75
45	1,26	3,85
46	6,61	1,14
47	2,22	1,07
48	24,32	24,56
49	43,75	46,34
50	-	0,00
51	-	31,37

Combinação de medidas compensatórias:

Tabela B-12 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação da combinação de medidas para Prado no cenário 2

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)
1	95,24	95,38
2	98,96	98,04
3	95,60	95,79
4	99,71	99,73
5	100,00	100,00
6	27,52	25,87
7	43,48	42,07
8	99,31	99,34
9	95,96	96,08
10	76,19	73,68
11	91,13	91,54
12	81,76	80,23
13	60,17	36,83
14	100,00	97,88
15	100,00	36,20
16	55,18	7,42
17	100,00	85,71
18	95,11	94,02
19	95,97	95,37
20	100,00	100,00
21	100,00	100,00
22	64,92	55,41
23	36,33	11,70
24	100,00	100,00
25	92,42	92,42
26	95,10	96,71
27	95,08	82,54
28	91,67	96,00
29	89,93	89,73
30	98,91	98,96
31	98,46	98,53
32	98,67	98,09
33	100,00	100,00
34	87,69	86,57
35	93,81	94,06
36	92,98	93,22
37	87,04	87,50
38	85,33	84,62
39	87,04	85,71
40	94,57	94,74
41	86,36	86,76
42	81,97	82,54
43	70,00	69,35
44	84,00	84,31
45	85,37	85,88
46	95,05	94,23
47	91,86	92,13
48	86,27	86,79
49	96,00	96,08

Tabela B-13 – Quadro resumo das reduções de escoamento em todos os casos de implantação da combinação de medidas para Bodocongó no cenário 2

Quadras	Caso (i) - % (TR 2 anos)	Caso (i) - % (TR 5 anos)
1	96,21	96,47
2	98,63	98,69
3	92,88	93,19
4	91,59	88,66
5	25,71	27,40
6	44,44	46,10
7	88,71	89,15
8	51,16	52,52
9	83,80	84,13
10	94,36	95,35
11	94,56	93,45
12	87,90	88,86
13	93,44	93,23
14	97,52	87,50
15	77,38	77,72
16	29,86	30,32
17	9,66	9,84
18	73,64	74,23
19	57,27	57,74
20	80,76	81,54
21	90,20	90,57
22	89,88	90,11
23	92,31	90,74
24	96,08	96,15
25	83,43	85,09
26	30,36	29,31
27	93,06	92,90
28	80,27	81,25
29	57,31	60,75
30	62,13	63,24
31	79,93	82,59
32	81,20	82,99
33	78,17	79,59
34	85,56	87,61
35	60,80	61,48
36	50,00	50,77
37	78,67	79,27
38	30,69	32,72
39	79,70	79,71
40	33,33	35,14
41	84,57	88,30
42	89,03	90,58
43	3,03	2,82
44	1,20	0,80
45	0,71	1,62
46	1,65	0,47
47	0,72	0,78
48	29,73	29,82
49	78,28	78,59
50		2,00
51		27,45