



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E
SANITÁRIA**

BÁRBARA BARBOSA TSUYUGUCHI

**MACRODRENAGEM E OCUPAÇÃO DO SOLO NO
MUNICÍPIO DE CAMPINA GRANDE: CARACTERIZAÇÃO,
SIMULAÇÃO E ANÁLISES SISTÊMICAS**

**CAMPINA GRANDE
Fevereiro, 2015**

BÁRBARA BARBOSA TSUYUGUCHI

ÁGUAS URBANAS E OCUPAÇÃO DO SOLO NO MUNICÍPIO DE CAMPINA GRANDE: CARACTERIZAÇÃO, SIMULAÇÃO E ANÁLISES SISTÊMICAS

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: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

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

Prof (a). Dra. Lívia Izabel Bezerra de Miranda

Campina Grande, fevereiro de 2015



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

T882m Tsuyuguchi, Bárbara Barbosa.
Macrodrenagem e ocupação do solo no município de Campina Grande:
Caracterização, simulação e análises sistêmicas / Bárbara Barbosa
Tsuyuguchi. – Campina Grande, 2015.
96 f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2015.

"Orientação: Prof.^a Dr.^a Iana Alexandra Alves Rufino, Prof.^a Dr.^a Livia
Izabel Bezerra de Miranda".
Referências.

1. Sistema de Drenagem. 2. Geotecnologias. 3. Planejamento urbano. I.
Rufino, Iana Alexandra Alves. II. Miranda, Livia Izabel Bezerra. III.
Título.

CDU 631.62(043)

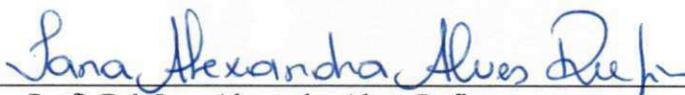
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL-PPGECA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANITÁRIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Bárbara Barbosa Tsuyuguchi

MACRODRENAGEM E OCUPAÇÃO DO SOLO NO MUNICÍPIO DE
CAMPINA GRANDE: CARACTERIZAÇÃO, SIMULAÇÃO
E ANÁLISES SISTÊMICAS

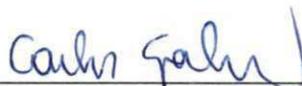
Trabalho apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.



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



Prof.^a. Dr.^a. Livia Izabel Bezerra de Miranda
(Coorientadora – Universidade Federal de Campina Grande)



Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão
(Examinador Interno – Universidade Federal de Campina Grande)



Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza
(Examinador Externo – Universidade Federal de Alagoas)

Campina Grande-PB, 27 de Fevereiro de 2015.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
Yasutoshi e Marlinda

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas infinitas bênçãos derramadas sobre mim.

Aos meus pais, Marlinda e Yasutoshi, pelos valores ensinados através do exemplo, e o apoio incondicional e incessante. Qualquer forma de agradecimento seria incapaz de demonstrar o que significam pra mim. (Amo muito vocês!).

Às minha irmãs Aline, Ana Paula e Carolina, pelo enorme incentivo e por sempre estarem ao meu lado. (Vocês e a Aiko são verdadeiros presentes de Deus). A minha família, Barbosa e Tsuyuguchi, pela ajuda, a proteção, e por dividirem comigo as minhas preocupações e alegrias.

Ao Tayron, pelo carinho e o companheirismo constante, e pelo bem enorme que me faz.

Aos meus padrinhos, tio Dante, tia Zélia e Iolanda pelo apoio mesmo de longe.

A minha orientadora Iana Alexandra, por ter me acompanhado e instruído desde o início da graduação, com paciência e carisma. A minha orientadora Livia pela valiosa ajuda com o desenvolvimento de uma perspectiva urbanista.

Ao professor Carlos Galvão, pelas conversas carregadas de ensinamentos, em meio a brincadeiras e orientações.

Aos professores da graduação em Engenharia Civil e do mestrado, especialmente os mestres da área de Recursos Hídricos, pelos inúmeros conhecimentos transmitidos;

Aos professores Carlos Galvão e Vladimir Caramori, que aceitaram participar da banca examinadora.

Aos colegas e técnicos do laboratório de hidráulica, em especial ao John Elton pela ajuda imensurável e pelas “aulas” que me foram dadas, e ao Hiran e Rodolfo pelo relevante apoio operacional.

Aos amigos da turma de mestrado pelos bons momentos divididos dentro e fora de sala, em especial a turma de recursos hídricos Antônio, Artur, Karla, Pedro, Tayron, Tereza e Ricardo;

A Aline e ao Fábio pela atenção e o suporte matemático sempre acessível.

Aos grandes amigos que fiz na universidade e que com tamanha cumplicidade, se fizeram essenciais pra mim, em especial às queridas Priscylla, Raliny, Renata e Samilly. Aos amigos de Porto Velho pela amizade que se provou forte, ao resistir ao tempo e à distância.

À equipe da Secretaria de Planejamento Municipal (em especial o secretário Márcio Caniello, a coordenadora de planejamento urbano Verônica Ribeiro, os engenheiros Alexandre

Araújo e Cristina Tejo e a equipe GDI) pela disponibilidade em compartilhar dados, informações e conhecimento acerca da cidade, fundamentais à realização desta pesquisa;

À equipe de elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico pelas discussões que contribuíram na montagem deste trabalho;

À CAPES, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

A estreita relação entre a urbanização e o aumento da recorrência de inundações é alvo de diversas pesquisas. Nos últimos anos, o planejamento sensível à água que adota a bacia como unidade de gestão e o incentivo a medidas de baixo impacto tem ganhado espaço nas pesquisas e também, em ritmo mais lento, nas políticas públicas. A avaliação de hidrogramas de cheia e da capacidade de suporte da rede de drenagem frente a diferentes cenários é fundamental por permitir analisar alternativas de projetos e medidas de controle, assim como verificar se a legislação propicia uma ocupação do solo sustentável. Deste modo, neste trabalho foi realizada a delimitação, discretização e caracterização de duas grandes bacias do município de Campina Grande, com o objetivo de verificar possíveis impactos decorrentes dos parâmetros regulatórios contidos na legislação urbanística e ambiental no escoamento dos riachos principais. A metodologia usada abrange a confecção de um Modelo Digital de Elevação da área de estudo, a elaboração de dois cenários de ocupação, a simulação hidrológica para avaliar os hidrogramas de cheia através do pacote computacional IPHS1, e a simulação hidráulica para verificar a capacidade de escoamento do sistema de drenagem, usando os software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) e HEC-GEORAS. Geotecnologias, em especial Sistemas de Informações Geográficas (ArcGIS e TerraView), foram empregadas em todas as etapas, e mostraram-se um ferramental imprescindível ao estudo do espaço. Mapeando a ocupação atual, observa-se a impermeabilização e ocupação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) em sub-bacias mais urbanizadas. A respeito dos instrumentos legais, verifica-se a determinação de poucos índices regulando a ocupação do solo. Alterações no comportamento da hidrógrafa, aumentos de vazão de pico que chegam a 37% e reduções no tempo de máxima de até uma hora, quando comparados os dois cenários, são resultados expressivos. As mudanças das condições de impermeabilização simuladas provocam elevações na lâmina que chegam a 40 cm. Tais análises apontam direcionamentos ao planejamento urbano "sensível" aos Recursos Hídricos e remetem à importância de implementação de medidas legais que regulem a ocupação do solo, assim como da fiscalização contínua de seu cumprimento.

Palavras-chave: sistema de drenagem, geotecnologias, planejamento urbano

ABSTRACT

The close relationship between urbanization and flooding has been intensively studied by several researchers. In recent years, there is such an increase of a water sensitive planning that adopts the basin as management unity and encourages low impact design. So also, but in a slower way, into public policy. To allow analyzing alternative projects and control measures, it is needed flood hydrographs assessment and discharge capacity of the drainage network, through different scenarios as well. Besides that, it is crucial to verify how the current legislation provides a sustainable land use. Thus, this work carried out the delimitation, discretization and characterization of two major basins in the city of Campina Grande, in order to assess possible impacts of regulatory parameters from the urban planning and environmental legislation in the main stream flow. The methodology covers a digital elevation model production of the study area, the development of two occupation scenarios, hydrological simulation to assess the flood hydrograph through the computer package IPHS1, and hydraulic simulation to verify the transport capacity of the drainage system, using the HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) and HEC-GEORAS softwares. Geospatial technologies, particularly Geographic Information Systems (ArcGIS and TerraView), are being used in all methodological steps, and they are coming up to be an indispensable tool to the surface analysis. Mapping current land use makes possible to observe there is places which must be Permanent Preservation Areas (PPAs), helping to manage urban sub-basins. Regarding the legal instruments, there are just a few indices regulating land use. Changes of the hydrograph "behavior", peak flow that increases up to 37% and time to peak reductions up to an hour of time. Comparisons between the two scenarios show impressive results. Changes in the simulated sealing conditions had resulted elevations up to 45 cm of the channel water depth. Those analyzes drive to a water sensitive urban planning and point to the importance of implementing legal measures governing land use, as well as the continuous monitoring of compliance.

Keywords: drainage system, geotechnologies, urban planning

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Efeito da urbanização no hidrograma	14
Figura 3.2 - Ábaco para composição do valor CN para áreas impermeáveis.....	29
Figura 4.1 - Macrozoneamento do município de Campina Grande.	35
Figura 4.2 – A. Zoneamento do Plano Diretor do Município de Campina Grande; B. Rede de riachos, canais e açudes.	36
Figura 4.3 - Gráfico de população total e urbana de Campina Grande – PB.	37
Figura 4.4 Áreas alagadas nos bairros: a) Catolé; b) Bodocongó	37
Figura 4.5 - Gráficos de diferenças entre a altitude obtida por levantamento em campo e as seguintes fontes: a) ASTER; b) Topodata; c) SRTM.	39
Figura 4.6 - Fluxograma da metodologia utilizada no TerraHidro.	40
Figura 4.7 - Primeiro mapa de bacias e drenagem gerada.....	41
Figura 4.8 - Mapa de bacias e fluxos do município de Campina Grande.....	42
Figura 4.9 - Fotografias da bifurcação no canal das Piabas.	43
Figura 4.10 – Discretização das bacias utilizadas no estudo	44
Figura 4.11 – Mapa de localização dos Pontos de Controle.....	46
Figura 4.12 – Chuva de projeto para tempos de retorno de: a)10, b)25, c)50 e d)100 anos.....	47
Figura 4.13 - Esquema de Simulação no IPHS1	49
Figura 4.14 - Fluxograma da metodologia utilizada para cômputo do CN	52
Figura 4.15 - Aspectos considerados na elaboração do cenário de expansão urbana	53
Figura 4.16 - Perfil do Canal de Bodocongó inserido no software HEC-RAS.	55
Figura 4.17 - Perfil do Canal do Prado inserido no software HEC-RAS.	56
Figura 4.18 - Mapeamento de áreas de alagamento e de alto e muito alto risco.....	57
Figura 5.1 - Modelo Digital de Elevação da área de estudo	58
Figura 5.2 – Mapa de declividades da área de estudo	59
Figura 5.3 - Mapa de ocupação do solo do cenário atual.	61
Figura 5.4 - Mapa de grupo de hidrológico do solo das sub-bacias.	62
Figura 5.5 - Mapa de CN atual das sub-bacias.....	63
Figura 5.6 - Mapa de percentual de impermeabilização das sub-bacias	64
Figura 5.7 - Mapa de densidade populacional das sub-bacias.....	65
Figura 5.8 - Overlay de APPs delimitadas sobre imagem aérea	67
Figura 5.9 – Mapeamento das APPs e ZEPs nas bacias em estudo.....	68
Figura 5.10 - Hidrogramas nos Pontos de Controle (Intervalos de tempos Δt versus vazão) na Bacia do Riacho do Prado – Cenários atual e de expansão urbana	70
Figura 5.11 - Hidrogramas nos Pontos de Controle (Intervalos de tempos Δt versus vazão) na Bacia do Riacho de Bodocongó – Cenários atual e de expansão urbana	71
Figura 5.12 – Gráficos de amortecimento da vazão no açude de Bodocongó.....	73
Figura 5.13 – Hidrogramas da bacia B3 para os cenários atual e de expansão urbana	74
Figura 5.14 - Seção transversal do canal de Prado a jusante do PCD 1 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de legislação de expansão urbana.	76
Figura 5.15 - Seção transversal do canal de Prado a jusante do PCD 2 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de legislação de expansão urbana	76
Figura 5.16 - Seção transversal do canal de Prado a jusante do PCD 3 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de legislação de expansão urbana	76

Figura 5.17 - Seção transversal do canal de Prado a jusante do PCD 4 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de legislação de expansão urbana	77
Figura 5.18 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 1 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana	77
Figura 5.19 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 2 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana	77
Figura 5.20 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 3 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana	78
Figura 5.21 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 4 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana	78
Figura 5.22 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 5 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana	78
Figura 5.23 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 6 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana	79
Figura 5.24 - Foto de trecho do Canal de Bodocongó que apresenta armadura exposta.....	80
Figura 5.25 - Mapa de inundação ao longo do riacho principal das bacias.....	81
Figura 5.26 - Áreas críticas ao longo do Riacho do Prado	82
Figura 5.27 - Áreas críticas ao longo do Riacho do Bodocongó.....	83

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 3.1 - Tempo de retorno para projetos de drenagem urbana	16
Tabela 3.2 - Descrição dos grupos hidrológicos do solo.....	29
Tabela 3.3 - Valores de CN para bacias	30
Tabela 4.1 - População dos municípios de Puxinanã, Montadas e Pocinhos	54
Tabela 4.2 - Valores do coeficiente de Manning adotados.....	55
Tabela 5.1 - Quadro resumo dos cenários de ocupação das sub-bacias em estudo.....	60
Tabela 5.2 - Valores de vazão de pico e correspondente tempo de ocorrência para diferentes tempos de retorno.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APPs	Áreas Especiais de Preservação Permanente
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CAD	Computer Aided Design
CN	Curva Número
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Centers River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LID	Low Impact Design
LISP	List Processing
MDE	Modelo Digital de Elevação
MNT	Modelo Numérico de Terreno
PB	Paraíba
PC	Ponto de Controle
PMCG	Prefeitura Municipal de Campina Grande
SEPLAN	Secretaria de Planejamento Municipal
SCS	Soil Conservation Service
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TIN	Triangular Irregular Network
WSUD	Water Sensitive Urban Design
ZEP	Zonas Especial de Preservação

LISTA DE SÍMBOLOS

n_i	Coefficiente de rugosidade de <i>Manning</i>
Δt	Intervalo de duração da chuva
A	Área da seção transversal do canal
A_d	Área de drenagem
C_0, C_1 e C_2	Coefficientes do métodos Muskingum
CN	Curva Número
H	Desnível do talude
i	Intensidade da chuva
I_a	Abstrações iniciais
I_t	Vazão Efluente no tempo t
L	Comprimento do talvegue
P	Precipitação
P_e	Precipitação efetiva
Q	Vazão
Q_t	Vazão afluente no tempo t
R	Tempo de duração da precipitação excedente
S	Potencial de retenção máxima após o início da chuva
S_0	Declividade do talvegue
S_t	Armazenamento no tempo t
t	Duração da chuva
t_c	Tempo de concentração da bacia
t_L	Tempo de resposta da bacia
t_p	Tempo de ocorrência do pico
t_R	Tempo de duração da precipitação excedente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
3	REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1	O PLANEJAMENTO DA DRENAGEM URBANA	13
3.2	A LEGISLAÇÃO URBANA E A OCUPAÇÃO DO SOLO	17
3.3	GEOPROCESSAMENTO APLICADO À CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS: CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS E MAPA DE OCUPAÇÃO	23
3.4	SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	35
4.2	ELABORAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DO TERRENO	38
4.3	DELIMITAÇÃO DE BACIAS E DA REDE DE DRENAGEM	40
4.4	SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA	45
4.4.1	Hietograma de projeto	45
4.4.2	Separação do escoamento	48
4.4.3	Propagação do escoamento	48
4.4.4	Mapa de Ocupação e Cômputo do CN	49
4.4.5	Estudo preliminar da capacidade do sistema de drenagem	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1	A TOPOGRAFIA DAS BACIAS	58
5.2	A OCUPAÇÃO DO SOLO E O PARÂMETRO CN	59
5.3	HIDROGRAMAS DE CHEIA	69
5.4	ANÁLISE PRELIMINAR DA CAPACIDADE DE SUPORTE DO SISTEMA DE DRENAGEM	75
5.4.1	Análise do trecho canalizado	75
5.4.2	Análise dos mapas de inundação	80
5.5	ANÁLISES GERAIS DOS RESULTADOS ENCONTRADOS	83
6	CONCLUSÕES	85
6.1	ANÁLISE DE INCERTEZAS	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1 INTRODUÇÃO

A urbanização é um processo observado a nível mundial. De acordo com estimativas feitas pela Organização das Nações Unidas (UN, 2014) a taxa anual média de crescimento da população urbana no mundo para o intervalo de 2010 a 2015 é de 2,05 %, e os percentuais relativos à população urbana no mundo e no Brasil são de 53,6% e 85,4%, respectivamente.

O crescimento urbano acarreta uma série de impactos sobre o ciclo hidrológico, através do aumento da demanda de água, formação de ilhas de calor, poluição das águas e do destino modificado da água precipitada. Atuando sobre o sistema de drenagem, observa-se o aumento do volume de escoamento e da vazão de pico devido a fatores como a impermeabilização do solo e a canalização e retificação de riachos. Em decorrência, há inúmeros registros de enchentes, inundações e desastres provocados pela insuficiência ou inadequação do sistema de drenagem, além de outras problemáticas ligadas, por exemplo, ao carreamento de sedimentos, redução da recarga hídrica e contaminação da água.

Diante dos prejuízos ao meio ambiente e à vida da população que sofre com as cheias, soluções pontuais e a execução de obras pós-desenvolvimento tem cedido lugar à análise da bacia hidrográfica e ao uso de instrumentos legais e medidas na fonte para planejar o sistema de drenagem nas cidades, conforme tem se verificado através da implementação de planos e leis que ponderam questões associadas ao sistema de drenagem.

O município de Campina Grande, localizado no estado da Paraíba, sofre com problemas de alagamentos com relativa frequência. Observam-se gargalos em diversos pontos do sistema de microdrenagem da cidade. Com o intuito de avaliar o sistema de macrodrenagem no distrito sede do município de Campina Grande e os possíveis impactos de uma ocupação permitida, dois cenários foram elaborados, e através da simulação hidrológica e hidráulica, foi realizada uma análise de mudanças nos hidrogramas e da capacidade de escoamento da rede de macrodrenagem. Para obter, processar, armazenar e visualizar dados de entrada necessários ao estudo, geotecnologias são empregadas em todas as etapas metodológicas.

Salienta-se que este trabalho tem seu desenvolvimento concomitantemente à elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), o qual está sendo viabilizado através de um convênio entre a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e a Prefeitura Municipal de Campina Grande (PMCG). A promulgação da Lei de Saneamento Básico 11.445/2007 vem estabelecer a obrigatoriedade da elaboração do Plano municipal de Saneamento Básico, uma vez que determina que sua existência é condição para validar

contratos de prestação de serviços públicos relativos a: i) abastecimento de água potável, ii) esgotamento sanitário, iii) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e iv) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. (BRASIL, 2007)

Durante todas as etapas de elaboração do PMSB de Campina Grande, a ausência de informações sobre a drenagem no município (cadastro de rede, projetos e *as-built* dos canais da macrodrenagem e medições pluviométricas e fluviométricas) tem dificultado a avaliação da capacidade do sistema e um planejamento eficiente. Desse modo, esta pesquisa também tem um caráter aplicado, ao passo que, simultaneamente auxiliou na formulação de orientações acerca de medidas técnicas a serem implementadas para sanar os problemas diagnosticados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar, à luz da legislação de regulação de uso e ocupação do solo, possíveis impactos da urbanização no sistema de drenagem urbana, realizando uma avaliação preliminar da capacidade de suporte desses sistemas no município de Campina Grande – PB.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Gerar um Modelo Numérico de Terreno (MNT) consistente para a área urbana do distrito sede do Município de Campina Grande e, a partir dele, obter uma discretização de bacias hidrográficas;

Caracterizar sub-bacias de drenagem do município de Campina Grande através da composição de um banco de dados que permita a espacialização de informações topográficas, pedológicas, populacionais e de uso e ocupação do solo, utilizando geotecnologias;

Analisar, de forma sistêmica, relações existentes entre componentes do planejamento da cidade e o sistema de drenagem urbana;

Realizar uma análise preliminar da capacidade de suporte do sistema de drenagem (canais principais) e de possíveis impactos na vazão e na capacidade de suporte do sistema, frente ao crescimento permitido pela legislação urbanística vigente, de modo a subsidiar a elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico e/ou planos diretores de ordenamento territorial.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O PLANEJAMENTO DA DRENAGEM URBANA

O processo de urbanização é acompanhado de adensamento populacional, impermeabilização do solo, retirada de matas ciliares, obstrução e canalização de riachos, e ocupação das margens, levando a mudanças significativas na quantidade e qualidade das águas pluviais escoadas, assim como na capacidade de escoamento dos canais de drenagem.

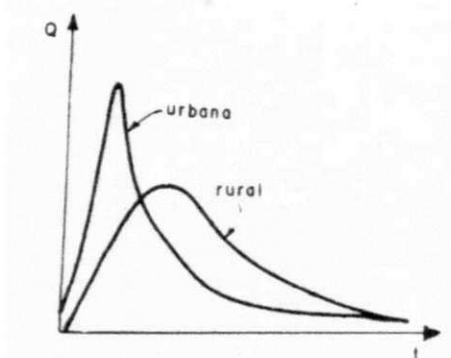
No que diz respeito à qualidade das águas, o crescimento das cidades somado à falta de investimento em saneamento e de conscientização da população, tem ocasionado sérios problemas. Uma das causas das doenças de veiculação hídrica, as quais podem levar a óbito, está ligada ao ambiente e à disposição da água e, portanto, está associada também ao sistema de drenagem: verifica-se, que a ausência de um sistema de esgoto que atenda à população, leva a ligações da rede de esgoto residencial ao sistema de drenagem, lançando-o diretamente nos corpos d'água sem nenhum tratamento prévio, do mesmo modo que o aumento do lixo urbano ao longo do estabelecimento das cidades, junto às falhas nos serviços de coleta, resulta no acúmulo de lixo (Tucci, 2002).

A urbanização também foi acompanhada do aumento de registros de inundações ao redor do mundo. Hora e Gomes (2009) classificam o risco das inundações ocorrentes no município de Itabuna, ao sul da Bahia, e relata eventos calamitosos que resultaram em sérios prejuízos econômicos, desabrigados e perdas de vida. Os autores avaliam os riscos e apesar de observar o alcance destes a áreas consolidadas (densamente ocupadas e com infra-estrutura básica), observa maior impacto nas áreas subnormais (onde é frequente uma ocupação do solo clandestina), devido às condições de moradia dessa parcela da população.

Mendes e Mediondo (2007) fizeram um levantamento histórico do desenvolvimento da Bacia do Gregório na cidade de São Carlos – SP, associando-o ao número de alagamentos registrados. São notados registros anteriores ao crescimento da cidade, e entende-se que a falta de atenção dada a essa característica (“área propícia a alagamento”), no seu planejamento, agravou a problemática. Predominaram, a partir daí, obras de caráter paleativo, alavancadas pelo conceito higienista, cuja preocupação era o afastamento rápido de esgotos e águas pluviais de modo a evitar doenças.

Campana e Tucci (1999) destacam entre as alterações que afetam diretamente a capacidade de suporte do sistema de drenagem, principalmente três elementos: o aumento do pico de vazão de cheia, a diminuição do tempo de concentração das bacias e o aumento do volume escoado. Tais mudanças no hidrograma de cheia podem ser observadas através da Figura 3.1.

Figura 3.1 - Efeito da urbanização no hidrograma



Fonte: Tucci (1993)

Walsh *et al.* (2005) investigam a “síndrome dos rios urbanos” (termo que usa para a degradação ecológica dos rios em área urbana), e ao descrever mudanças hidrológicas, morfológicas, químicas e biológicas nos cursos d’água, apontam a complexidade dos fatores envolvidos e suas interações, e alertam a respeito de generalizações. Os autores analisam, por exemplo, o impacto comprovado do aumento da impermeabilização e da retirada da mata ciliar, e argumentam que as respostas a essas alterações dependem também de outros aspectos: o sistema de drenagem que proporciona o escoamento direto das águas de superfícies impermeáveis para o canal de drenagem reduz os efeitos benéficos da vegetação das margens dos rios, assim como o impacto da impermeabilização do solo varia com a permeabilidade do solo permeável e com a configuração espacial.

Nesse contexto, a revitalização dos rios urbanos é uma alternativa que vem sendo difundida, com o intuito de recuperar, ao menos em parte, suas condições naturais. O gerenciamento destes espaços é uma questão complexa devido aos múltiplos interesses, demandas, e usos das suas águas, além da diversidade de leis que atuam sobre a temática, mas diante desta necessidade diagnosticada e do potencial de adaptação das cidades, mostra-se um desafio improrrogável cuja solução depende da gestão integrada dos recursos hídricos. (LEVIN-KEITEL, 2014; Rezende *et. al.*, 2013).

Durante muito tempo, foi promovida a ideia de que a função da drenagem urbana se resumia a proporcionar o escoamento das águas pluviais por dutos e canais para outra área, a fim de evitar alagamentos, o que, em vez de solucionar o problema, apenas o transferia para uma região mais a jusante (TUCCI, 1997). A retificação de riachos, por exemplo, tornou-se uma prática bastante comum, mas a investigação de seus impactos tem levado à substituição desta medida por outras alternativas que possam ser conciliar o ambiente urbano e apreocupação com a preservação dos rios. (Cardoso e Baptista, 2011).

Atualmente, é censo comum que o manejo adequado da drenagem depende de um planejamento holístico, não pontual. Para efetivar esta abordagem, é necessário reforçar a importância da figura da bacia hidrográfica. A lei de saneamento 11.445/ 2007 (PMCG, 2007) tem entre suas diretrizes a “*adoção da bacia hidrográfica como unidade de referência para o planejamento de suas ações*” (BRASIL, 2007).

A bacia é definida para uma determinada seção de curso d’água, e corresponde à área cujo escoamento contribui para tal seção, conhecida por exutório. (MARTINS, *et al.*; 2010) As bacias superficiais naturais são delimitadas pela topografia do terreno, de modo que são margeadas por divisores topográficos e tem suas águas escoando para este único ponto. As bacias urbanas podem ter seus limites modificados pela infraestrutura de drenagem, mas também sofrem elevada influência do relevo. A respeito do escoamento, por exemplo, é possível descrever claras relações entre características topográficas da bacia e do fluxo das águas pluviais, como a relação declividade *versus* velocidade (VILLELA E MATTOS, 1975).

Existem diversas análises que apontam como um correto reconhecimento das bacias é de suma importância aos estudos dos recursos hídricos (MACHADO, 2012; EPA, 2005), visto que as diferentes etapas do ciclo hidrológico podem ser melhor compreendidas e mensuradas quando temos seus limites definidos. Entende-se, portanto, que o planejamento da drenagem urbana de forma eficiente depende de uma delimitação e caracterização consistente das sub-bacias, assim como da avaliação das mudanças ocorridas ou previstas nas mesmas, para identificar as causas e formas de controle.

Diferentes critérios (assim como a combinação deles) podem ser utilizados na discretização de bacias, que consiste na delimitação de unidades hidrológicas cujo comportamento pode ser bem descrito; sendo que usualmente, a topografia, a rede de drenagem e pontos onde a vazão é ou deve ser conhecida são utilizados para delimitar as sub-bacias. (HINGRAY, *et al.*, 2014). Desse modo, para realização de estudos mais aprofundados, são

feitas discretizações diferenciadas, até encontrar a que melhor se adequa às necessidades de maior detalhamento.

Medidas estruturais e não estruturais devem ser compatibilizadas a fim de evitar que inundações causem danos à população e ao ambiente. As estruturais referem-se às obras de retenção, confinamento, desvio e escoamento das águas mais rápido e em menores níveis, como barragens e canais, enquanto as medidas não estruturais não fazem uso de estruturas para alterar o regime de escoamento, mas do planejamento e de instrumentos legais, e tem o objetivo de minimizar os impactos causados pela ação antrópica, de modo a aproximar a resposta do meio alterado àquela que ocorre em condições naturais. (PMSP, 1998).

As obras de drenagem são dimensionadas, definindo-se um determinado risco, através da análise de frequência das inundações, dos custos de investimentos e dos prejuízos aceitos, havendo valores diferenciados para os sistemas de micro e macrodrenagem, visto a dimensão dos problemas observados nas duas escalas (PMPA, 2005). Esse dimensionamento é realizado estipulando-se o tempo de retorno (TR) da cheia que a estrutura deve suportar, que é o inverso da probabilidade “P” deste evento ser igualado ou superado (TUCCI, 1993). Os valores de TR usualmente adotados estão apresentados na Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Tempo de retorno para projetos de drenagem urbana

Sistema	Característica	Intervalo TR (anos)	Valor frequente (anos)
Microdrenagem	Residencial	2 – 5	2
	Comercial	2 – 5	5
	Áreas de prédios públicos	2 – 5	5
	Aeroporto	5-10	5
	Áreas comerciais e Avenidas	5 – 10	10
Macrodrenagem		10 – 25	10
Zoneamento de áreas ribeirinhas		5 – 100	100

Fonte: PMPA, 2005

Entretanto, tem-se verificado em diferentes cidades, com frequência, falhas que apontam a insuficiência da rede diante de eventos hidrológicos com tempos de retorno inferior aos usualmente utilizados (OLIVEIRA e GUASSELLI, 2011; NÓBREGA, 2012). Isso se deve não somente ao aumento do escoamento provocado pela impermeabilização, mas também à implementação do sistema de drenagem de forma desarticulada, havendo, por exemplo, a execução de obras em desacordo com o projeto, ou até mesmo, diante da inexistência do

mesmo. Essa é uma das razões para a falta de registro de redes de drenagem, atividade esta que compete primeiramente aos órgãos administrativos municipais. E tais práticas se repetem também devido à necessidade dessa informação para elaborar diagnósticos e traçar ações.

Algumas abordagens foram desenvolvidas com o intuito de projetar o sistema de drenagem de forma mais sustentável e diminuir os gastos com execução de grandes obras, como Water Sensitive Urban Design (WSUD) e Low Impact Design (LID), que propõem medidas como: adaptar projetos à topografia natural, de modo a não modificar o percurso natural da drenagem; conservar a capacidade de infiltração no lote ou na bacia, através de trincheiras e bacias de retenção; pensar sistemas de aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis como forma de uso racional da água e redução do volume de água escoado, etc. (COOMBES, P. J. *et al.*, 2000; SOUZA, *et al.*; 2012).

Dietz e Calusenb (2007) comparam escoamento e concentração de poluentes medidos em uma bacia que se desenvolveu do modo tradicional, e outra que fez uso de técnicas de baixo impacto, concluindo que o uso destas pode reduzir bastante os prejuízos ambientais usualmente causados. Burns *et al.* (2010) fazem uso de simulações hidrológicas para investigar através de alguns cenários o efeito benéfico do aproveitamento da água de chuva no lote ao manejo do risco de inundações, e encontra bons resultados. Estes autores concluem que podem ser evitados gastos excessivos com obras a partir de reduções da vazão de pico na ordem de 10 a 20%, mas que outras técnicas devem ser associadas a esta para obter vazões similares àquelas do estágio de pré-desenvolvimento.

As medidas não estruturais têm sido incentivadas em detrimento da execução de obras. mas quanto mais tardia for sua implementação, ela se torna mais difícil e menos eficaz. Peplau (2013) elabora um quadro-resumo de legislações municipais brasileiras que tratam do controle da drenagem e observa que a adoção de medidas de menor impacto (medidas na fonte, por exemplo) tem sido requeridas, mas não o suficiente para enquadrar o país como exemplo da abordagem ambiental.

3.2 A LEGISLAÇÃO URBANA E A OCUPAÇÃO DO SOLO

Entre as medidas não estruturais para controle do sistema de drenagem, deve-se destacar o disciplinamento do uso e ocupação do solo, e salientar que a ausência de legislação urbanística que imponha esse controle leva a situações desastrosas (COLOMBO, 2000), o que reforça a

necessidade de amparar legalmente as decisões tomadas em prol de uma solução para alagamentos, assim como o inverso: amparar tecnicamente, sob a ótica da drenagem urbana, os instrumentos legais de uso e ocupação do solo elaborados.

A regulação da ocupação do solo no Brasil é uma competência constitucional comum entre a União, os Estados e o Municípios. No entanto, cabe principalmente ao ente municipal, entre outras atribuições, promover: o ordenamento territorial mediante planejamento e controle do uso, o parcelamento e ocupação do solo urbano; a proteção e a responsabilidade por danos ao patrimônio ambiental, histórico e cultural local (MIRANDA, 2015)

Dentre as leis federais que regulam a ocupação do solo no Brasil, podemos citar: a Constituição Federal de 1988, a Lei de parcelamento do solo 6.766/ 79 (BRASIL, 1979), o Código Florestal Lei Nº 12.651/ 2012 (BRASIL, 2012). A Constituição Federal de 1988, confere ao município, no artigo 182, a competência de executar a política de desenvolvimento urbano. Elege, para tanto, o instrumento legal do plano diretor municipal para prever as diretrizes legais dessa política. No capítulo específico sobre política urbana (Título VII, capítulo II, artigos 182 e 183), o texto prioriza, sobretudo, a função social da cidade e da propriedade urbana. O texto constitucional federal, vem sendo regulamentado após 1988 por legislações complementares. No campo da política urbana destacam-se:

- i) A lei 10.257/01 (BRASIL, 2007), denominada Estatuto da Cidade, que regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal e fixou a obrigatoriedade de elaboração de Planos Diretores para cidades onde residem mais de 20 mil habitantes, pertencentes a regiões metropolitanas, sobre impacto de grandes projetos ou situadas em áreas de interesse turístico;
- ii) A lei 11.445/07 (BRASIL, 2007) que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico.¹
- iii) A lei 12.424/11 (BRASIL, 2011) que dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida – (PMCMV) e sobre a regularização fundiária de assentamentos localizados em áreas urbanas. Esta lei alterou um conjunto de legislações que traziam disposições que concernem a regularização fundiária.²

¹ Altera as Leis nos 6.766/79, 8.036/90, 8.666/93, 8.987/95; revoga a Lei 6.528/78.

² Entre elas a Lei no 11.977, de 7 de julho de 2009, as Leis nos 10.188, de 12 de fevereiro de 2001, 6.015, de 31 de dezembro de 1973, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 4.591, de 16 de dezembro de 1964, 8.212, de 24 de julho de 1991, e 10.406, de 10 de janeiro de 2002 - Código Civil; revoga dispositivos da Medida Provisória no 2.197-43, de 24 de agosto de 2001.

A Lei de Parcelamento do Solo foi sancionada em 19 de dezembro de 1979, e depois alterada pela Lei Nº 9.785, de 29 de Janeiro de 1999 (BRASIL, 1999). Objetiva disciplinar o parcelamento do solo urbano, indicando as exigências relativas à elaboração do projeto de loteamentos, as áreas que não são passíveis de parcelamento, a infraestrutura básica necessária ao parcelamento e as exigências para apresentação do projeto para aprovação junto à Prefeitura Municipal, ou Distrito Federal. Um dos parâmetros mais importantes para o planejamento sensível aos recursos hídricos diz respeito ao percentual mínimo de áreas públicas exigido no loteamento (compostas, segundo esta lei, por "*áreas destinadas a sistemas de circulação, a implantação de equipamento urbano e comunitário, e a espaços livres de uso público*"). No seu Artigo 4º, a Lei Nº 9.785/ 99 concedeu ao município a decisão de definição ou não deste índice, antes estipulado em 35%, deixando que ela seja tomada com base nas características e necessidades da região.

Outra referência sensível ao sistema de drenagem ocorre no Artigo 3º da mesma lei, ao não permitir o parcelamento: "*I - em terrenos alagadiços e sujeitos a inundações, antes de tomadas as providências para assegurar o escoamento das águas;*" e "*V - em áreas de preservação ecológica ou naquelas onde a poluição impeça condições sanitárias suportáveis, até a sua correção.*" (Grifo nosso) (BRASIL, 1999).

O Código Florestal também instituiu parâmetros importantes na preservação dos sistemas naturais de drenagem, ao proteger as margens de cursos d'água, lagos e reservatórios ao especificá-las na delimitação de Areas de Preservação Permanente, no seu Artigo 4º (BRASIL, 2012):

Art. 4o Considera-se Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei:

I - as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de: (Incluído pela Lei nº 12.727, de 2012).

a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;

b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;

c) 100 (cem) metros, para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;

d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;

e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros;

II - as áreas no entorno dos lagos e lagoas naturais, em faixa com largura mínima de:

a) 100 (cem) metros, em zonas rurais, exceto para o corpo d'água com até 20 (vinte) hectares de superfície, cuja faixa marginal será de 50 (cinquenta) metros;

b) 30 (trinta) metros, em zonas urbanas:

III - as áreas no entorno dos reservatórios d'água artificiais, decorrentes de barramento ou represamento de cursos d'água naturais, na faixa definida na licença ambiental do empreendimento; (Incluído pela Lei nº 12.727, de 2012).

IV - as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d'água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, no raio mínimo de 50 (cinquenta) metros; (Redação dada pela Lei nº 12.727, de 2012)."

As faixas marginais de cursos d'água, lagos e reservatórios devem ser protegidas para garantir a preservação das suas calhas. Existe, entretanto, um elevado déficit no que diz respeito às APPs (Sparovek *et al.*, 2013). A aplicabilidade do Código Florestal em áreas urbanas mostra-se difícil diante das formas predatórias de ocupação do solo que se tem observado nas cidades (descontroladas, assentamentos irregulares, ausência de fiscalização ambiental). O Controle da urbanização em APPs é de suma importância, visto que, figura como um contrapeso à enorme impermeabilização dos assentamentos. Por isso, sua flexibilização é discutida, como por exemplo, através do uso dessas áreas com a implantação de infraestrutura que garanta a preservação da cobertura vegetal e atividades ao ar livre (ARAÚJO, 2002). Esta ideia ganha espaço, ao considerar ainda que em alguns momentos, devido ao estágio de urbanização já alcançado, intervenções na calha dos riachos parecem inevitáveis. (SOUZA, 2012).

No municipal, as condições legais para o planejamento sensível aos recursos hídricos, podem ser observadas especialmente a partir dos parâmetros estabelecidos nas legislações em vigor. Há uma gama de leis, que podem orientar a ocupação do solo, salientando o processo participativo que tem trazido a discussão dos planos à população, e atribui à sociedade um papel ativo na sua formulação. Alguns exemplos são planos diretores, a lei de uso e ocupação do solo, lei de parcelamento do solo, código de posturas, código de obras e o plano municipal de saneamento básico. Os instrumentos legais reguladores do uso e ocupação do solo, de um modo geral, devem fazer uso de índices de ocupação e restrições legais para impedir a impermeabilização total do solo nas áreas urbanizadas, por questões relacionadas à drenagem, mas também paisagismo e bem-estar da população. Os planos diretores devem propor zoneamentos para os quais são definidas diretrizes diferenciadas, de modo a organizar de forma sustentável o crescimento da cidade.

Em termos de planejamento da drenagem urbana, Belo Horizonte e Porto Alegre despontam. O município de Belo Horizonte foi precursor nesta abordagem estabelecendo medidas legais relativas ao controle da drenagem no seu Plano Diretor em 1996 (PMBH, 1996). O Plano Diretor de Drenagem Urbana do município e o Programa DRENURBS, de recuperação ambiental, são exemplos de avanços importantes na relação entre o homem e os cursos d'água. (PMBH, 2010; BONTEMPO et al., 2012).

Porto Alegre tem muitas pesquisas já desenvolvidas (CAMPANA e TUCCI, 1999; CAMPANA e TUCCI, 2001; OLIVEIRA e GUASSELLI, 2011). Fatores atenuantes para isso são os desastres provocados por cheias vivenciados no município e a notória atuação da academia neste aspecto. Além de ter um Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental, tem seu Plano Diretor de Drenagem Urbana em estágio avançado, com subprodutos disponibilizados aos órgãos administrativos e à população em geral.

No município de Campina Grande – PB, ainda há uma legislação de uso e ocupação do solo que contempla poucos índices urbanísticos. Os trabalhos de Bonates (2009), Queiroz *et al.*, (2011) e Silva *et al.* (2013) demonstram as incongruências, sobreposições e ausência de instrumentos de uso e ocupação do solo regulamentados na legislação urbanística do município. Esta realidade torna preocupante o suporte da infraestrutura de drenagem, além das demais, frente a uma ocupação desordenada.

As leis que vigoram em Campina Grande acerca da ocupação do solo são: o Plano Diretor Participativo Municipal - Lei Complementar Nº 003, de 09 de Outubro de 2006 - (PMCG, 2006), o Código de defesa do Meio Ambiente - Lei Complementar Nº 042 de 24 de Setembro de 2009 - (PMCG, 2009) e o Código de Obras - Lei Nº 4130, de 07 de agosto de 2003 - (PMCG, 2014). 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. Trata em seu capítulo IV do Saneamento Ambiental Integrado, e a seção IV refere-se especificamente ao Manejo de Águas Pluviais e Drenagem Urbana. Nele, é descrito o objetivo de “*gerenciamento da rede hídrica no território municipal, visando ao equilíbrio sistêmico de absorção, retenção e escoamento das águas pluviais*” (Art. 114). Faz a exigência de projeto de absorção e retenção para empreendimentos com área superior a 5 mil m^2 , e para lotes com impermeabilização superior a 50%; requer sistema que garanta a drenagem de 30 l/m^2 por hora de área impermeabilizada. Além disso, remete-se à necessidade de elaboração do Plano Setorial de Macrodrenagem, que até o momento não foi elaborado.

O Código do Meio Ambiente do município, Artigo 46, requer, no mínimo, 35% da gleba para áreas públicas, e faculta ao município a escolha de 15% das áreas públicas. Este código determina, em seu Artigo 14, que nas Zonas Especiais de Preservação (ZEP), a ocupação do solo é vedada, com exceção das edificações que tenham o propósito de servir de manutenção e apoio para as mesmas, e as enumera:

*“§ 1º - As Zonas Especiais de Preservação compreendem:
I - corpos d'água e entorno do Açude Velho, Mata do Louzeiro e Riacho das Piabas, Açude de Bodocongó e suas nascentes, Riacho de Bodocongó e Açude José Rodrigues, no Distrito de Galante;
II - reserva florestal de São José da Mata;
III - Parque Evaldo Cruz;
IV - Parque da Criança;
V - área destinada ao Jardim Botânico Aluisio Campos;
VI - demais praças, áreas verdes e açudes que vierem a ser incorporados.”*

E, a respeito da interferência antrópica sobre os cursos d'água, o código municipal estabelece:

*“Art. 97 - A eliminação ou a canalização de redes pluviais e as alterações do curso das águas, somente poderão ser autorizadas pelo Município.
Parágrafo Único - Nenhum cidadão poderá proibir ou dificultar o escoamento normal das águas através de canalização, valas, sarjetas ou outros meios, deteriorando-os ou provocando danos às mesmas.”*

O Código de Obras teve sua última versão sancionada em 2013. Ele estabelece índices urbanísticos como taxa de ocupação e índice de aproveitamento por zona, assim como limites mínimos de recuos e afastamentos. A densidade populacional não é limitada. A taxa de permeabilidade (TP), definida no Artigo 248, é *“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”*, e é estabelecida em 20%.

Observa-se que é possível apontar na legislação iniciativas de regular a ocupação de modo a propiciar o bom funcionamento do sistema de drenagem e a segurança da população quanto a cheias, mas por vezes de forma superficial, de modo que há muito a avançar na integração entre drenagem e planejamento urbano.

3.3 GEOPROCESSAMENTO APLICADO À CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS: CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS E MAPA DE OCUPAÇÃO

O geoprocessamento é a ciência que estuda a informação aliada a sua coordenada geográfica, e auxilia de tal forma a caracterização do espaço, que está presente praticamente em todos os estudos de planejamento. Entre as suas aplicações em estudos de drenagem urbana, estão a extração de características físicas (TAKED *et al.*, 2013), mapeamento de uso e ocupação do solo (DAMS, *et al.*, 2011; BLASCHKE e KUX, 2005) e cadastro das informações espaciais, associadas a mapas temáticos (Colombo, 2000; MAKROPOULOS *et al.*, 1999).

São diversas as geotecnologias empregadas, entre as quais destacam-se o Sistema de Informação Geográfica (SIG) e as técnicas de sensoriamento remoto. O SIG é um sistema computacional que contém ambiente, estrutura e ferramentas que facilitam a extração, armazenamento, processamento e visualização de dados. Devido a essas funções, este sistema representa um grande avanço na agilidade e precisão na coleta dessas informações, mostrando-se uma ferramenta excelente em qualquer análise que dependa de variáveis espaciais ou espacializadas.

Os Sistemas de Informações Geográficas permitem a entrada de dados espaciais, e associados a eles, atributos diversos. Os dados espaciais são classificados em vetorial e raster, de acordo com a sua representação. O dado vetorial é representado por vetores, compostos pelo par de coordenadas geográficas (ponto), ou por dois ou mais pontos ordenados e interligados (linhas ou polígonos), e tem a informação associada a estas feições, enquanto o dado raster (ou matricial) é representado através de uma matriz $M(n, m)$, cujas linhas (n) e colunas (m) definem células, conhecidas pelo termo inglês (pixels), e cada célula armazena um valor z referente a determinado tema (FITZ, 2010)

É possível, assim, a composição de um banco de dados de grande utilidade, disponível em ambiente propício à análise da superfície terrestre e dos processos que nela ocorrem, através de sobreposição de camadas de informações, e seu manuseio. A fim de contribuir com a etapa inicial de elaboração do Plano Diretor de Drenagem Urbana, Becker (2006) compôs uma metodologia usando um Sistema de Informação Geográfica para cadastrar e organizar as informações relacionadas à micro e macrodrenagem, gerar mapas temáticos e calcular precipitação e vazão. Por fim, para verificar o procedimento metodológico descrito, usou como área de teste a Bacia do Bom Retiro do Município de Joinville.

Os SIGs também têm sido bastante utilizados para geração de MNTs. O Modelo Numérico de Terreno (MNT) é uma representação contínua da distribuição de um fenômeno geográfico (FITZ, 2010). O uso de MNTs (cada vez mais disponíveis e com melhores resoluções espaciais) tem favorecido a difusão da análise quantitativa da superfície da terra, a qual é fundamental para diversas aplicações (BARBOSA, 2012). Sua representação pode ser através de grades regulares ou *triangular irregular network* (TIN), e como uma das formas de obtenção do MNT, existe a possibilidade de interpolação de dados (como curvas e pontos) por diferentes métodos (MIRANDA, 2005)

Inúmeros estudos hidrológicos utilizam o MNT de elevação da superfície, denominado Modelo Digital de Elevação (MDE), devido a sua influência nos diversos processos, em especial, o escoamento, o que ressalta a importância de garantir maior acurácia no mesmo para um estudo de drenagem, assim como incentiva o uso das ferramentas de geoprocessamento nesta tarefa.

A delimitação de bacias por muito tempo foi realizada utilizando-se técnicas manuais de traçado e observação visual do técnico sobre uma topografia representada. Por isso, uma delimitação mais coerente dependia fortemente da interpretação do analista. Entretanto com o avanço das técnicas computacionais, em especial aquelas relacionadas ao geoprocessamento, algumas ferramentas despontaram e se mostram de grande auxílio ao analista na realização dessa tarefa. Há diferentes algoritmos para definir, a partir do MDE, direções de escoamento, geralmente utilizando o critério de maior declividade, e a partir daí é possível delimitar bacias de forma automática, assim como a definição da rede de drenagem (BUARQUE, *et al.*, 2009). SIGs como o Terra View (INPE, 2014) e o ArcGIS 10.1® (ESRI, 2014) tem sido empregados em pesquisas diversas (LIMA *et. al.*, 2012; PIRES *et. al.*, 2005) e diante das possibilidades de análises hidrológicas avançadas nos mesmos, algumas ferramentas com especificidades nesta questão têm sido desenvolvidos paralelamente, para funcionar utilizando estas plataformas (TerraHidro³ e ArcHydro⁴, respectivamente).

³ TerraHidro é um plugin do TerraView, desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para tratamento de modelos hidrológicos distribuídos. (ROSIM, 2003)

⁴ ArcHydro é uma extensão do software ArcGIS, desenvolvida por um trabalho conjunto da indústria, governo e academia, para permitir análises hidrológicas através de ferramentas que auxiliam na modelagem e tomada de decisão (Maidment, 2002).

O Sensoriamento Remoto é o termo utilizado para a obtenção de informação do meio à distância através de sensores ópticos e faz uso da radiação eletromagnética. Sensores podem, por exemplo, estar situados a bordo de satélites artificiais (entre eles, Landsat, CBERS, GeoEye) e aeronaves, e são classificados em ativos, por emitir energia, como os radares, ou passivos, captando energia refletida produzida por outras fontes como o Sol. (FLORENZANO, *et al.*, 2011)

Os conceitos de resolução espacial, temporal, radiométrica e espectral são importantes à compreensão das potencialidades dos produtos provenientes do sensoriamento remoto. Jensen (2005) apud Weng (2010) fornece uma descrição clara e, de forma resumida, temos:

- i) Resolução espacial é a medida da distância mínima entre dois objetivos que permite diferenciá-los em uma imagem;
- ii) Resolução espectral do sensor refere-se ao número e tamanho das bandas;
- iii) Resolução radiométrica refere-se à sensibilidade do sensor à radiância captada;
- iv) Resolução temporal refere-se ao tempo que o sensor demora para tornar a imagear o mesmo ponto;

A etapa de captura é seguida do processo de interpretação de imagens, atividade esta que demanda conhecimentos técnicos e trabalho de campo. Técnicas de processamento digital de imagens são utilizadas para facilitar a visualização, e auxiliar no reconhecimento de padrões e em tarefas de classificação.

Exemplos de missões que fizeram uso de radar, a bordo de satélites artificiais, mundialmente utilizadas, são Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e Space Shuttle Radar (ASTER). Elas produziram um MDE da superfície da Terra, com resolução espacial de 30 m e 90m, respectivamente. O projeto Topodata (Valeriano, 2008) faz um refinamento do MDE gerado pelo SRTM por krigagem, que resulta em um modelo com resolução espacial de 30 m. Apesar da resolução espacial não ser a ideal para estudos de menor escala, são imprescindíveis por, às vezes, ser a única fonte de dados disponível.

O uso de Sensoriamento Remoto também é útil ao monitoramento e gerenciamento do processo de ocupação do solo, e programas espaciais, como o Landsat, fornecem gratuitamente produtos que vem sendo aplicados em pesquisas nesta linha. Os satélites da série Landsat produzem imagens da superfície terrestre de média resolução espacial desde a década de 1970, e permitem a observação do espalhamento da mancha urbana, devido à longa série temporal.

Entretanto, diante da imensa variedade de materiais que compõem as superfícies no meio urbano e, por consequência, da dificuldade que existe em mensurá-las, algumas formas para identificar as diferentes coberturas e calcular suas respectivas áreas, com maior precisão, foram desenvolvidas, tais como técnicas de classificação subpixel (DENG e WU, 2013; VERBEIREN *et al.*, 2013) e de vetorização (LECHIU *et al.*, 2010).

Voorde *et al.* (2011) usou imagens de média resolução para avaliar a morfologia da cobertura impermeabilizada de Dublin, Ireland, através de um processamento sub-pixel utilizando um mapa de referência de cobertura do solo de alta resolução.

A informação de uso do solo é um dos principais dados de entrada nos diversos modelos existentes para prever escoamento, de forma direta ou indireta, através de algum parâmetro necessário à simulação. A escolha do(s) mapa(s) de uso do solo a subsidiar tais estudos depende, dentre outros aspectos, do foco da análise, da dimensão das sub-bacias e das taxas de ocupação. (Branger *et al.*, 2013). A informação de uso do solo em maior resolução permite, por exemplo, a avaliação da impermeabilização em nível de lote, como no estudo realizado por GAROTTI e BARBASSA (2010).

Grande importância foi atribuída ao Cadastro Técnico Multifinalitário (CTM) na gestão das cidades. O CTM consiste, de forma resumida, da base de dados das unidades territoriais do município, havendo as feições associadas a informações diversas, de modo a atender diferentes usuários, o que potencializa a utilidade e atualização do banco de dados. Desse modo, melhorias na base cartográfica foram promovidas nos últimos anos por programas de governo, que podem ser aproveitadas nas pesquisas que contribuam para o melhor desenvolvimento e planejamento das cidades. Salienta-se, entretanto, que inconsistências na base de dados podem levar a conclusões errôneas, e por isso deve ser utilizada com o devido cuidado, observando aproximações e realizando correções possíveis, através de ferramentas disponíveis e verificações *in situ*.

3.4 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

Os modelos hidrológicos mostram-se uma notável ferramenta para investigar os impactos causados pela urbanização sobre o ciclo hidrológico, assim como os efeitos de medidas compensatórias a serem aplicadas. Em face aos avanços computacionais, há hoje também uma variedade de modelos (entre os quais, alguns serão descritos neste trabalho), que

permitem realizar simulações hidrológicas a fim de prever vazões e avaliar o sistema de drenagem urbana como um todo.

O Manual de Drenagem de Porto Alegre, como parte do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Município, contempla orientações, diretrizes, parâmetros e metodologias para os projetos de drenagem no município. Nele, está descrita a relevância da simulação hidrológica frente a diferentes cenários: *“identificar se o sistema tem capacidade de comportar os acréscimos de vazão gerados pela evolução urbana de cada cenário”*.

HUONG e PATHIRANA (2013) utilizam um conjunto de modelos para averiguar e também comparar os efeitos das mudanças climáticas e da urbanização sobre as inundações, usando imagens de duas datas e combinando diferentes cenários, em uma cidade do Vietnã. Uma forte influência conjunta é, realmente, constatada, através das simulações, e os autores reconhecem na falta de um sistema de drenagem adequado a oportunidade de planejá-lo considerando alterações previstas causadas pelos dois fatores, e investindo tanto em soluções tradicionais como também nas mais inovadoras.

Garcia (2007) aplica o software Storm Water Management Model (SWMM) da United States Environmental Protection Agency (US EPA), em uma bacia hidrográfica urbana monitorada, e descreve a análise das interferências das modificações do uso e ocupação do solo sobre os hidrogramas de cheias como *“essenciais para elaboração de diretrizes que conduzam a bacia hidrográfica a um desenvolvimento sustentável”*. Nóbrega (2012) fez uso do mesmo software para estudar os efeitos da urbanização sobre o sistema de drenagem no bairro Catolô do município de Campina Grande, e verificar as respostas a diferentes medidas de controle.

De acordo com Tucci (2002), a determinação do hidrograma de máxima cheia de projeto de uma bacia hidrográfica depende de dois componentes principais: a separação do volume de escoamento superficial e a propagação deste volume para jusante (Tucci, 2002).

O pacote computacional IPHS1 é empregado em diversas pesquisas que investigam questões relacionadas ao escoamento e à capacidade do sistema (ARAGÃO, 2013; CRUZ e TUCCI, 2007; MARTINS, 2004), e inclusive tem planos diretores aplicando e incentivando seu uso (GDF, 2009; GEP, 2002). O IPHS1 foi desenvolvido pelo Instituto de pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2003) e contém os módulos “bacia” e “rio”. No primeiro, permite-se calcular o hidrograma e são disponibilizados algoritmos que representam a transformação de chuva em vazão em cada sub-bacia. No segundo, diferentes

versões do método de Muskingum (TUCCI, 1993) podem ser utilizadas para propagar escoamento em canais, e o método de Puls (PULS, 1928) em reservatórios.

Alguns métodos foram desenvolvidos para separar a parcela da chuva que escoar, entre os quais estão o método CN (Curva Número) do Soil Conservation Service (SCS, 1986), Horton, Green e Ampt e IPH II. O método Curva Número (CN) do Soil Conservation é amplamente empregado (MAIDMENT, 1992) devido à simplicidade da sua aplicação, que requer poucos parâmetros. Nagarajan e Poongothai (2012) fazem uso de sensoriamento remoto e SIG para aplicar o método CN e obter dados de vazão diários para uma bacia não instrumentada e, na etapa de validação, verifica boa aplicabilidade do modelo. Os autores usam o mapeamento do CN das sub-bacias para identificar áreas onde as medidas de controle devem ser primeiro implementadas.

O método CN consiste em um procedimento desenvolvido pelo SCS para particionar a lâmina d'água precipitada em abstrações iniciais, retenção e chuva efetiva, através da equação 3.1, determinada empiricamente:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (3.1)$$

Onde P_e é a precipitação excedente (*mm*), P é a precipitação acumulada total (*mm*), I_a é a soma das abstrações iniciais e S é o potencial de retenção máxima após o início da chuva.

Através de estudos em bacias agrícolas, observou-se, empiricamente, a relação apresentada na equação 3.2. A combinação entre as equações 3.1 e 3.2 nos remete à equação 3.3, que apenas é válida para $P \geq 0,2S$. Quando $P < 0,2S$, P_e é igual a 0.

$$I_a = 0,2 \quad (3.2)$$

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad (3.3)$$

O potencial S está relacionado à cobertura do solo através da equação 3.4, onde CN é o parâmetro Curva Número:

$$S = \frac{1000}{CN - 10} \quad (3.4)$$

A curva número (CN) é o parâmetro usado para estimar a máxima retenção possível do solo. Seu valor depende de fatores como tipo e uso do solo, cobertura vegetal e condição de umidade antecedente, e é estabelecido através de tabelas e ábacos (SCS, 1986). Neste método,

os diferentes tipos de solo são classificados em grupos hidrológicos, denominados A, B, C e D, de acordo com a permeabilidade e taxas de infiltração, conforme Tabela 3.2 .

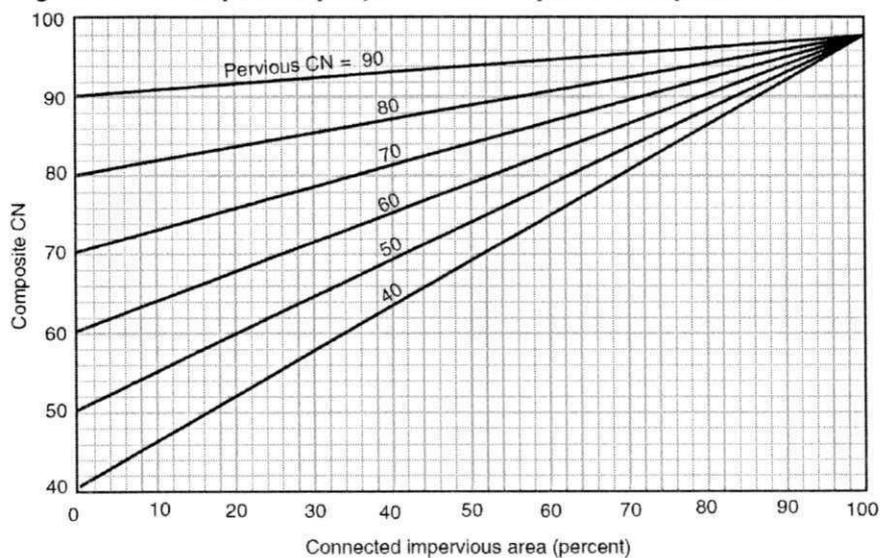
Tabela 3.2 - Descrição dos grupos hidrológicos do solo

Grupos de solo	Características do solo
Solo A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.
Solo B	Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média.
Solo C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo.
Solo D	Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Fonte: Tucci (1993)

Os valores de CN tabelados para as classes de uso do solo na área urbana, encontram-se na Tabela 3.3. Os valores de espaços abertos e zonas (comerciais, industriais e residenciais) tabelados são obtidos considerando que as áreas permeáveis são equivalentes a pastos em boas condições; e que as áreas impermeáveis tem CN igual a 98 e são diretamente conectadas ao sistema de Drenagem. Para percentuais não estipulados na tabela e/ ou condições diferentes das áreas permeáveis, pode-se usar o ábaco da Figura 3.2.

Figura 3.2 - Ábaco para composição do valor CN para áreas impermeáveis



Fonte: SCS (1986)

Tabela 3.3 - Valores de CN para bacias

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

Fonte: Tucci (1993)

Alguns métodos permitem gerar o hidrograma de cheia, a partir da precipitação efetiva e de características da bacia, entre os quais o Método do Hidrograma Triangular Unitário do SCS, desenvolvido por Victor Mockus (SCS, 1985). O método utiliza um hidrograma unitário adimensional, cuja forma representa a média de um elevado número de hidrogramas unitários de bacias de diferentes características. (Tucci, 1993)

Para o cálculo da vazão de pico e do tempo para sua ocorrência, por este método, foram estipuladas as relações descritas através das equações 3.5, 3.6 e 3.7:

$$t_p = \frac{t_R}{2} + t_L \quad (3.5)$$

$$t_L = 0,6 t_C \quad (3.6)$$

$$Q_{u,p} = \frac{2,08 A_d}{t_p} \quad (3.7)$$

Onde t_p é o tempo de ocorrência do pico, em horas; t_R , o tempo de duração da precipitação excedente, em horas; t_L , o tempo de resposta da bacia, em horas; t_c , o tempo de concentração da bacia, em horas; A_d , a área de drenagem, em km^2 e $Q_{u,p}$ a vazão de pico, em m^3/s .

O tempo de concentração, necessário ao cômputo do hidrograma, conforme equação 6, é o tempo necessário para que a gota d'água proveniente do ponto mais remoto da bacia chegue ao exutório e, portanto, o tempo para que toda bacia esteja contribuindo à seção de controle. Entre as fórmulas disponibilizadas para cálculo do tempo de concentração, a equação de Kirpich (Equação 3.8) está descrita abaixo (Tucci, 1993):

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (3.8)$$

Onde t_c é o tempo de concentração (min); L , o comprimento do talvegue (m); e H o desnível do talvegue (m).

O hidrograma total de um dado evento pode ser construído por meio da soma dos hidrogramas parciais obtidos para cada bloco de chuva excedente (correspondente a cada intervalo de tempo Δt), obtendo-se assim o hidrograma final para dada precipitação (Canholi, 2005).

Para verificar a propagação da onda de cheia para jusante, existem alguns métodos que permitem calcular o amortecimento do hidrograma em reservatórios e canais, de modo que a partir do hidrograma afluente na seção de montante, obtêm-se o hidrograma efluente. O Modelo Muskingum Cunge pode ser usado para a propagação em canais e o Método de Puls para propagação em reservatório. A expressão discretizada da equação da continuidade, utilizada por ambos, encontra-se abaixo (Equação 3.9):

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} \quad (3.9)$$

Onde:

S_t, S_{t+1} = armazenamento nos tempos t e $t+1$

I_t, I_{t+1} = vazão afluente nos tempos t e $t+1$

Q_t, Q_{t+1} = vazão efluente nos tempos t e $t+1$

Para aplicação do Método de Puls, a relação entre armazenamento e vazão é obtida considerando-se a linha d'água no reservatório. Da relação cota-volume e cota-vazão pode-se obter a curva de armazenamento S_t em função da vazão de saída Q_t , (Tucci, 1993). A relação cota-volume é determinada pela geometria do reservatório, e a relação cota vazão pode ser dada através da curva-chave do vertedor, ou equações empíricas, fazendo uso ou não de dados experimentais.

O modelo Muskingum Cunge é resultado das sugestões de Cunge aplicadas ao Modelo de Muskingum, quando demonstrou que não existe amortecimento dinâmico neste último. (Tucci, 1993). Muskingum assume que existe uma relação linear entre S , I e Q , descrita pela Equação 3.10.

$$S = K[XI + (1 - X)Q] \quad (3.10)$$

Onde K (o tempo médio de trânsito da onda) e X (o fator de ponderação das vazões, entre 0 e 0,5) são denominados parâmetros de ajuste do canal, sem significado físico preciso, enquanto o modelo Muskingum Cunge permite expressar K e X em termos de características físicas do canal (Canholi, 2005). A combinação das equações 3.9 e 3.10 nos remete à equação 3.11, onde C_0 , C_1 e C_2 são calculados a partir dos parâmetros K e X , através das equações 3.12, 3.13 e 3.14.

$$Q_2 = C_0I_2 + C_1I_1 + C_2Q_1 \quad (3.11)$$

$$C_0 = \frac{\left(\frac{\Delta t}{K}\right) - 2X}{2(1 - X) + \left(\frac{\Delta t}{K}\right)} \quad (3.12)$$

$$C_1 = \frac{\left(\frac{\Delta t}{K}\right) + 2X}{2(1 - X) + \left(\frac{\Delta t}{K}\right)} \quad (3.13)$$

$$C_2 = \frac{2(1 - X) - \left(\frac{\Delta t}{K}\right)}{2(1 - X) + \left(\frac{\Delta t}{K}\right)} \quad (3.14)$$

Posteriormente, Cunge desenvolveu as versões do modelo Muskingum Cunge linear e Muskingum Cunge não linear com planície de inundação. Este último demonstra representar melhor a propagação onde o armazenamento na planície de inundação é significativo. (PONTES, 2011).

Mulungu (2012) analisa a partir dos cenários de ocupação do solo nos anos de 1999 e 2007, na bacia do campus da UFSC, SC, através de hidrogramas de cheia gerados no HEC-HMS e da avaliação da capacidade de escoamento do Canal do Rio do Meio usando o software HEC-RAS, usando as vazões de pico do hidrograma e considerando o escoamento permanente em regime subcrítico. O autor constatou um aumento da vazão de pico de 27% para um aumento da área construída de 15%.

Ribeiro e Lima (2012) fazem uso do HEC-GEORAS para gerar o mapa de inundação em uma Bacia Urbana do município de Juiz de Fora - MG, e utilizar o modelo numérico de terreno, inserindo-o como dado geométrico no HEC-RAS e, a partir da informação de uso do solo atribuir às calhas e planícies de inundações, os respectivos valores dos *coeficientes de Manning*. Tais procedimentos possibilitaram mapear as áreas atingidas pelas cheias dos rios de diferentes tempos de retorno (TR), verificando-se que áreas densamente ocupadas são atingidas, e que da área total de aproximadamente 80 ha, 6,74 ha de área urbana sofre com inundação provocada por chuvas com TR de 5 anos.

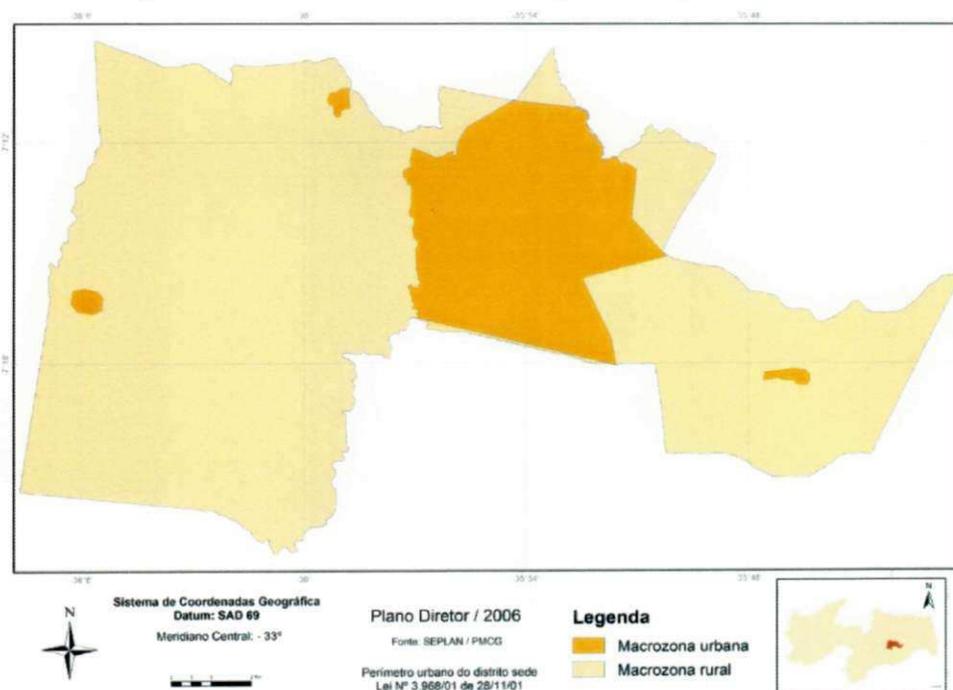
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Campina Grande localiza-se na região do agreste paraibano, a $7^{\circ}13'32''$ de latitude Sul e a $35^{\circ}52'38''$ de longitude oeste. É composto por quatro distritos (São José da Mata, Galante, Catolé de Boa Vista e Sede), totalizando uma área de aproximadamente 594 km². Situa-se na Bacia do Rio Paraíba, e seu distrito sede é cortado pela divisa entre as regiões do Médio e Baixo Rio Paraíba.

A Revisão do Plano Diretor do município (PMCG, 2006) traz o zoneamento urbano, cujo mapeamento é apresentado na Figura 4.1. O perímetro urbano, delimitado pela Lei 3968/01 de 28 de novembro de 2001 (PMCG, 2001), é a área de interesse deste estudo e tem aproximadamente 110 km². Haja vista que a bacia hidrográfica é a unidade de gestão dos recursos hídricos, o alvo é expandido para a mancha urbana e seus arredores.

Figura 4.1 - Macrozoneamento do município de Campina Grande.

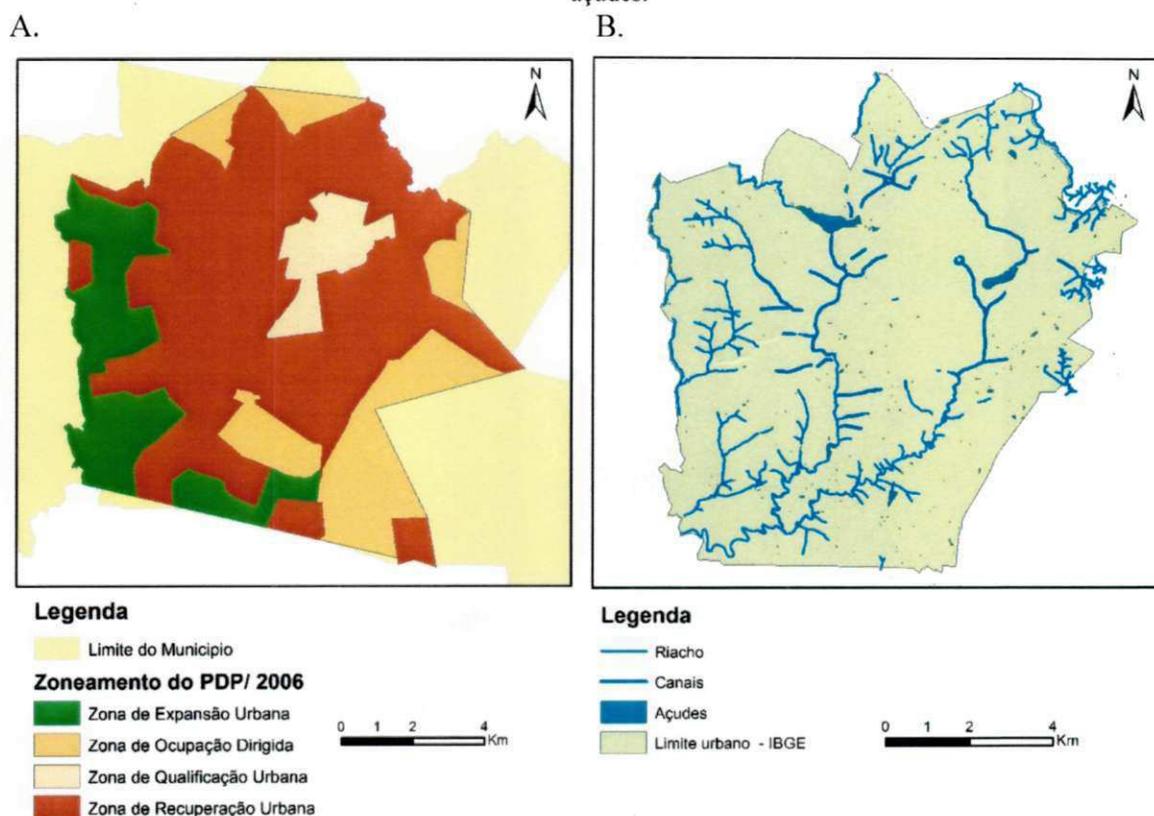


Fonte: PMCG (2006)

O Plano Diretor divide ainda a área urbana em quatro zonas, e as caracteriza informando a respeito de infraestrutura instalada e algumas tendências de ocupação. Apresentadas na Figura 4.2A, são elas: Zona de Qualificação Urbana, Zona de Ocupação Dirigida, Zona de

Recuperação Urbana e Zona de Expansão Urbana. Dentro da área delimitada pelo perímetro urbano, uma região de aproximadamente 90 km² é hoje segmentada em 50 bairros, cujos setores o IBGE considera como tipo urbano nos seus levantamentos. A rede de riachos, canais e açudes, dentro do limite urbano fornecido pelo IBGE, pode ser visto na Figura 4.2 B.

Figura 4.2 – A. Zoneamento do Plano Diretor do Município de Campina Grande; B. Rede de riachos, canais e açudes.



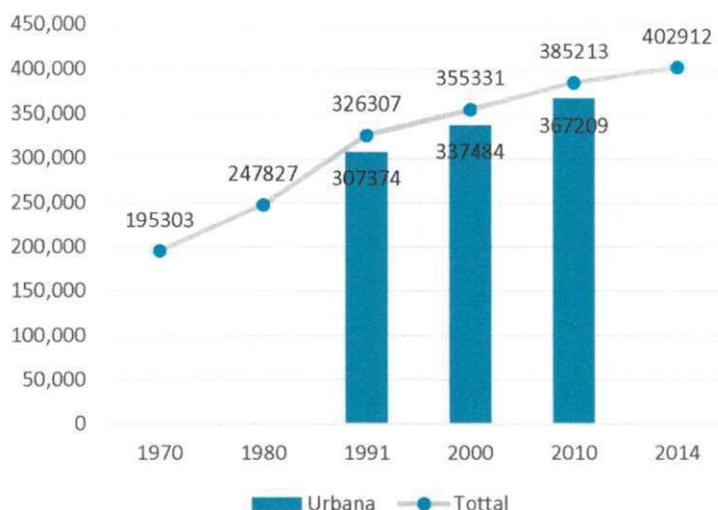
Fonte: a) PMCG (2006); b) Adaptado de SEPLAN (2014)

De acordo com dados demográficos, mostrados na Figura 4.3, nos últimos 40 anos, a população praticamente dobrou, e teve taxa de crescimento populacional urbano de aproximadamente 18% entre 1991 e 2010 (IBGE, 2010). Esse crescimento levou ainda à verticalização da cidade, principalmente em bairros como o Centro, o Catolé e a Prata, cujo adensamento resultante provoca grandes impactos sobre a infraestrutura urbana (ARAÚJO, 2012).

Entre os impactos causados, pode-se visualizar facilmente os problemas no sistema de drenagem. Nóbrega (2012) apontou problemas de insuficiência da rede de drenagem em um bairro do município. No ano corrente, a Defesa Civil já noticiou o mapeamento de 44 pontos de alagamentos (JPB, 2014), entre os quais alguns são classificados de médio a alto risco à

população. Na Figura 4.4, encontram-se algumas áreas da cidade onde foram diagnosticados problemas relacionados a alagamentos.

Figura 4.3 - Gráfico de população total e urbana de Campina Grande – PB.



Fonte: IBGE (Censos Demográficos 1991/2000/2010)

Figura 4.4 Áreas alagadas nos bairros: a) Catolé; b) Bodocongó



Fontes: a) PEREIRA, 2014; b) Adaptado de MARACAJÁ, 2011.

Apesar de serem previstos projetos de ampliação e reforma de canais da cidade, sabe-se que é de igual importância o controle da impermeabilização que tem ocorrido de forma desenfreada. Ainda, alguns estudos já realizados comprovam que há a contribuição do sistema de esgoto sanitário ao sistema de drenagem. (GOMES, 2013; MELO FILHO, 2014).

Para uma análise mais detalhada do ponto de vista da macrodrenagem, duas bacias do município, Bacia do Riacho do Prado e Bacia do Riacho de Bodocongó, serão investigadas com maior profundidade e serão devidamente caracterizadas a partir dos dados levantados.

4.2 ELABORAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DO TERRENO

O município de Campina Grande conta com um levantamento planialtimétrico para uma área do distrito sede. Esta digitalização foi realizada pela ATECEL/UFCG e tem sido utilizada em várias pesquisas, por ser este o último levantamento topográfico efetuado para a cidade inteira (área urbana). Esta topografia também tem sido utilizada pelas concessionárias de serviços de infra-estrutura para projeto e dimensionamento de redes. Há dois subprodutos gerados a partir deste: a) Curvas de nível com equidistância de 2 m, em formato compatível com programas CAD (Computer Aided Design); e b) Aproximadamente 5.000 pontos cotados, em formato shapefile (formato nativo do software ArcGIS, comumente utilizado em diferentes SIGs), gerados por Cordão (2009), obtidos a partir de uma rotina em linguagem LISP (Autodesk), que rodava internamente ao sistema CAD e associava a informação de texto (cotas) para uma feição próxima. Tal rotina possibilitou a obtenção rápida de um alto volume de dados, mas trouxe também diversos erros, devido à proximidade de informações.

O arquivo de curvas de nível de 2 em 2 m existentes para uma área do município, em formato CAD, foi convertido para o formato *shapefile*. Foram realizadas edições das feições e inseridas as cotas como atributo de cada curva, uma vez que o texto dos valores não estava associado ao elemento gráfico, e apenas tinha função de leitura. Foram encontradas inconsistências no produto e subprodutos citados, mas a partir deles foi iniciado um processo exaustivo de correção dos dados, através do método comparativo. A observação dos erros abrangeu a refação de MDEs, visto que o formato raster permitia melhor visualização de topografias não existentes no município.

Uma vez que o levantamento em campo não abrangia a totalidade da área de interesse, a fim de solucionar a ausência deste no entorno, foi realizado um estudo para verificar qual das seguintes fontes de informação altimétrica melhor se ajustava aos dados de campo: (i) ASTER (ASTER, 2009); (ii) SRTM (MIRANDA, 2005); (iii) Topodata (Valeriano, 2004).

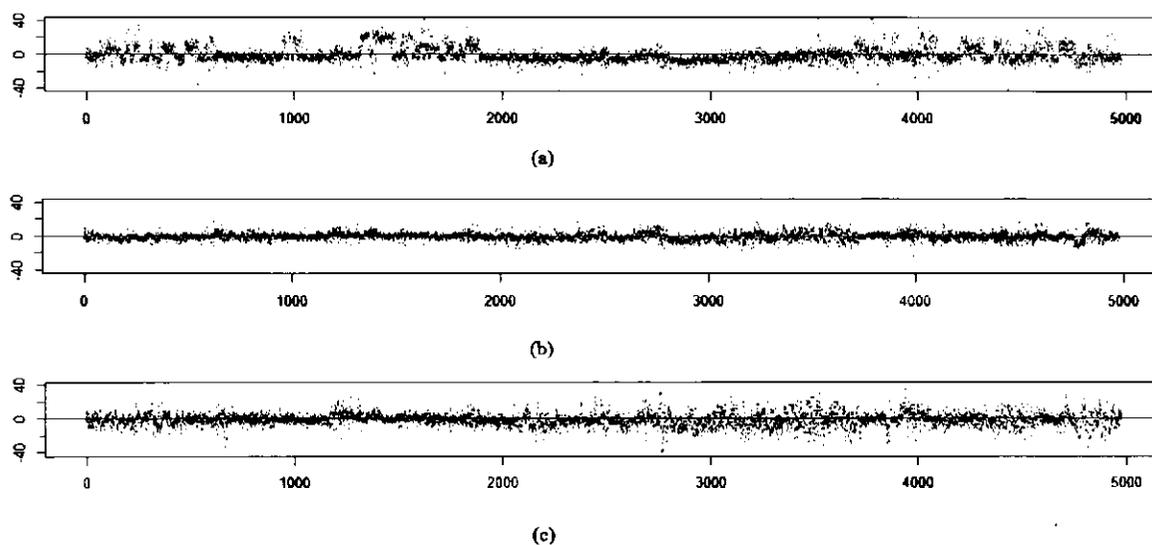
Para cada ponto cotado foram extraídos os valores de altitude dos pixels referentes às coordenadas dos mesmos das três fontes ($Altitude_{ASTER}$, $Altitude_{SRTM}$ e $Altitude_{Topodata}$, respectivamente), e calculadas as diferenças entre os valores extraídos e o valor medido através do levantamento ($Altitude_{lev}$) em cada ponto, conforme as Equações 4.1 a 4.3. Os resultados estão plotados nos gráficos a seguir (Figura 4.5), gerados utilizando o software estatístico livre R (R Core Team, 2014).

$$Dif_{ASTER} = Altitude_{ASTER} - Altitude_{lev}. \quad (4.1)$$

$$Dif_{Topodata} = Altitude_{Topodata} - Altitude_{lev}. \quad (4.2)$$

$$Dif_{SRTM} = Altitude_{SRTM} - Altitude_{lev}. \quad (4.3)$$

Figura 4.5 - Gráficos de diferenças entre a altitude obtida por levantamento em campo e as seguintes fontes: a) ASTER; b) Topodata; c) SRTM.



Fonte: Próprio autor

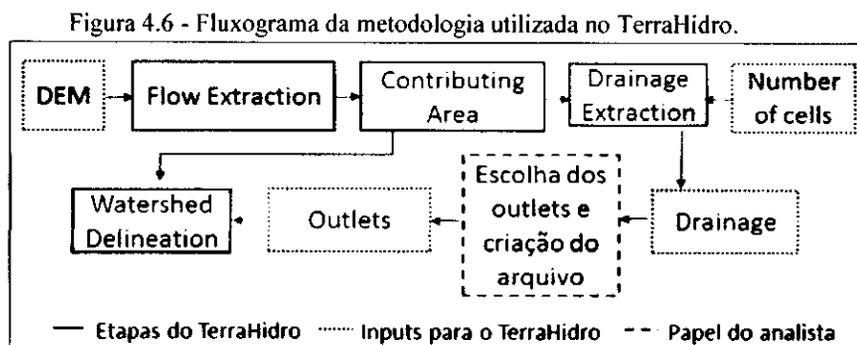
A partir da análise dos gráficos, foi possível concluir que o MDE do Projeto Topodata melhor representa a área em estudo. Foram, então, criados pontos ao redor da área para a qual temos o levantamento altimétrico, espaçados a cada 50 m, e para estes, foram extraídos a altitude dos pixels referentes, e unidos aos pontos já cotados anteriormente (arquivo *shapefile*).

Entre os interpoladores disponíveis nos SIGs em questão, optou-se por gerar o MDE utilizando o *Topo to Raster* do software ArcGIS 10.1 devido a sua peculiaridade de receber arquivos com diferentes formas vetoriais: as curvas de nível, os pontos cotados e ainda os açudes, inseridos como lagos. A resolução espacial utilizada foi de 10 m.

Topo to Raster é técnica de interpolação iterativa com diferenças finitas que apresenta vantagens significativas para obtenção de um modelo mais hidrológicamente correto, entre elas: quando utiliza curvas de nível (como neste trabalho), o algoritmo gera primeiro uma morfologia generalizada da superfície, baseando-se na curvatura do contorno, e o *input* de lagos é utilizado de modo a obter dentro área demarcada (polígono) valores de altitude equivalentes ou inferiores ao mínimo dos valores encontrados na superfície de contorno. (ESRI, 2014).

4.3 DELIMITAÇÃO DE BACIAS E DA REDE DE DRENAGEM

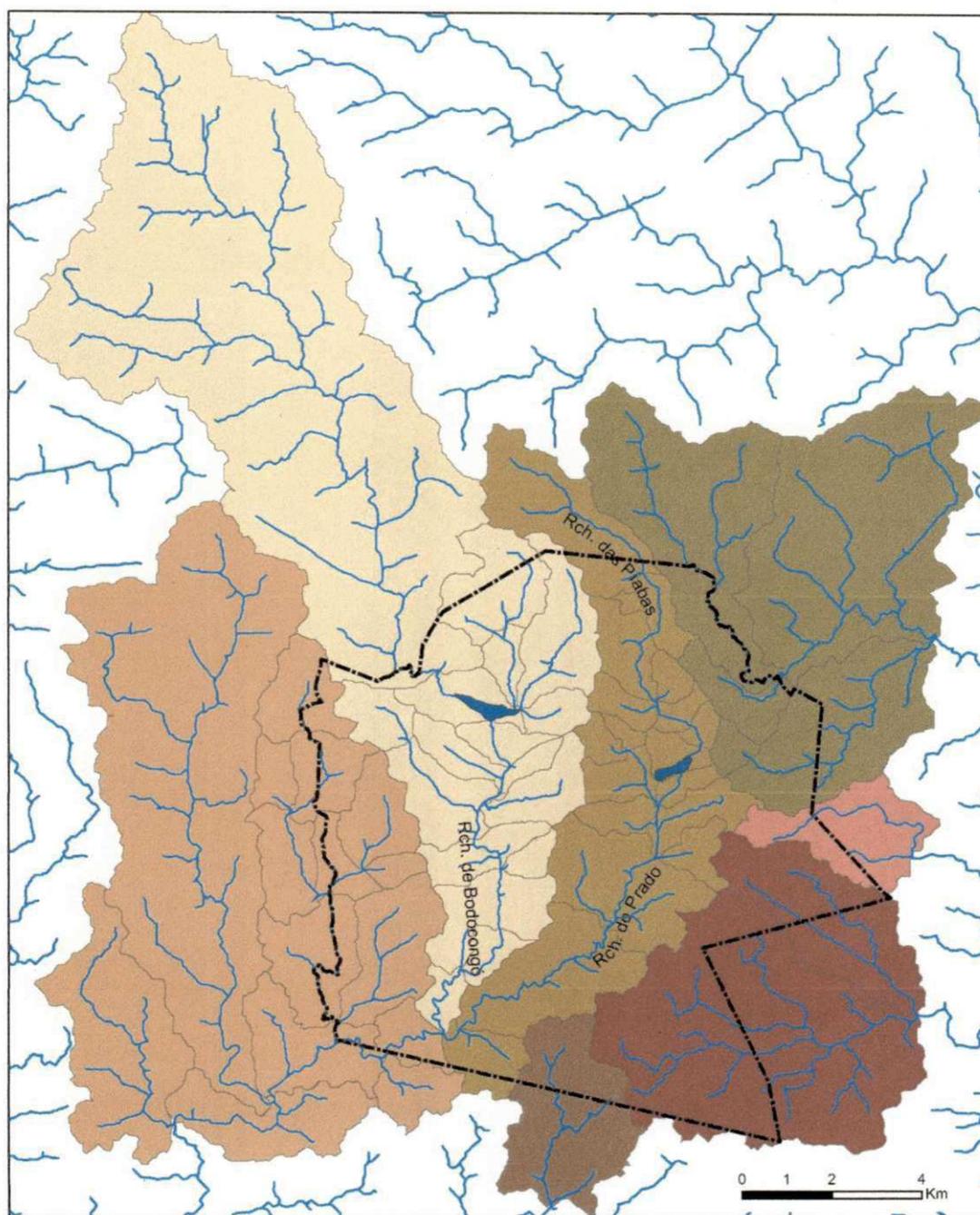
Utilizando a plataforma computacional TerraHidro (ROSIM, 2003), foi realizado o procedimento de delimitação semiautomática de bacias e rede de drenagem. A metodologia está descrita no fluxograma da Figura 4.6.



Fonte: Próprio autor

Para esta pesquisa, houve o resgate e digitalização de projetos de alguns canais de macro drenagem junto à Secretaria de Planejamento (SEPLAN) de Campina Grande. O mapa de sub-bacias do município também foi fornecido pela SEPLAN. Ambos foram imprescindíveis ao entendimento do sistema e das interferências antrópicas sobre o mesmo. Entretanto, a indefinição de limites de algumas sub-bacias de interesse neste estudo reforçaram a necessidade desta etapa. Os estudos iniciais de discretização das bacias se basearam na comparação entre as sub-bacias geradas (Figura 4.7) e aquelas delimitadas no mapa da prefeitura (Figura 4.8), que muito se assemelharam, validando, assim, o método usado. Uma diferença significativa, entretanto, foi observada e investigada através de mapas de drenagem da área e visitas *in loco*. De acordo com a rede de drenagem gerada a partir do MNT, nos estudos iniciais (Figura 4.7), as águas da Bacia do Riacho das Piabas desaguiariam no Açude Velho (localizado na sub-bacia D2, cuja localização pode ser vista na Figura 4.10). Entretanto, de acordo com a interpretação do mapa de bacias e de direção de fluxos da prefeitura, essas águas são levadas para leste por meio de um canal.

Figura 4.7 - Primeiro mapa de bacias e drenagem gerada.

**Legenda**

Açudes principais	Canais	Bacias delimitadas	B	D	F	N
Perímetro Urbano de CG	Rede de drenagem	A	C	E	G	

Fonte: Próprio autor

Figura 4.8 - Mapa de bacias e fluxos do município de Campina Grande



Fonte: PMCG (2014)

O mapa oriundo do estudo de classificação do solo, realizado pela SUDENE (SUDENE, 1972), cuja escala permite identificar os drenos naturais, aponta que, de fato, em condições naturais, o fluxo ocorria conforme representado pela drenagem obtida. Em campo, foi observada uma bifurcação no canal que drena as águas do Riacho das Piabas (Figura 4.9), sendo que no trecho entre a bifurcação e o açude, havia água parada, e as águas escoavam com certa velocidade no outro trecho. Foi observada uma mureta que impede o fluxo que se encaminharia para o açude, mas não foi informado se é a única intervenção existente até o momento e se, no caso de eventos de chuvas maiores, o fluxo sobrepõe barreiras existentes.

Figura 4.9 - Fotografias da bifurcação no canal das Piabas.



Fonte: Próprio autor

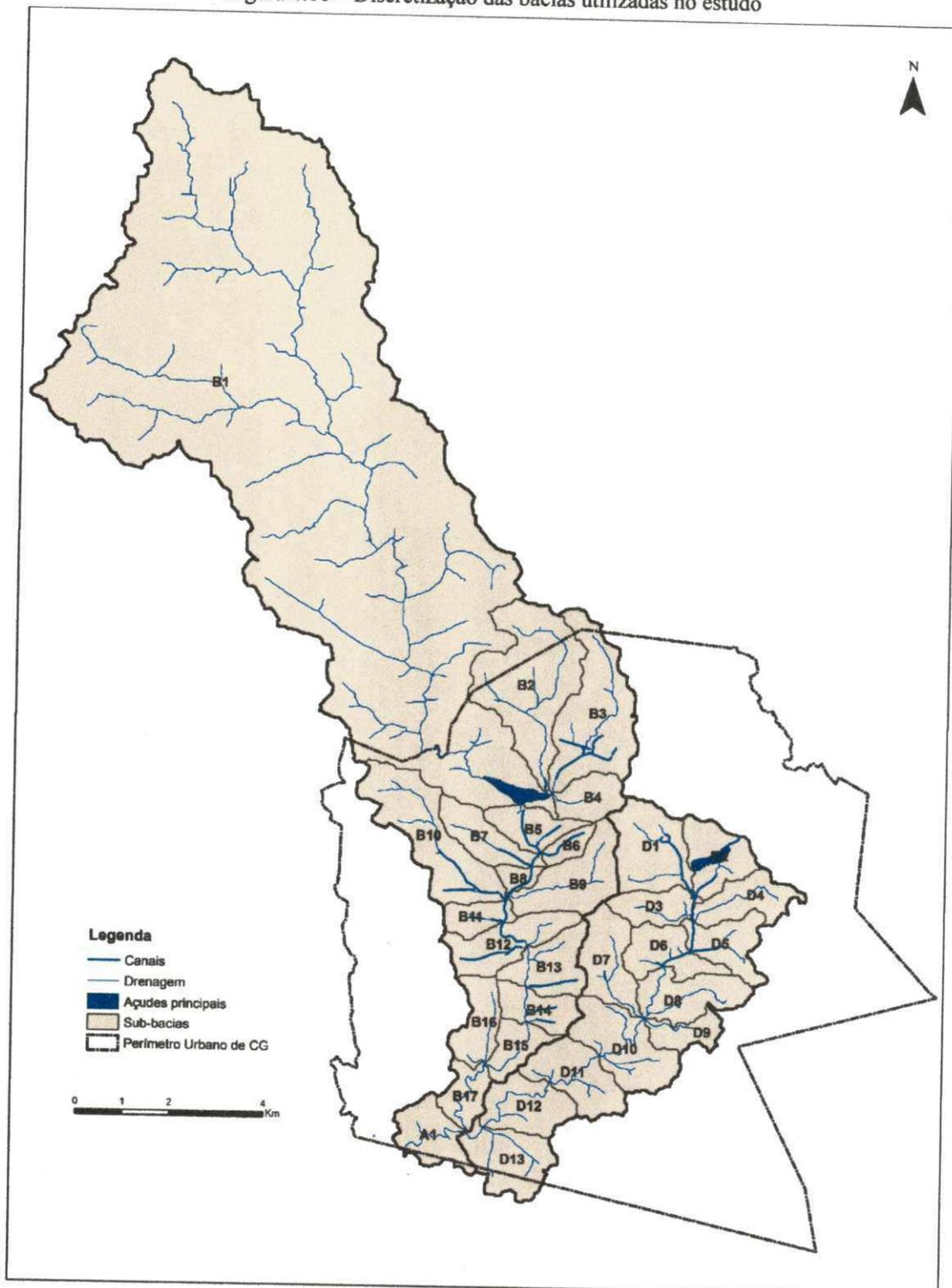
Diante da grande possibilidade de ter havido alterações no escoamento natural provocadas por elementos construídos, da análise do mapa de fluxos disponibilizado pela prefeitura e da ausência de maiores informações, a partir de conversas com a equipe técnica de elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), foram realizados ajustes no mapa de bacias e sub-bacias oriundo da delimitação automática, nessa área, de modo a adotar o fluxo previsto neste último mapa citado. Considerou-se, então, que as águas da bacia dos Piabas não contribuem para o canal do Prado. Este ponto deve ser melhor investigado, uma vez que a bacia dos Piabas, que desaguaria no açude, tem aproximadamente 14 km² (sendo mais da metade em área urbana) e sua contribuição, ainda que parcial, pode causar consideráveis diferenças na estimativa de volumes de água escoados no canal do Prado. Alguns outros ajustes foram feitos junto à equipe de elaboração do PMSB. A rede de microdrenagem é importante nesta delimitação, porém o município carece deste cadastro.

A partir da análise da rede de drenagem, seções consideradas críticas, por receberem maiores contribuições de cursos d'água e fundos de vale, de acordo com a rede gerada, foram utilizadas como critério para realizar a discretização das bacias, diante do objetivo inicial de verificar as vazões de entrada no canal principal. Foram selecionadas, então, duas bacias do município, a Bacia do Riacho de Bodocongó e do Riacho do Prado para aprofundar as análises (Figura 4.10). Ambas são sub-bacias da Bacia do Rio Bodocongó, afluente do Rio Paraíba. As próximas etapas metodológicas são aplicadas a estas duas bacias.

Nas bacias em estudo estão localizados dois reservatórios da cidade, o açude de Bodocongó e o Açude Velho, localizados na Bacia do Riacho de Bodocongó e na Bacia do Riacho do Prado, respectivamente. Nota-se que a Bacia do Riacho de Bodocongó abrange, a

norte, parcelas dos municípios de Puxinanã, Queimadas e Pocinhos, enquanto a Bacia do Riacho do Prado está praticamente toda situada dentro dos limites urbanos de Campina Grande.

Figura 4.10 – Discretização das bacias utilizadas no estudo



Fonte: Próprio autor

4.4 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

Neste estudo, para estabelecer as relações chuva-deflúvio, utilizou-se o sistema computacional IPHS1 – V. 2.11 (UFRGS, 2003). Foram gerados hidrogramas de cheias em determinados pontos de controle (Figura 4.11) ao longo do riacho principal das Bacias do Riacho de Bodocongó e do Riacho do Prado, em seus trechos naturais e canalizados.

Os pontos de controle (PCs) encontram-se em locais considerados críticos na rede de drenagem, por serem pontos em que o riacho recebe grandes contribuições (de rios e canais que nele desaguam). Foram analisados dois cenários e eventos de chuvas com tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos.

4.4.1 Hietograma de projeto

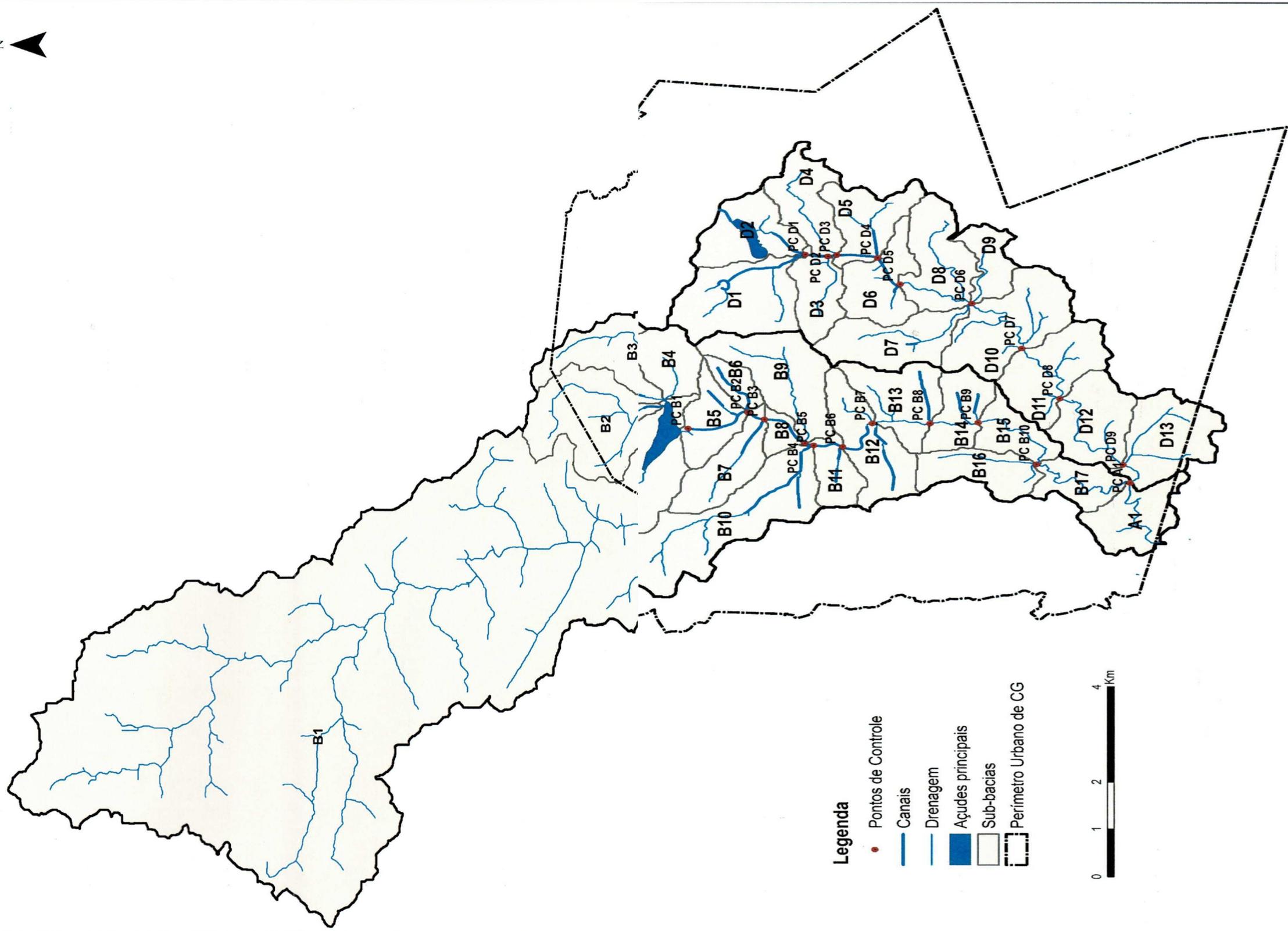
A chuva de projeto foi gerada a partir da equação IDF (Equação 4.4), obtida por Aragão *et al.* (2000), que usou uma série pluviométrica de 1966 a 1989 para determinar os parâmetros adimensionais locais.

$$i = \frac{334T^{0,227}}{(t + 5)^{0,596}} \quad (4.4)$$

Onde: i = intensidade da chuva (mm/h); T = período de retorno (anos); t = duração da chuva (minutos).

Para estabelecer a distribuição temporal, adotou-se um histograma onde a altura associada com cada intervalo de tempo de duração da chuva satisfaz a relação IDF acima (PAIVA e PAIVA, 2001), em seguida reordenado de modo que o pico ocorresse em 50% da precipitação total. Apesar do tempo de retorno da precipitação não ser necessariamente igual ao da vazão devido a interferência de outros fatores, assume-se esta consideração.

Foi adotada a chuva com duração de seis horas (devido ao tempo de concentração da sub-bacia B2 de aproximadamente 5 horas), subdividida em intervalos de seis minutos (considerando que a maioria das sub-bacias tem um tempo de concentração em torno de 30 minutos, e é sugerido um intervalo equivalente a 1/5 do tempo de concentração da bacia) e simuladas precipitações com tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. A adoção de eventos de diferentes tempos de retorno tem por objetivo avaliar a partir de que momento as estruturas hidráulicas deixam de funcionar.



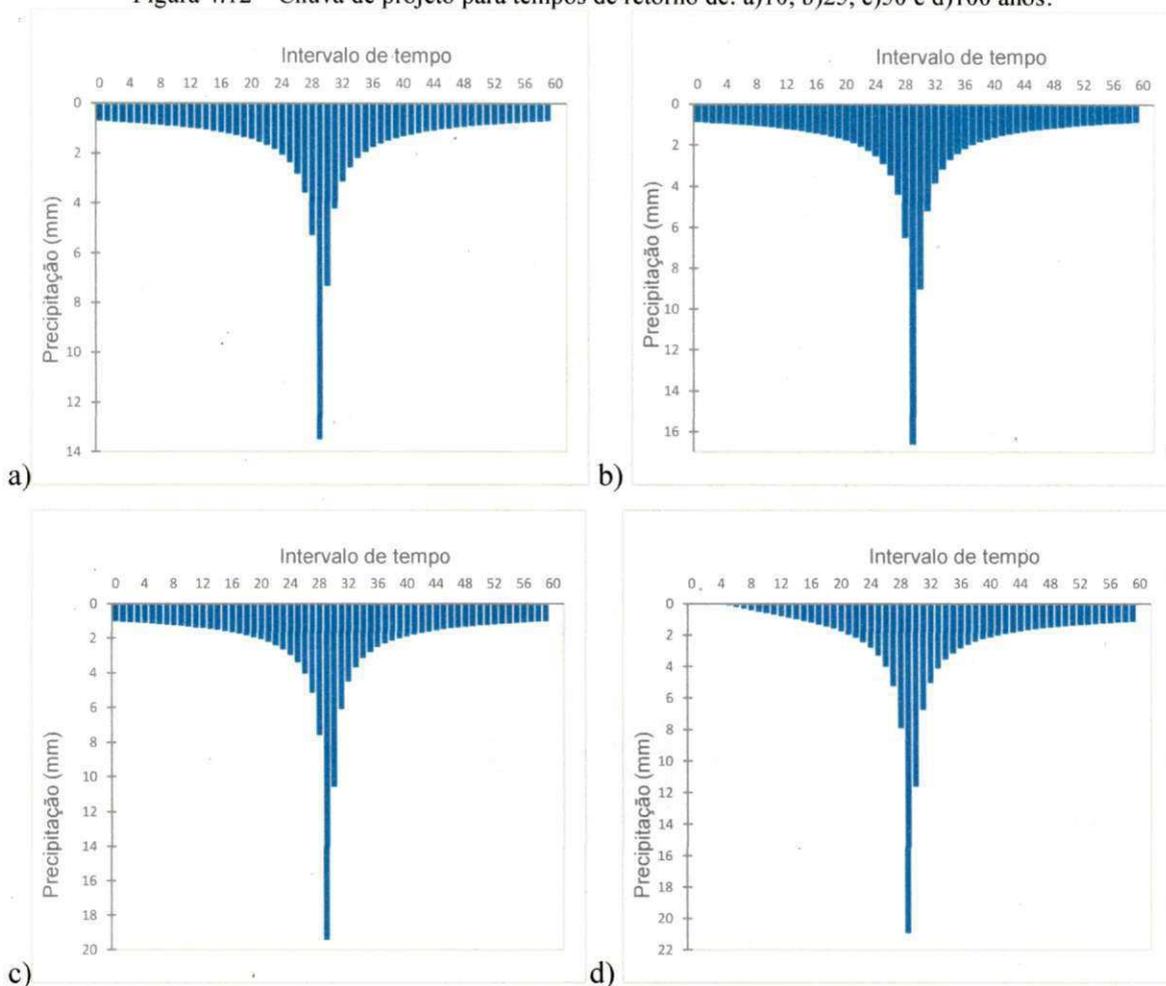
Legenda

- Pontos de Controle
- Canais
- Drenagem
- Açudes principais
- Sub-bacias
- ⌚ Perimetro Urbano de CG



As chuvas de projeto utilizadas para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos estão apresentadas nos gráficos a, b, c e d, respectivamente, da Figura 4.12.

Figura 4.12 – Chuva de projeto para tempos de retorno de: a)10, b)25, c)50 e d)100 anos.



Fonte: Próprio autor

A distribuição da chuva foi considerada uniforme nas duas bacias estudadas, e apenas foi realizado um ajuste na sub-bacia B1. Conforme Manual de Hidrologia Básica para estruturas de drenagem (DNIT, 2005), “as precipitações de várias durações, definidas pela análise estatística das observações num posto pluviógrafo não podem ser usadas diretamente no estudo de uma bacia hidrográfica, pois a precipitação média sobre uma área de certa extensão é menor do que um ponto isolado”. Foram utilizadas as equações 4.5 e 4.6, recomendadas no manual para bacias com área superior a 5 km², para ajustar a chuva de projeto da subbacia B1.

$$F_A = \frac{Y}{Y + \text{Log}^2\left(\frac{A_R}{5}\right)} \quad (4.5)$$

$$Y = 35 \text{Log} (0,7D + 1) \quad (4.6)$$

Onde D é a duração da chuva, em horas, A_R a área considerada, em km^2 , e F_A a relação entre a precipitação média sobre a área e a precipitação de um ponto, para igual frequência.

4.4.2 Separação do escoamento

O método da Curva Número (CN) foi escolhido para separação do volume precipitado. Os dados de entrada necessários são a chuva de projeto e o CN de cada sub-bacia. As etapas de cálculo do parâmetro CN, utilizadas neste estudo, estão descritas mais adiante.

O método do hidrograma triangular unitário do SCS foi utilizado para geração dos hidrogramas de cheia de cada sub-bacia. Para seu cômputo foram calculados o tempo de concentração de cada sub-bacia, através da equação de Kirpich e a área de cada sub-bacia. Não foi considerado no cálculo o efeito da canalização dos riachos. Para os rios e canais afluentes ao canal principal sem informação, o comprimento e declive do talvegue foram extraídos utilizando o MNT, os limites das bacias e a rede drenagem gerada.

4.4.3 Propagação do escoamento

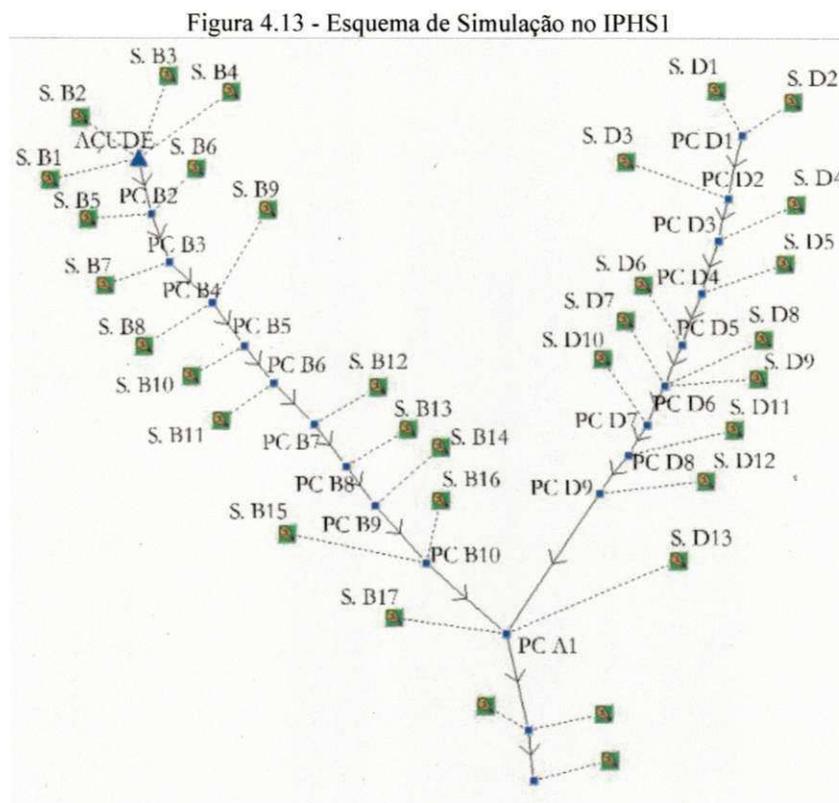
Duas versões do modelo de propagação de ondas de Muskingum foram utilizadas para simular a propagação em canais: Muskingum Cunge linear foi usado para propagação do escoamento em canais construídos e Muskingum Cunge com Planície de Inundação nos trechos naturais dos riachos principais. E o método de Puls para propagação em reservatório.

Nas bacias em estudo estão localizados dois reservatórios da cidade, o açude de Bodocongó e o Açude Velho, localizados na Bacia do Riacho de Bodocongó e na Bacia do Riacho do Prado, respectivamente. O segundo foi ignorado na simulação por apresentar menor contribuição ao sistema de drenagem, e devido à ausência de informações. Mas o amortecimento da onda de cheia no açude de Bodocongó foi verificado. Para isso, a geometria foi estimada a partir da área do espelho d'água de aproximadamente 312.500 m^2 e da topografia do entorno, considerando a informação de capacidade de armazenamento de cerca 1 milhão de

m³. A fórmula de Francis foi utilizada para obter a relação cota-vazão. A propagação foi calculada usando o método de Puls.

A geometria dos canais dos riachos principais foi extraída dos projetos, obtidos junto à Secretaria de Planejamento (SEPLAN/ PMCG), e uma seção “equivalente” foi utilizada. Parâmetros físicos necessários ao método (seções dos rios, assim como comprimento e declividade) foram estimados a partir do MNT.

A Figura 4.13 apresenta o esquema de simulação, sendo possível verificar de forma mais sistemática as bacias.



Fonte: Próprio autor

4.4.4 Mapa de Ocupação e Cômputo do CN

Os estudos consideraram dois cenários distintos: (i) o cenário atual, que contempla a condição atual de uso do solo, obtida através de uma imagem de alta resolução e dados dos anos de 2010 e 2012 (ii) o cenário de expansão urbana, que simula o aumento de impermeabilização, considerando índices urbanísticos presentes na legislação vigente. Para a composição destes cenários o SIG ArcGIS 10.1 foi empregado.

A construção do **cenário atual** foi realizada de modo a obter elevado nível de detalhe, dadas as restrições da disponibilidade de dados, de tempo e das peculiaridades do próprio método CN. Para a escolha das classes, foram investigados tabelas e ábacos fornecidos pelo SCS para atribuição e composição do valor CN, assim como também foram verificadas as informações de ocupação do solo existentes para a cidade.

Os dados foram editados de forma a corrigi-los e complementá-los utilizando uma imagem de alta resolução do ano de 2010 e o mosaico disponível no Google Earth®. As vias, representadas por linhas, continham informações de tipo de cobertura e foram convertidas em polígonos, através de uma ferramenta de análise de proximidade. Operação semelhante foi feita para delimitação de calçadas. As demais classes são oriundas do arquivo de polígonos de lotes, que sofreu segmentações e adições com o intuito de completar a informação para toda a área de estudo. Desse modo, o conceito cadastral de lotes é perdido, e são utilizados apenas como parcelamentos da terra. As áreas com construção foram denominadas lotes construídos, e o cálculo de impermeabilização em cada lote construído foi calculado através da Equação 4.7⁶:

$$\text{Imp} = \text{Edif} + \text{Tx} (1 - \text{Edif}) \quad (4.7)$$

Onde *Imp* é o percentual total de área impermeabilizada no lote, *Edif* o percentual de área edificada no lote (calculada através da média simples para cada bacia dos percentuais obtidos em todos os lotes através de ferramentas do SIG) e *Tx* o percentual de área livre impermeabilizada no lote. Verificou-se que tal taxa decresce com o tamanho do lote e também varia de acordo com as características da região em que se encontra e, a partir da observação da imagem, foram estipulados três padrões:

- i) Para lotes maiores que 600m², Tx igual a 30%;
- ii) para os lotes com área inferior a 600 m², localizados na Bacia do Riacho de Bodocongó e nas bacias D8 a D13 e A1, Tx igual a 50%; e
- iii) para os lotes com área inferior a 600 m², localizados nas Bacias D1 a D7, Tx igual a 70%.

Os parcelamentos sem construção, através da análise visual da imagem e das informações de uso do solo fornecidas pelo IBGE, foram classificados em pastagens, lavouras,

⁶ Observe que a equação está bem definida, uma vez que se $\text{Edif}=1$, $\text{Imp} = \text{Edif}$, a área livre impermeabilizada deve ser então 0 por definição, fazendo Tx assumir unicamente o valor 0.

bosques ou espaços abertos, estes ainda divididos de acordo com a presença de relva: a) em menos de 50% da área; b) em 50 a 75% da área; c) em mais de 75% da área.

A partir do mapa gerado, fazendo uso de ferramentas de sobreposição, gerenciamento de dados e análise espacial do SIG, foi calculado o percentual referente a cada classe e a média do percentual de impermeabilização por lote para todas as sub-bacias em estudo.

O segundo mapeamento necessário ao cálculo do CN refere-se aos tipos de solo. Foi utilizado um estudo de classificação do solo da Paraíba realizado pela SUDENE, escala de 1:500.000 (SUDENE, 1972). Quatro diferentes classificações foram encontradas⁷:

- REGOSOL DISTRÓFICO (NEOSSOLO) fase floresta caducifólia relevo suave ondulado

- Associação de SOLOS LITÓLICOS EUTRÓFICOS (NEOSSOLO) com A moderado textura média fase pedregosa e rochosa floresta caducifólia relevo forte ondulado e montanhoso substrato gnaiss e granito e AFLORAMENTO DE ROCHA E BRUNO NÃO CÁLCICO (LUVISSOLO) planossólico fase floresta caducifólia relevo ondulado e forte ondulado

- VERTISOL (VERTISSOLO) fase floresta caducifólia relevo ondulado

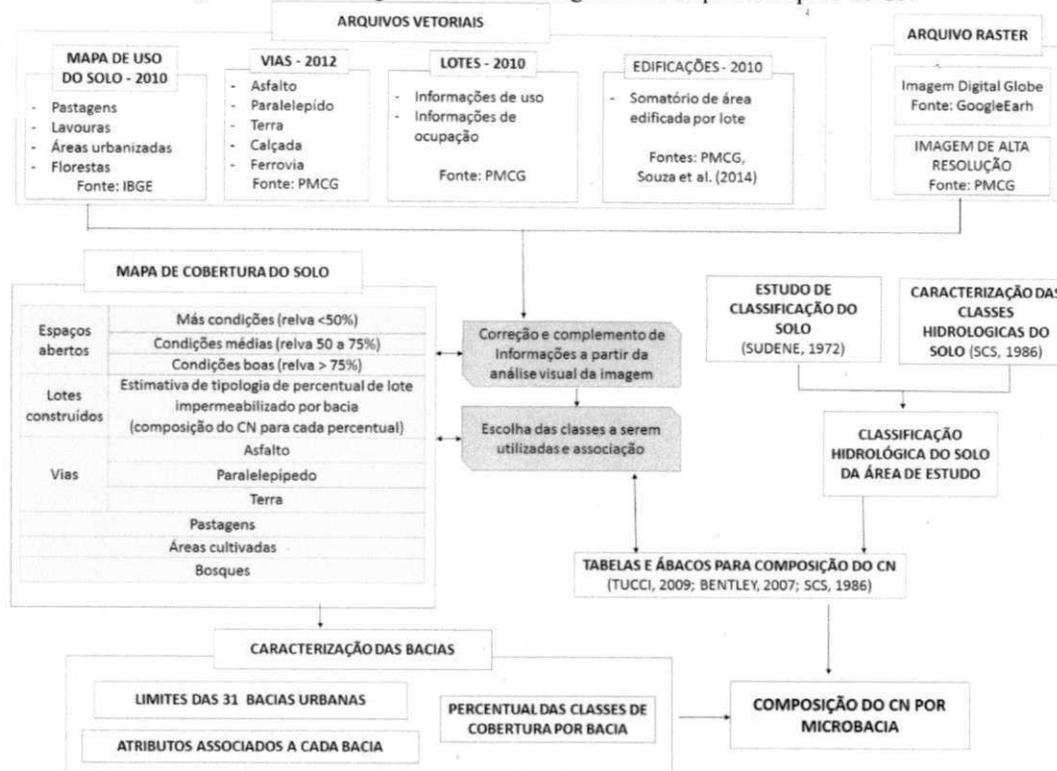
- Associação de: SOLONETZ SOLODIZADO (PLANOSSOLO) textura média fase caatinga hipoxerófila relevo plano e suave ondulado e SOLOS LITÓLICOS EUTRÓFICOS (NEOSSOLO) com A fraco textura arenosa e/ ou média fase pedregosa caatinga hipoxerófila relevo suave ondulado substrato gnaiss e granito e PLANOSOL SOLÓDICO (PLANOSSOLO) com A fraco fase caatinga hipoxerófila relevo suave ondulado.

Considerando, em especial, as informações de profundidade e granulometria fornecidas pelo relatório citado, e a caracterização dos grupos hidrológicos de solo fornecidos pelo SCS (1986), foi verificado a que grupo pertence o solo de cada bacia, em sua maior parte. Vale salientar que a escala insere imprecisões e que outras análises, tais como de condutividade hidráulica, seriam importantes à realização de uma melhor classificação.

Neste estudo, foi considerada a condição de umidade antecedente média, que é mais usual nas aplicações de projeto (SCS, 1986). A partir dos principais fatores que determinam o CN (grupo hidrológico do solo, cobertura do solo e condição antecedente de escoamento), foi calculada a média ponderada dos valores de CN das classes, obtendo o CN médio de cada sub-bacia. A metodologia descrita está resumida no fluxograma da Figura 4.14.

⁷ Observe que entre parênteses é informada a classe do sistema a que corresponde a classificação usada anteriormente descrita no documento da SUDENE (EMBRAPA, 2006).

Figura 4.14 - Fluxograma da metodologia utilizada para cômputo do CN



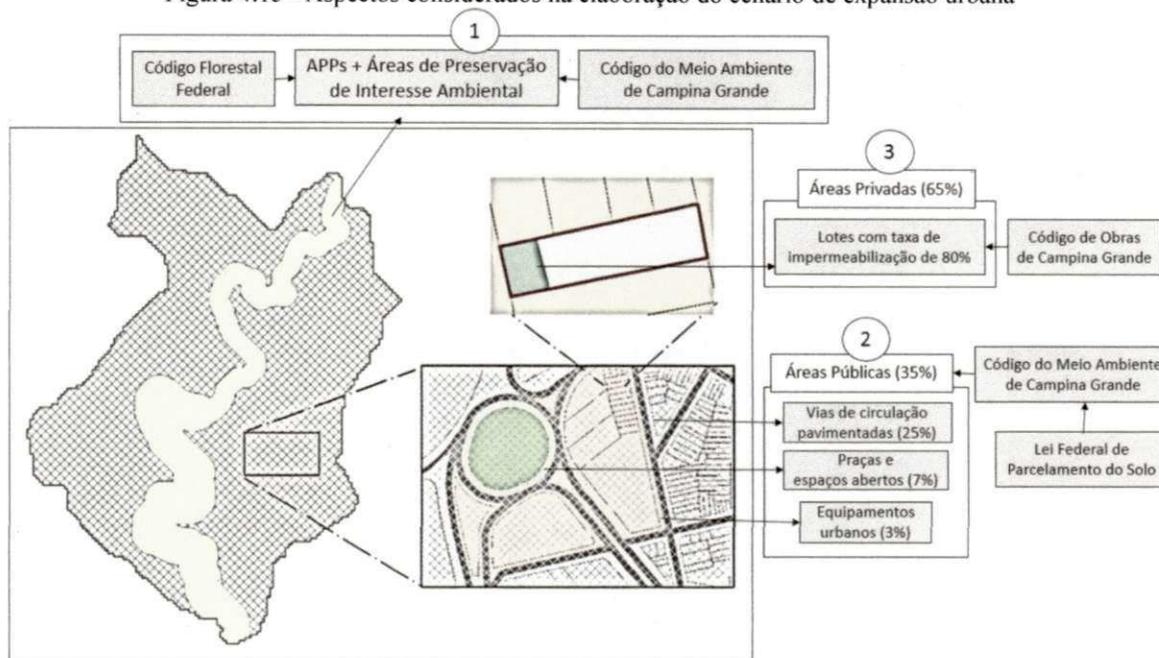
Fonte: Próprio autor

Após obtidos os valores de CN composto, foi calculado o percentual de impermeabilização e estimada a densidade populacional das diferentes sub-bacias, com o objetivo de verificar as relações existentes entre estas variáveis. O percentual de impermeabilização foi calculado através da soma dos percentuais de área impermeabilizada nas diferentes classes. A densidade populacional por bacia foi estimada a partir dos dados do censo de 2010 (IBGE, 2010), através da média ponderada. Esta metodologia pode embutir alguns erros, mas é a que mais se aproxima dos valores reais diante da informação existente (agrupada por setor censitário).

O **cenário de expansão urbana** foi montado considerando parâmetros urbanísticos presentes na legislação vigente. Esta análise parte da exigência contida no Código do Meio Ambiente Municipal (2009) referente ao parcelamento do solo, de que *“para aprovação dos projetos de loteamento deverão ser reservados, no mínimo, 35% (trinta e cinco por cento) da gleba para as áreas públicas”*. Para efeito de simulação, as relações existentes para o loteamento serão extrapoladas para a unidade de bacia.

Diante das restrições à ocupação e à retirada de vegetação em Áreas de Preservação Permanente (APPs) e em Zonas Especiais de Preservação (ZEPs), tais áreas foram desconsideradas no parcelamento. O limite mínimo de 35% para áreas públicas foi fixado. Observou-se em áreas mais urbanizadas uma faixa em torno de 25% ocupada por vias de circulação, restando 10% para espaços abertos e equipamentos públicos, aos quais foram atribuídos 7% e 3% respectivamente. Os 65% de áreas privadas foram divididos em lotes com taxa de impermeabilização de 80%, que é a taxa máxima prevista no Código de Obras do Município. Tais relações podem ser melhor compreendidas através da Figura 4.15.

Figura 4.15 - Aspectos considerados na elaboração do cenário de expansão urbana



Fonte: Próprio autor

Devido à ausência do mapeamento de APPs no município, utilizando as referências existentes no Novo Código Florestal, Lei 12.651/2012 (BRASIL, 2012), e no Código do Meio Ambiente do Município, Lei Complementar nº 042/2009 (PMCG, 2009), foram delimitadas as áreas protegidas nas margens dos córregos e reservatórios d'água.

As APPs foram classificadas como espaços abertos com relva em mais de 75% da área; as praças e os parques, espaços abertos com relva em 50 a 75% da área. As vias de circulação foram consideradas todas asfaltadas, uma vez que a pavimentação de asfalto é geralmente uma solicitação da população que reside ou trabalha próximo a vias de terra.

Na elaboração deste cenário, algumas condições de contorno foram adotadas: a) a cobertura do solo nas áreas rurais e nas externas ao limite do município foram mantidas constantes; b) as bacias que apresentavam maior criticidade, em termo de impermeabilização, do que os padrões adotados tiveram seus cenários atuais mantidos; c) apenas foram consideradas as APPs que apresentavam sua maior parcela não impermeabilizada.

Utilizando agora o novo mapa de ocupação obtido, foram realizadas as etapas semelhantes às aplicadas ao cenário atual a fim de obter o CN médio para cada bacia.

A condição de contorno (a) subestima impactos na Bacia do Riacho de Bodocongó, uma vez que sofre interferência do processo de impermeabilização na área rural de Campina Grande, a noroeste, e nos municípios de Pocinhos, Puxinanã e Montadas (especialmente os dois últimos por terem suas áreas urbanas localizadas nesta bacia). Tal condição foi adotada considerando a população desses municípios, consideravelmente menor que a de Campina Grande, conforme Tabela 4.1, assim como também a proporção entre as áreas urbanas e rurais nesta bacia. Entende-se, entretanto, que em uma segunda análise, é um ponto a ser considerado, uma vez observada, por exemplo, a elevada urbanização, no município de Montadas.

Tabela 4.1 - População dos municípios de Puxinanã, Montadas e Pocinhos

Município	Censo 2000			Censo 2010		
	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural
Puxinanã	11981	3160	8821	12923	4217	8706
Montadas	3969	1966	2003	4990	3156	1834
Pocinhos	14880	7557	7323	17032	9618	7414

Fonte: IBGE (Censos demográficos 2000 e 2010)

4.4.5 Estudo preliminar da capacidade do sistema de drenagem

Para a verificação da capacidade do sistema de drenagem, foram utilizados os softwares HEC-RAS e HEC-GEORAS. Não foi realizada uma análise hidráulica detalhada das condições de escoamento no canal, em termos de regime de escoamento.

Os dados de projeto dos dois canais, digitalizados junto à Secretaria de Planejamento, foram utilizados. Apesar de não haver garantias de que a execução do canal tenha ocorrido conforme consta em projeto, algumas medições em campo indicam conformidade. A geometria dos canais construídos no Riacho do Prado (aproximadamente 2300 m de comprimento e 19 m de desnível total) e no Riacho de Bodocongó (aproximadamente 3.750 m de comprimento e 14

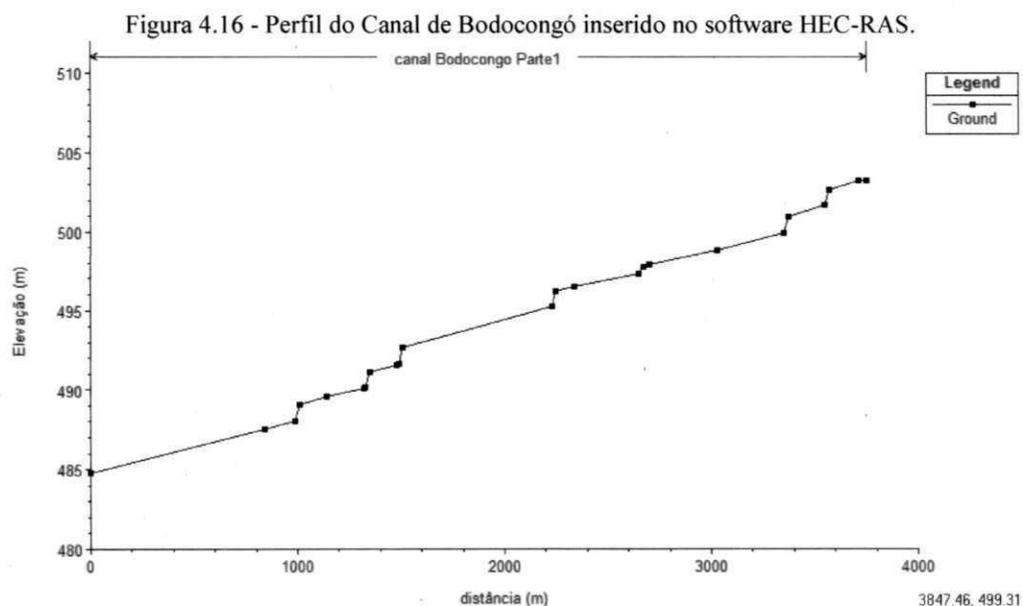
m de desnível total) foi toda inserida no HEC-RAS (Figura 4.16 e Figura 4.17), posicionando seções transversais onde ocorriam entradas de fluxo ou mudanças de declividade e seção. A presença de obstáculos não foi considerada nesta análise.

Já a geometria do riacho em trecho natural foi obtida a partir do MDE construído, em formato TIN (Triangular Irregular Network), usando o software HEC-GEORAS. Os valores do coeficiente de Manning utilizados encontram-se descritos na Tabela 4.2, obtidos analisando os coeficientes apresentados em Methods e Durrans (2007).

Tabela 4.2 - Valores do coeficiente de Manning adotados

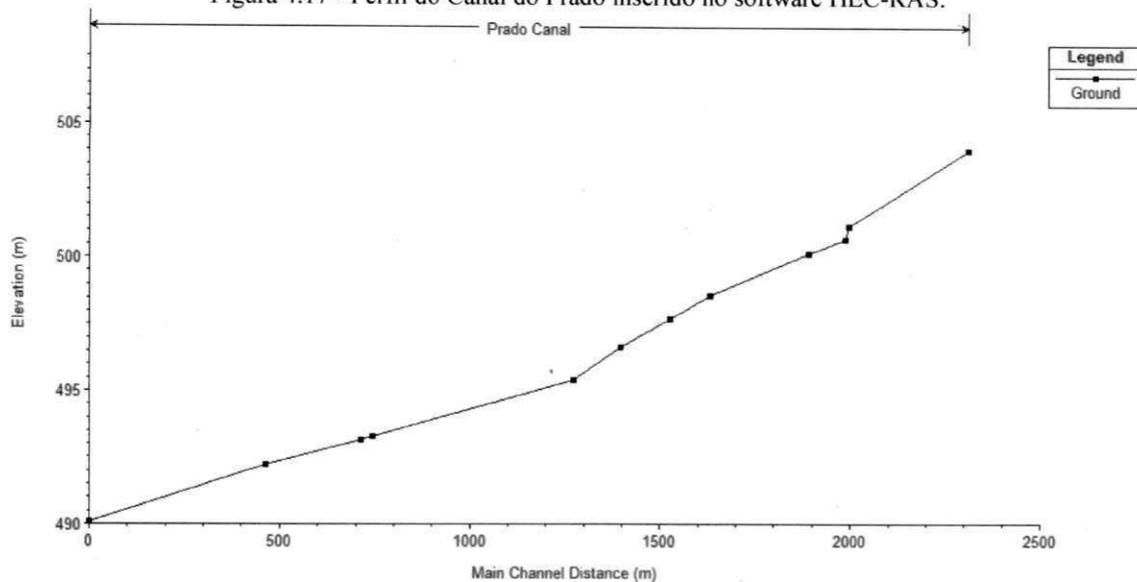
Trecho	Coefficiente de Manning
Canal do Prado	0,016
Canal de Bodocongó	0,018
Calha do riacho	0,045
Planície de inundação do riacho	0,05

Fonte: Methods e Durrans (2007)



Fonte: Próprio autor

Figura 4.17 - Perfil do Canal do Prado inserido no software HEC-RAS.



Fonte: Próprio autor

Recomenda-se maior discretização desse valor em estudos futuros. Os coeficientes de perda de carga por expansão e contração do canal utilizados foram os valores fornecidos pelo programa, 0,3 e 0,1, respectivamente.

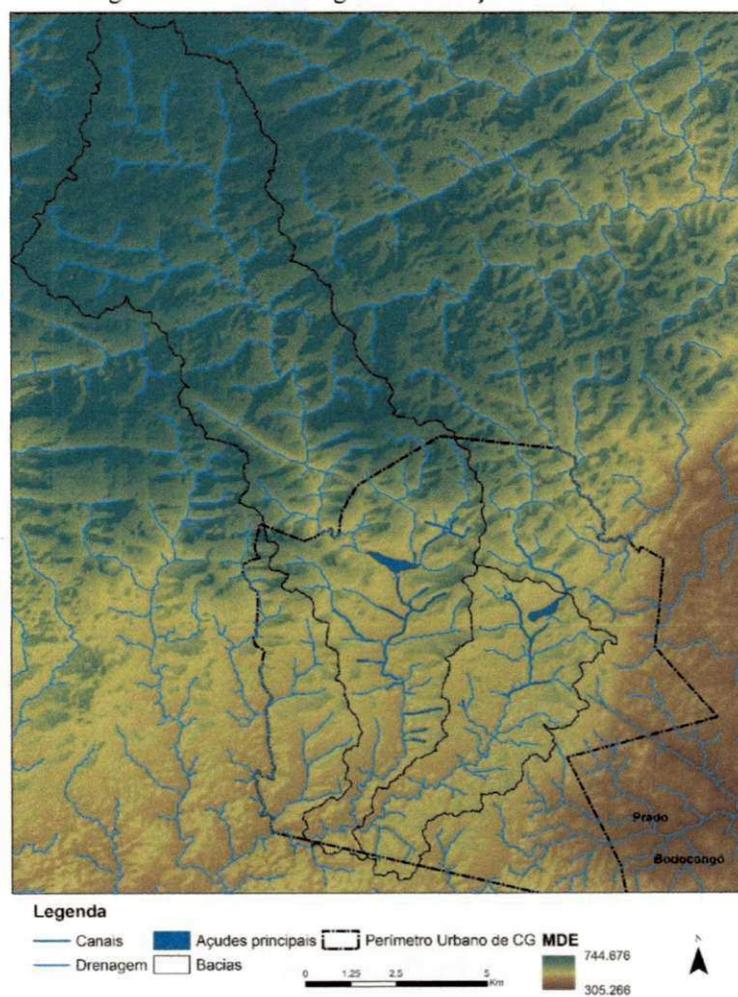
Para o trecho canalizado, foi verificado se ocorria transbordamento do canal nos eventos simulados, através das seções de controle, observando a altura do canal e da lâmina d'água. E no trecho natural, as áreas inundadas foram mapeadas. Os resultados encontrados são confrontados com registros da Defesa Civil acerca de alagamentos (DEFESA CIVIL, 2014) e áreas de alto e muito alto risco delimitadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2013), apontados na Figura 4.18.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 A TOPOGRAFIA DAS BACIAS

O Modelo Digital de Elevação produzido pode ser visto na Figura 5.1. A área de estudo e arredores tem altitudes que variam entre 305 e 745 m, mas na área urbana a faixa de altitudes varia de 385 a 667 m. A sub-bacia B1, na sua área ao norte, tem as maiores elevações, onde está localizado o município de Puxinanã.

Figura 5.1 - Modelo Digital de Elevação da área de estudo

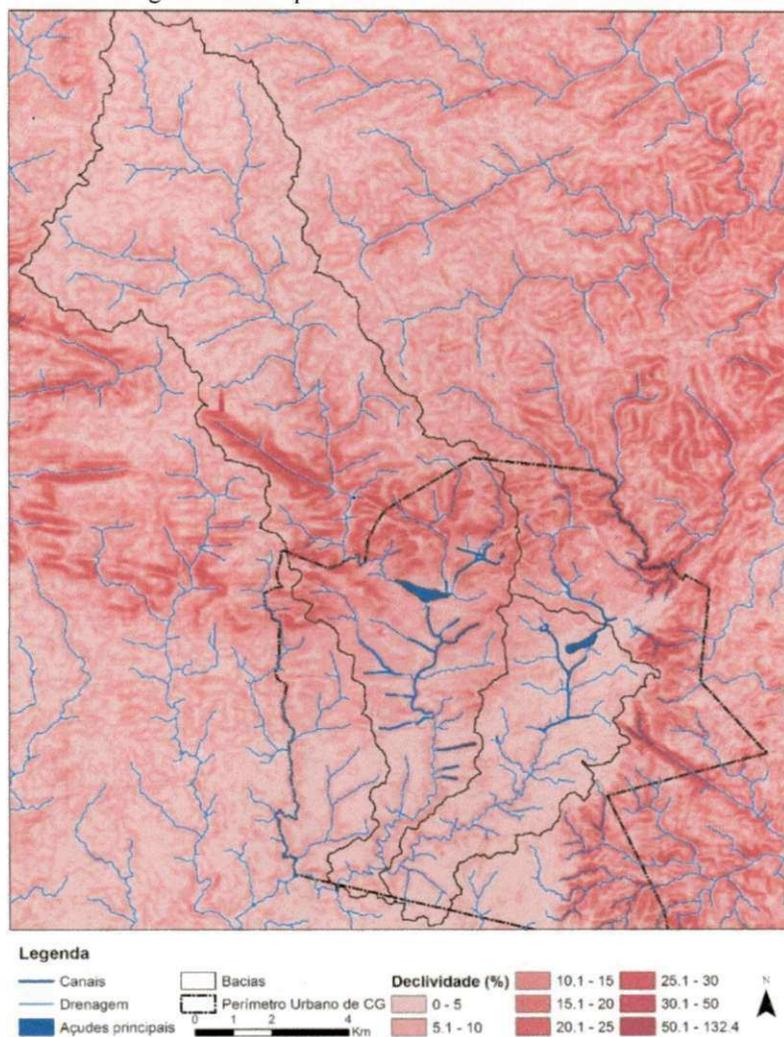


Fonte: Próprio autor

O MDE permite obter com facilidade outras informações a respeito do terreno, como, por exemplo, a declividade. O mapa de declividades está representado na Figura 5.2. A Bacia

do Riacho do Prado apresenta declividades inferiores a 30% em toda sua extensão, enquanto a Bacia do Riacho de Bodocongó apresenta declividades nesta faixa ao sul, mas mais altas declividades a montante do açude e em algumas áreas como o norte da sub-bacia B1. O mapa de declividades é um dos fatores que ditam a forma de ocupação da cidade, também influenciada por outras questões como economia, abertura de estradas, etc.

Figura 5.2 – Mapa de declividades da área de estudo



Fonte: Próprio autor

5.2 A OCUPAÇÃO DO SOLO E O PARÂMETRO CN

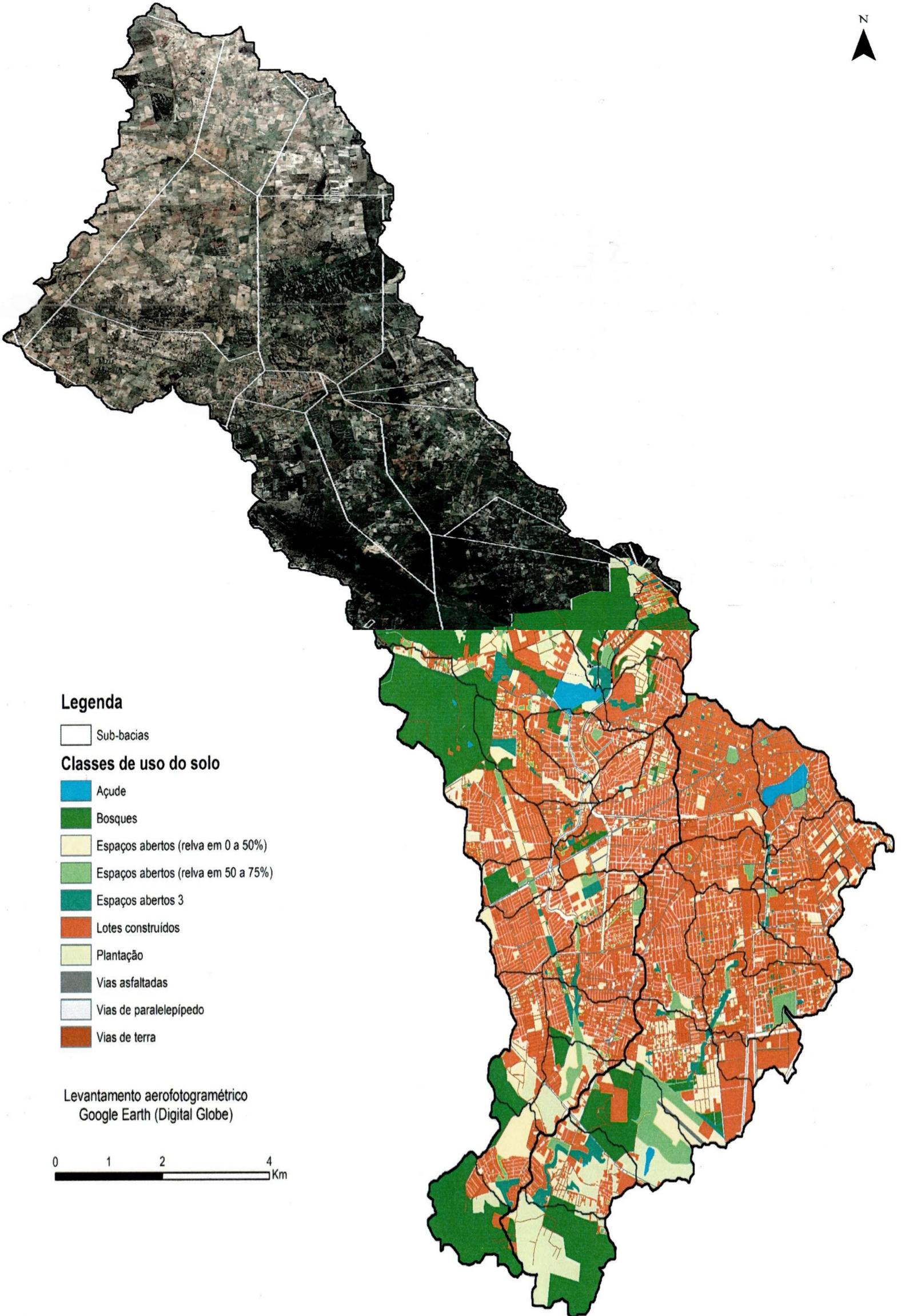
O mapa de uso do solo do cenário atual pode ser visualizado na Figura 5.3. Na Tabela 5.1 são apresentados a área das subbacias em km², os valores de CN encontrados para as sub-

bacias em estudo nos dois cenários (CN atual e CN de expansão urbana), e as diferenças encontradas entre eles (Δ CN), assim como o grupo hidrológico a que pertence o solo da maior parcela de cada sub-bacia (Grupo Hidr.), a densidade populacional estimada (Dens. Pop), em hab/ km², e o percentual de impermeabilização do solo. Essas variáveis foram mapeadas e podem ser observadas nas Figura 5.4 a 5.7.

Tabela 5.1 - Quadro resumo dos cenários de ocupação das sub-bacias em estudo.

Sub-bacia	Área	Grupo Hidr.	Imp. atual	Imp. futura	Dens. Pop.	CN atual	CN de exp. urb.	Δ CN
B1	74.5	A	4%	6%	240.8	61.3	62.3	1.0
B2	5.5	A	3%	46%	256.4	50.7	75.3	24.6
B3	4.4	A	23%	71%	3611.8	58.3	84.1	25.8
B4	1.2	A	62%	78%	7277.8	80.7	88.2	7.5
B5	1.3	A	64%	79%	5303.4	80.6	87.7	7.1
B6	0.5	A	68%	81%	17629.0	82.6	89.1	6.5
B7	1.6	A	62%	79%	6801.4	81.2	89.2	8.0
B8	0.4	A	40%	82%	7729.1	70.8	87.8	16.9
B9	2.5	A	64%	80%	7614.1	82.0	88.9	7.0
B10	4.0	A	27%	75%	3794.8	61.9	85.0	23.1
B11	0.9	C	51%	79%	5859.7	88.4	94.0	5.5
B12	2.1	C	59%	78%	8124.9	90.5	93.7	3.3
B13	1.8	C	63%	80%	8652.2	91.2	93.8	2.6
B14	1.3	C	55%	76%	7940.5	89.6	93.1	3.4
B15	1.1	C	18%	68%	2225.1	85.0	91.4	6.5
B16	1.5	C	36%	75%	3258.2	87.5	92.8	5.3
B17	1.1	C	28%	62%	4729.5	86.4	89.5	3.1
D1	2.7	A	81%	85%	6110.9	89.2	90.5	1.3
D2	1.8	D	77%	77%	6354.6	94.9	94.9	0.0
D3	1.2	A	83%	87%	10473.3	89.5	91.9	2.4
D4	1.6	D	74%	86%	6359.2	94.4	95.8	1.4
D5	1.6	C	74%	83%	5635.7	93.3	95.0	1.7
D6	1.6	C	78%	83%	6934.3	93.6	95.0	1.3
D7	2.0	C	77%	80%	8868.4	93.2	95.3	2.1
D8	2.0	C	54%	81%	5070.8	89.7	93.0	3.4
D9	0.9	C	62%	83%	544.1	91.7	94.7	2.9
D10	2.8	C	35%	72%	2261.8	87.5	92.1	4.7
D11	2.2	C	9%	68%	274.5	81.1	91.4	10.4
D12	2.0	C	24%	72%	1983.2	84.8	92.2	7.4
D13	2.2	C	1%	61%	475.8	79.9	90.4	10.5
A1	1.6	C	4%	59%	572.4	78.7	89.2	10.5

Fonte: Próprio autor



Legenda

 Sub-bacias

Classes de uso do solo

 Açude

 Bosques

 Espaços abertos (relva em 0 a 50%)

 Espaços abertos (relva em 50 a 75%)

 Espaços abertos 3

 Lotes construídos

 Plantação

 Vias asfaltadas

 Vias de paralelepípedo

 Vias de terra

Levantamento aerofotogramétrico
Google Earth (Digital Globe)

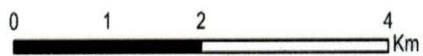
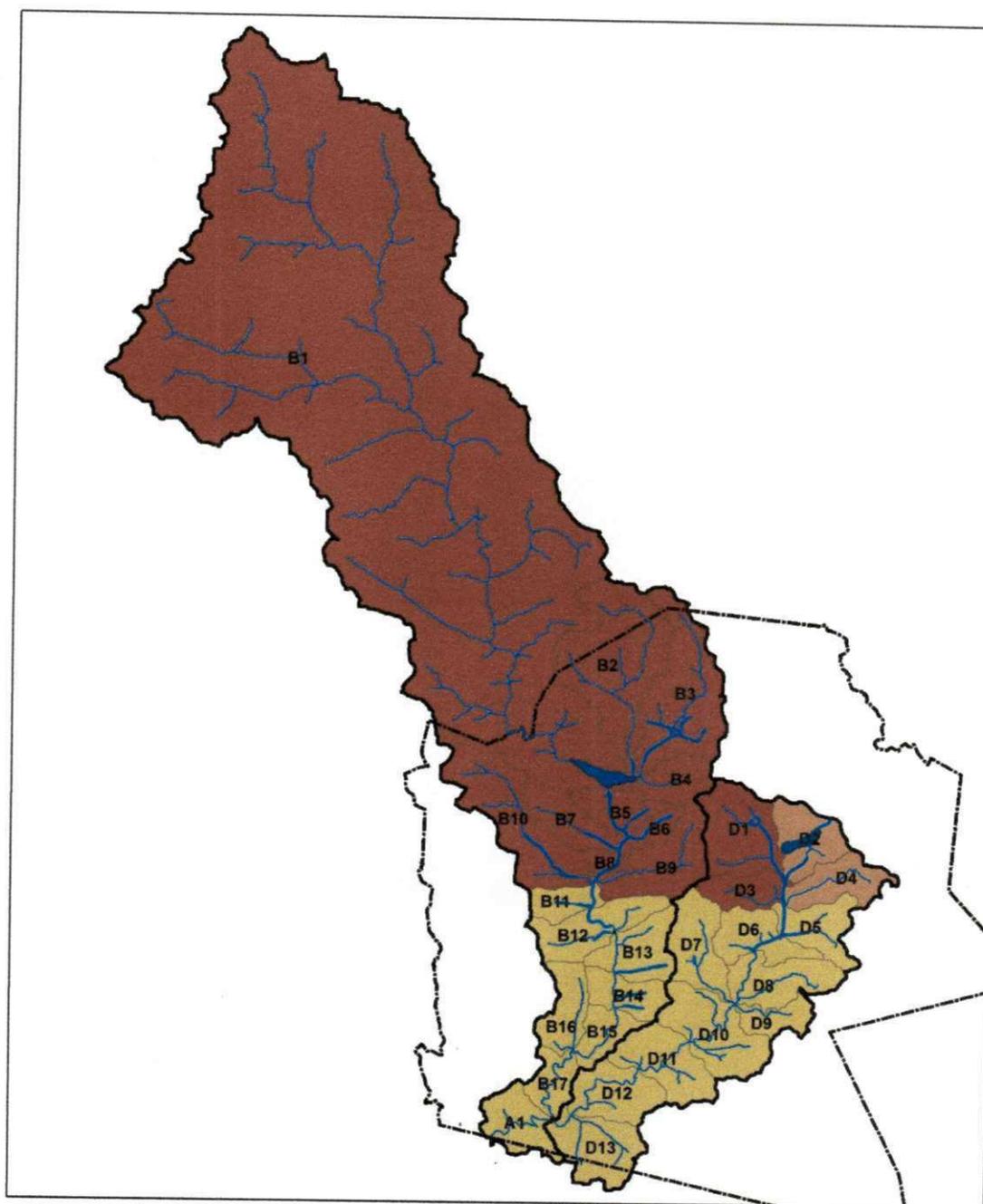


Figura 5.4 - Mapa de grupo de hidrológico do solo das sub-bacias.



Legenda

-  Canais
-  Drenagem
-  Açudes principais
-  Perímetro Urbano de CG

Grupo Hidrológico do Solo

-  A
-  C
-  D



Fonte: Próprio autor

Figura 5.5 - Mapa de CN atual das sub-bacias.

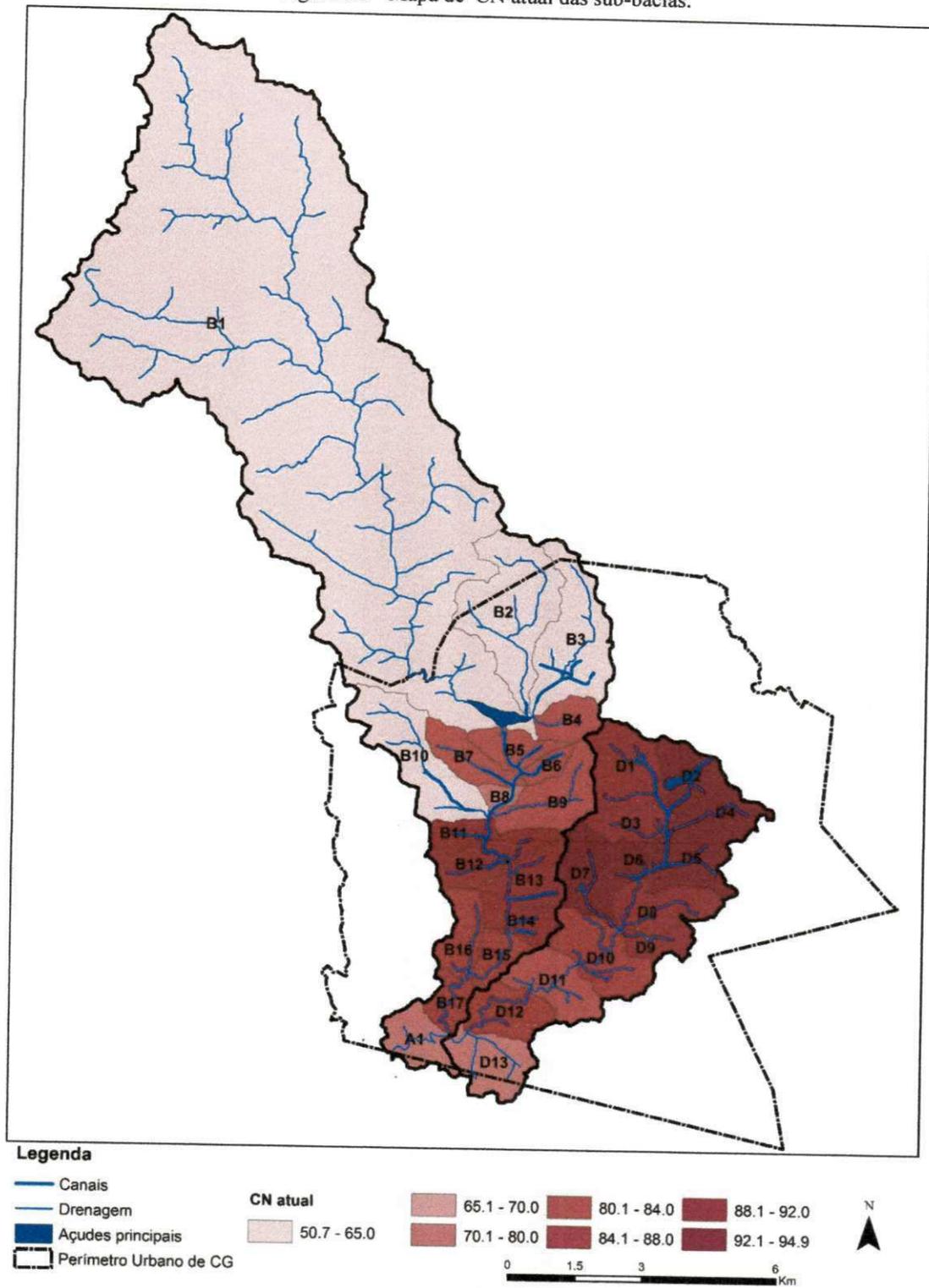
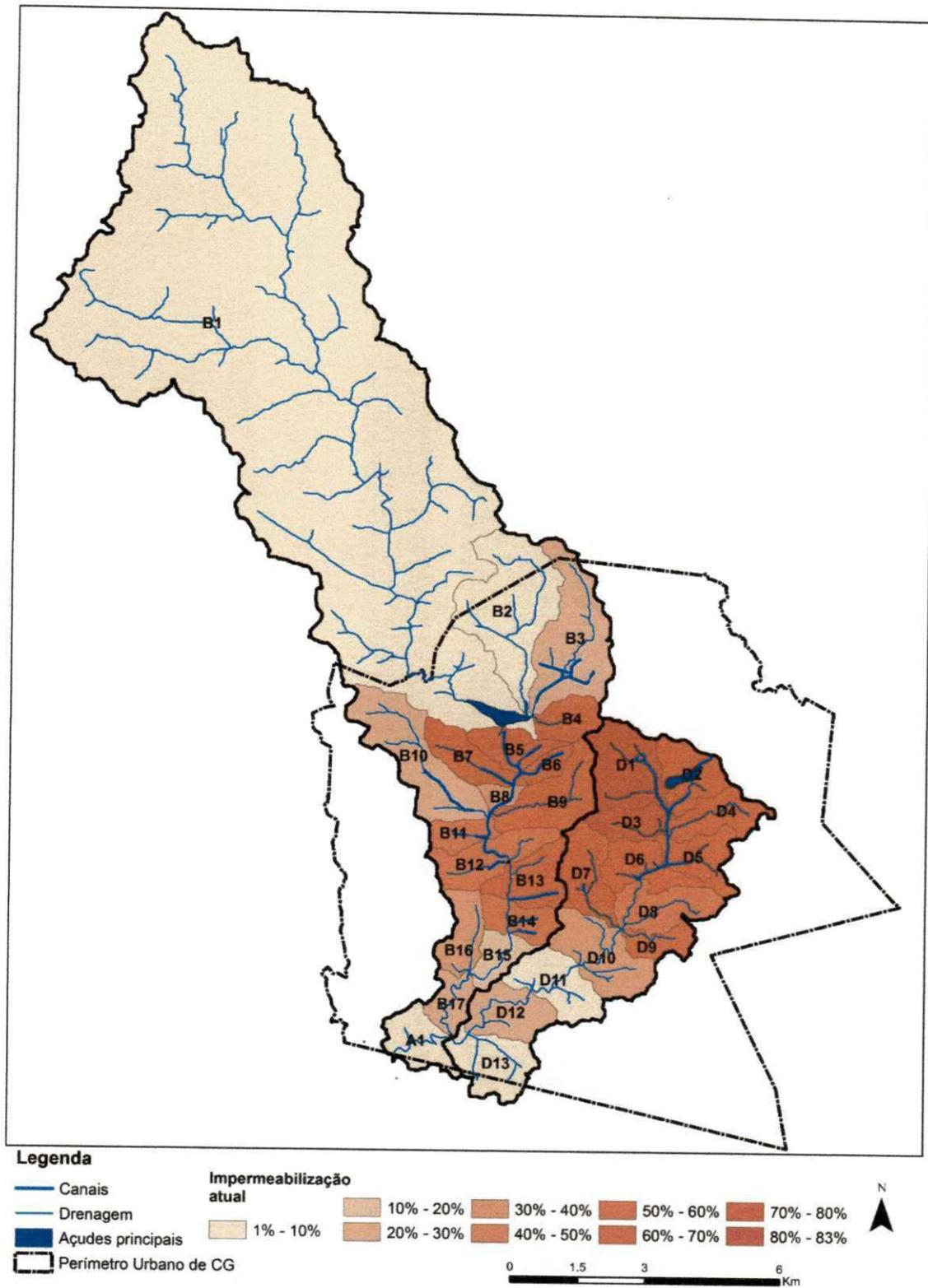
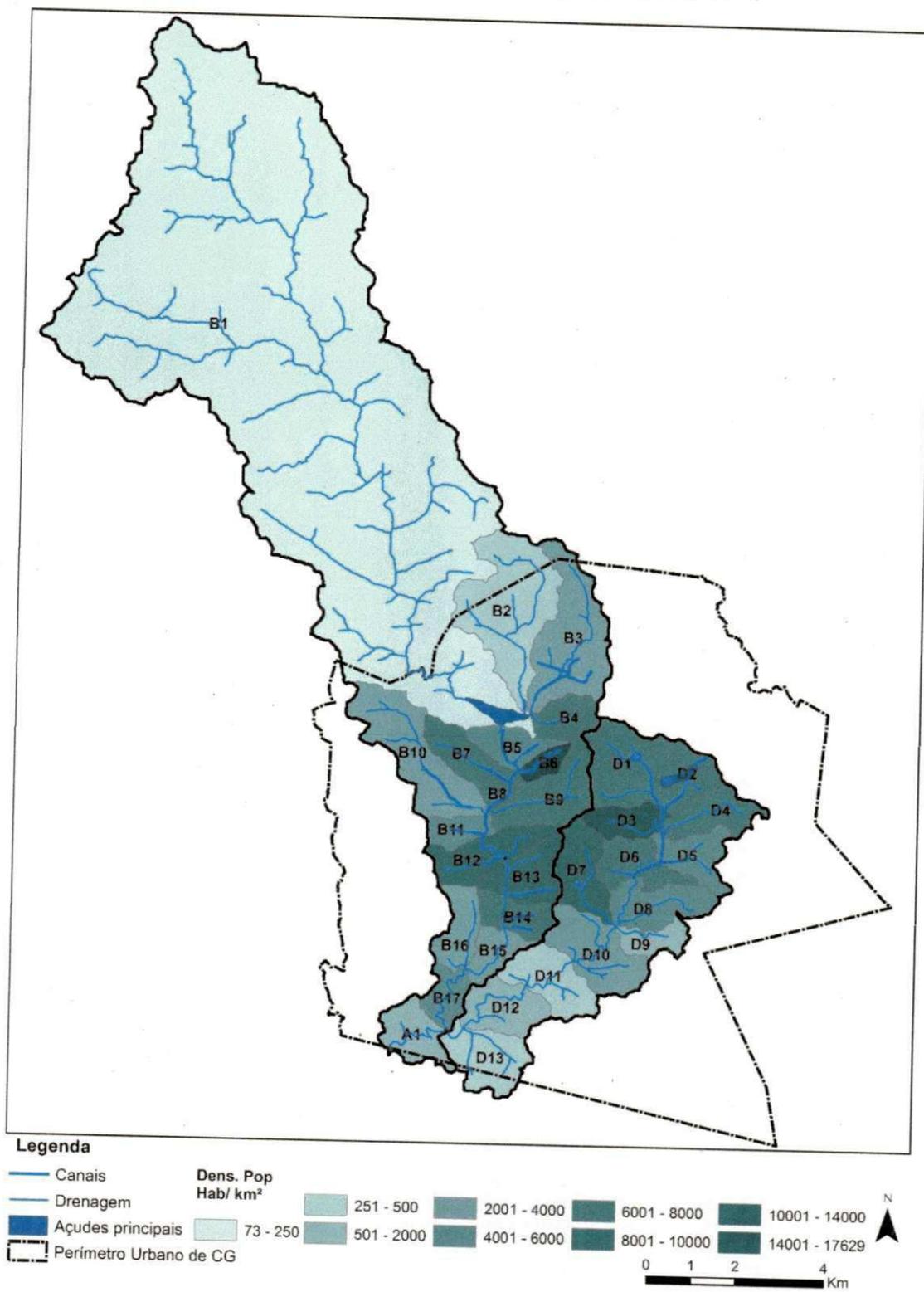


Figura 5.6 - Mapa de percentual de impermeabilização das sub-bacias



Fonte: Próprio autor

Figura 5.7 - Mapa de densidade populacional das sub-bacias



Fonte: Próprio autor

O cenário "atual" permite realizar a leitura da situação atual nas duas grandes bacias. A respeito da Bacia do Riacho do Prado, nas sub-bacias D1 a D7, o mapa de ocupação do solo confirma a alta taxa de impermeabilização (74 a 83%), provocada pela sua densa ocupação. Entretanto, as sub-bacias localizadas mais ao sul, pouco urbanizadas, sofreram baixa impermeabilização, com percentuais que chegam a 1%. Já a bacia do Riacho de Bodocongó está, de modo geral, em processo de urbanização, apresentando baixa impermeabilização nas sub-bacias a montante do açude e nas sub-bacias ao sul, assim como também sub-bacias impermeabilizadas, que chegam à taxa de 68%.

Apesar das baixas taxas de impermeabilização, encontradas nas sub-bacias localizadas ao sul, os valores de CN calculados são todos superiores a 78, devido ao grupo hidrológico a que pertence o solo na região (grupo hidrológico C). O efeito do cenário de expansão urbana sobre os valores da curva número é, portanto, mais sentido nas sub-bacias localizadas ao norte da Bacia do Riacho de Bodocongó, onde a infiltração, no cenário atual, é facilitada pela cobertura e pelo tipo de solo. Essas considerações ressaltam a necessidade de maior conhecimento e menor escala da informação do tipo de solo (pedologia) na região. Para novos projetos de drenagem em áreas de expansão, devem ser realizados levantamentos detalhados in situ dos dados de permeabilidade dos solos em pontos específicos das bacias urbanas através de ensaios laboratoriais; Deve ser atualizada a equação de chuvas intensas de acordo com os dados das estações, bem como atualizados periodicamente os coeficientes de escoamento superficial de acordo com levantamentos detalhados e atualizados de uso do solo, por ser este, um dado extremamente dinâmico.

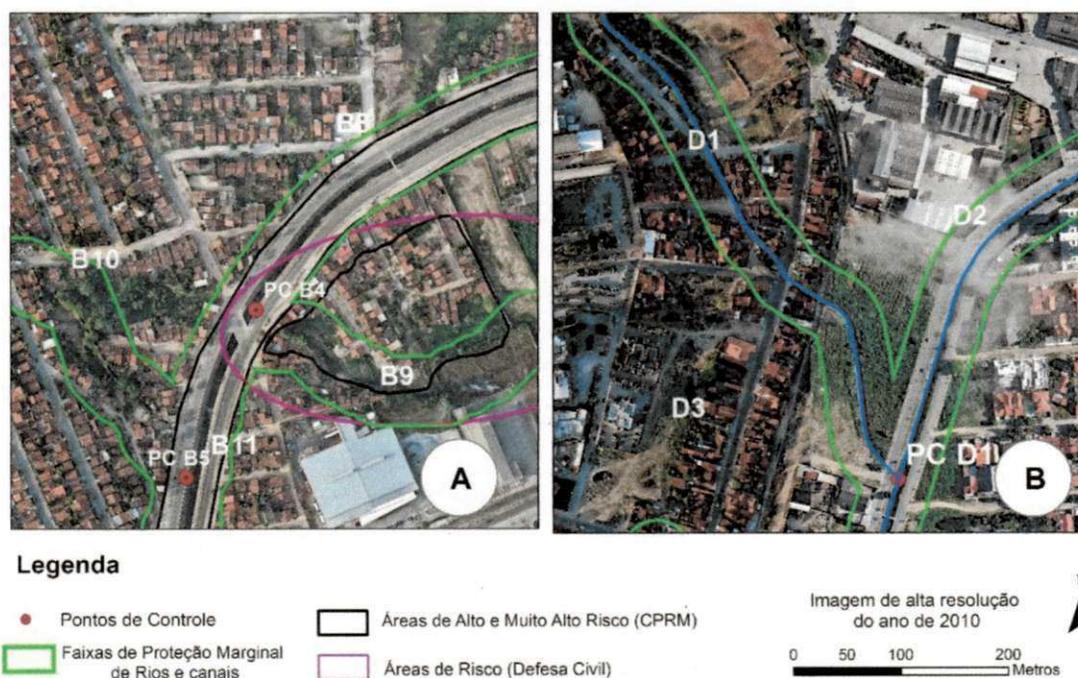
Através da comparação entre os mapas de percentual de impermeabilização e densidade populacional (Figura 5.4), de um modo geral, observa-se a relação já diagnosticada e justificada entre densidade populacional e impermeabilização (quanto mais densa a ocupação, maior a impermeabilização). Esta relação é melhor observada se consideradas as bacias do Riacho de Bodocongó e do Prado separadamente. Isso ocorre devido aos padrões de ocupação diferentes. As sub-bacias localizadas na área central da cidade apresentam as maiores taxas de impermeabilização, mesmo aquelas que não apresentam densidade tão expressiva. As diferenças são observadas tanto nos lotes (edificações ocupando maior percentual do lote e áreas livres do lote mais impermeabilizadas), quanto nas vias (percentuais maiores das bacias ocupadas por vias pavimentadas). O padrão de ocupação nos lotes foi inserido na análise de

duas formas: o cálculo do percentual do lote ocupado por edificação e o valor de T_x (percentual de área livre impermeabilizada no lote) da Equação 4.7, estimado através da análise visual.

A sub-bacia D8 também representa uma “singularidade”, pois apresenta baixa densidade populacional (544 hab/ km²) e percentual de impermeabilização igual a 62% por se tratar de uma área predominantemente industrial, localizada no bairro do Distrito Industrial. Nota-se que o uso do solo, informação que é ainda mais dinâmica que a própria ocupação, interfere consideravelmente na impermeabilização do solo e, conseqüentemente, no escoamento, de modo que ressalta a necessidade de considerar esses zoneamentos na discretização da bacia.

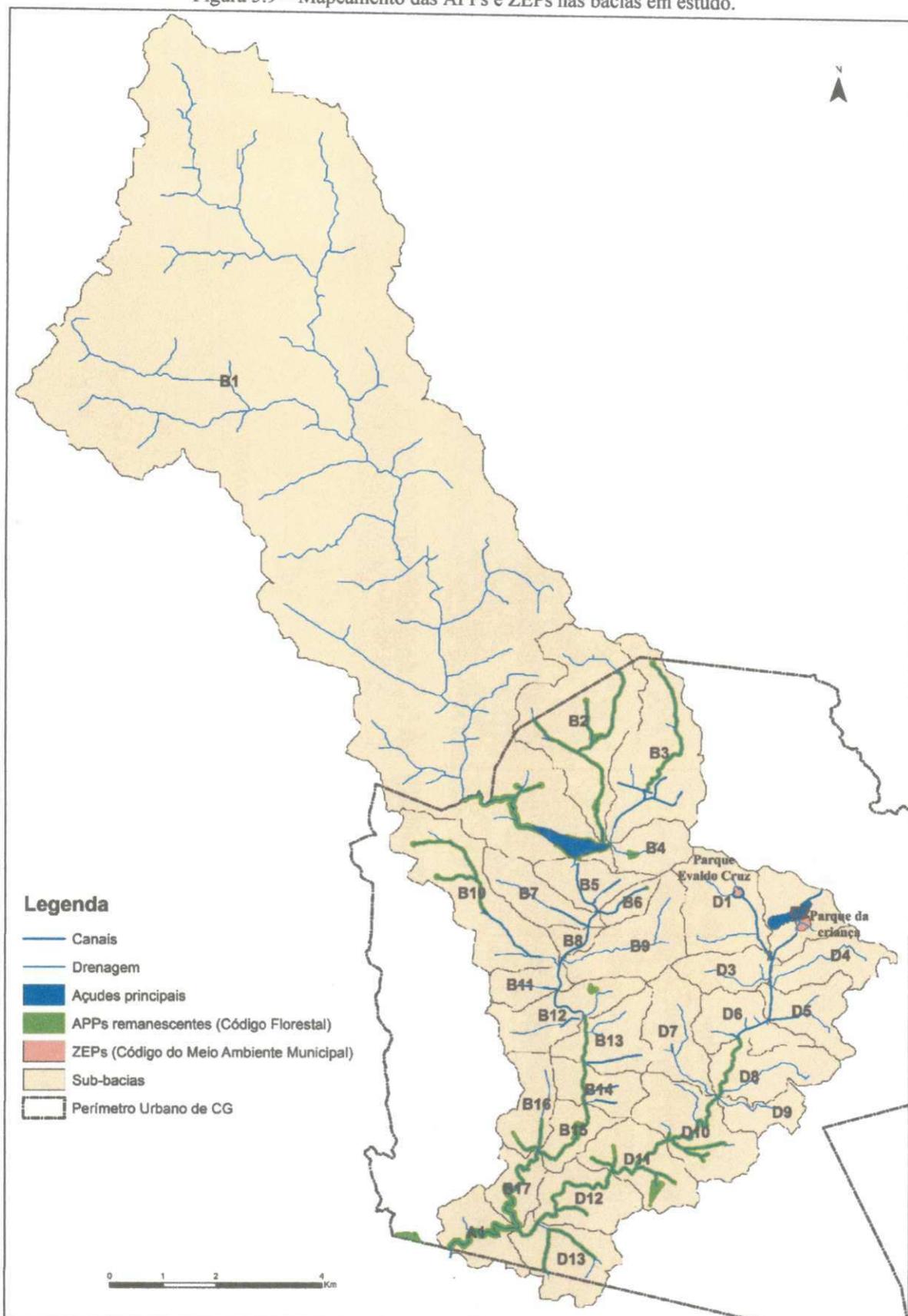
O mapeamento das APPs, referentes às margens de cursos e reservatórios d’água, sobreposto a uma imagem de alta resolução da cidade, permite observar a ocupação e impermeabilização das mesmas, conforme pode ser visto na Figura 5.8. Em contrapartida, os valores de CN encontrados no cenário de expansão urbana apontam para a importância de se conservar tais áreas para a capacidade de suporte do sistema de drenagem. Devido à impermeabilização já avançada de algumas áreas de preservação e às condições de contorno adotadas neste estudo, descritas no capítulo de metodologia, o mapeamento de áreas a serem protegidas, considerado no cenário de expansão urbana, encontra-se na Figura 5.9.

Figura 5.8 - Overlay de APPs delimitadas sobre imagem aérea



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.9 – Mapeamento das APPs e ZEPs nas bacias em estudo.



Fonte: Próprio autor

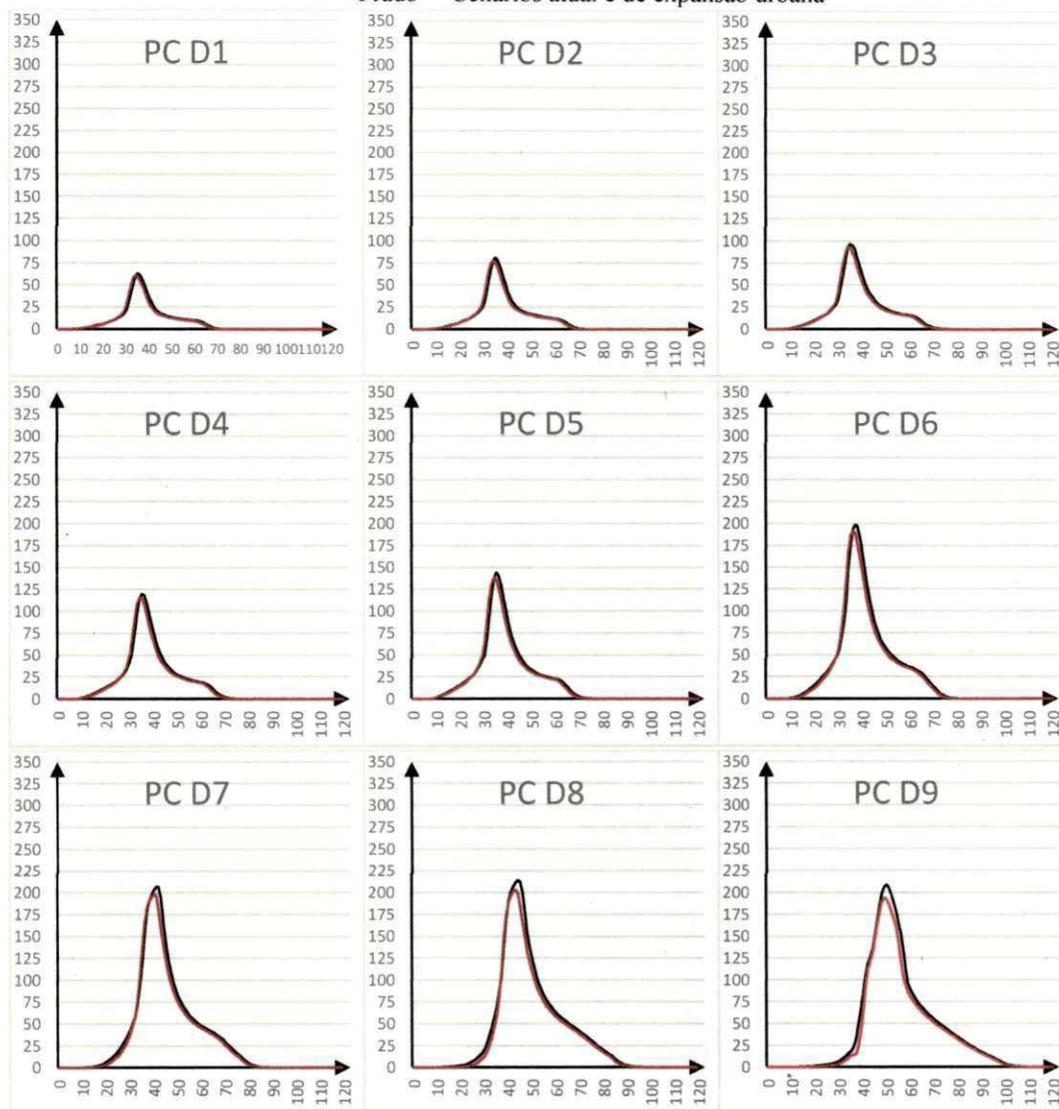
Durante a interpretação fotogramétrica para classificação da cobertura do solo, foi verificado que as praças existentes no município, de um modo geral apresentam pouca cobertura vegetal o que também está relacionado ao clima semiárido, apesar de também haver, por exemplo, o Parque da Criança, cuja área verde ocupa um espaço significativo. Enfatiza-se, portanto, que a ação de abertura e requalificação destas áreas é essencial a fim de modificar este cenário para propiciar o escoamento, além de promover com isso sua função social de lazer e saúde à população.

O valor mais baixo da sub-bacia D1, comparado às outras ao redor, tanto no cenário atual quanto no de expansão urbana, enfatiza a importância da qualificação do espaço verde no Parque Evaldo Cruz (Zonas Especial de Preservação), por se tratar de uma região densamente ocupada e devido à infiltração facilitada pelo tipo de solo da maior parte da bacia. Nas bacias em processo de ocupação, as margens dos cursos d'água, se conservadas, também podem impedir um CN exageradamente alto.

5.3 HIDROGRAMAS DE CHEIA

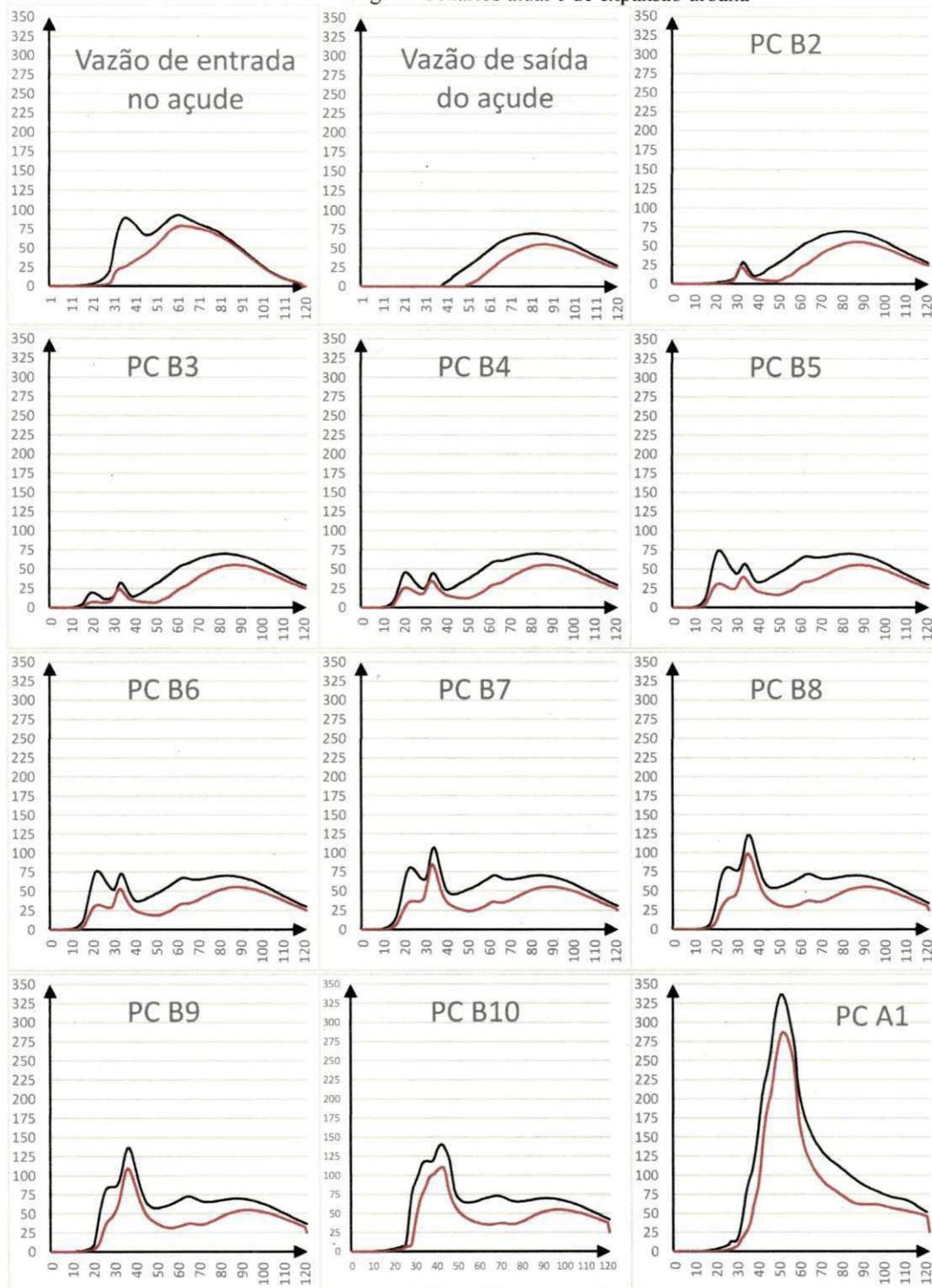
Como a diferença entre os hidrogramas gerados para os dois cenários é mais perceptível para a chuva com tempo de retorno menor – 10 anos - (devido principalmente à maior diferença percentual da vazão de pico), eles estão apresentados na Figura 5.10, a fim de permitir a observação de como se dá a contribuição das sub-bacias estudadas nos riachos principais, através dos pontos de controle. Na Tabela 5.2, estão registrados os tempos de máxima e as vazões máximas em cada PC, para chuvas com tempo de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos, obtidos para os dois cenários, assim como a acréscimo percentual encontrado.

Figura 5.10 - Hidrogramas nos Pontos de Controle (Intervalos de tempos Δt versus vazão) na Bacia do Riacho do Prado – Cenários atual e de expansão urbana



Fonte: Próprio autor

Figura 5.11 - Hidrogramas nos Pontos de Controle (Intervalos de tempos Δt versus vazão) na Bacia do Riacho de Bodocongó – Cenários atual e de expansão urbana



Fonte: Próprio autor

Onde T é o número de intervalos de tempo para máxima vazão (6 min) e Q a vazão (m^3/s).

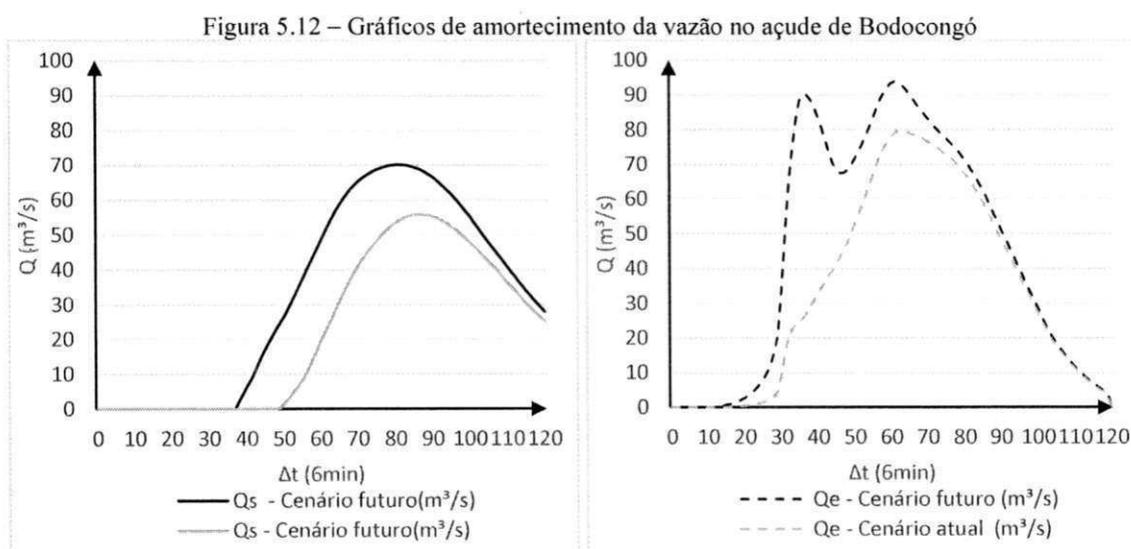
Tabela 5.2 - Valores de vazão de pico e correspondente tempo de ocorrência para diferentes tempos de retorno.

PCs	Cenário atual								Cenário de expansão urbana								Aumento da vazão de pico			
	10 anos		25 anos		50 anos		100 anos		10 anos		25 anos		50 anos		100 anos		10 anos	25 anos	50 anos	100 anos
	ΔT	Q	ΔT	Q	ΔT	Q	ΔT	Q	ΔT	Q	ΔT	Q	ΔT	Q	ΔT	Q	ΔQ (%)	ΔQ (%)	ΔQ (%)	ΔQ (%)
PCD1	34	61,8	34	79	34	94,6	34	112,7	34	63,1	34	80,6	34	96,2	34	114,2	25,6	15,6	12,7	10,5
PCD2	34	78,1	34	100,2	34	120,1	34	143,2	34	80,5	34	102,8	34	122,7	34	145,7	25,6	15,6	12,7	10,5
PCD3	34	93,4	34	119,6	34	143,2	34	170,6	34	96,5	34	122,9	34	146,4	34	173,6	25,6	15,6	12,7	10,5
PCD4	34	115,9	34	148,1	34	177,2	34	210,8	34	119,8	34	152,2	34	181,1	34	214,5	25,6	15,6	12,8	10,5
PCD5	34	138,9	34	177,3	34	212	34	252,1	34	143,5	34	182	34	216,6	34	256,4	33,6	15,7	12,7	10,5
PCD6	36	191,6	37	228,4	37	273,3	37	329,2	36	198,3	37	235,6	37	281,1	37	337,2	37,4	15,7	12,7	10,5
PCD7	40	198,6	41	243	40	289,7	40	345,1	40	206,5	41	252,5	41	299,5	41	357,4	26,5	20,4	14,9	10,5
PCD8	43	203,4	44	247,1	44	295,4	44	356,1	43	213,8	44	259,5	44	308,2	44	368,4	24,1	15,3	17,0	10,2
PCD9	49	194,2	50	243,3	49	293,3	48	356,4	49	208,8	49	258	49	308,1	48	371,8	23,9	14,3	14,4	14,2
PCB1	87	55,8	83	100,3	82	142,2	81	198,6	81	70,1	79	116	79	160,3	79	219,5	26,4	18,7	18,2	15,5
PCB2	87	55,8	84	100,3	83	142,2	82	198,6	81	70,1	80	116	79	160,3	79	219,4	2,2	2,1	1,7	1,4
PCB3	87	55,8	84	100,3	83	142,2	82	198,6	82	70	80	116	80	160,3	80	219,4	3,1	2,7	2,2	1,7
PCB4	88	55,8	84	100,3	83	142,1	83	198,6	82	70	80	116	80	160,2	80	219,4	3,3	2,8	2,2	1,8
PCB5	88	55,8	84	100,3	83	142,1	83	198,5	21	74,5	80	116	80	160,2	80	219,4	3,4	2,8	2,2	1,8
PCB6	88	55,7	85	100,3	84	142,1	83	198,5	21	76,6	80	116	81	160,2	80	219,3	3,3	2,7	2,1	1,7
PCB7	33	85	33	114	84	142,1	84	198,4	33	107,5	33	137,3	33	163,3	81	219,2	3,5	3,2	2,8	2,4
PCB8	35	99,2	35	131,6	35	155	87	197,5	35	123,1	35	151,7	35	181,4	35	217,6	4,0	3,9	3,4	3,5
PCB9	36	110,2	36	146,9	36	173,2	36	204,4	36	136,5	36	167,9	36	198,1	36	233,4	5,1	5,0	4,3	3,4
PC10	42	111,2	41	150,1	41	182	40	222,3	41	140,6	40	178,1	40	215,2	40	256,8	7,5	6,1	5,1	4,3
PCA1	51	288	51	376,7	51	457,6	49	564,1	50	336,1	50	423,6	50	508,9	48	617,7	16,7	12,4	11,2	9,5

Fonte: Próprio autor

Onde ΔT é o número de intervalos de tempo para máxima vazão (6 min) e Q a vazão de pico (m^3/s).

Os resultados da transformação chuva-vazão apontam relativa compatibilidade com as informações de vazão máxima presentes no mapa de fluxos das sub-bacias da prefeitura, sendo superiores na maioria dos casos, o que pode ser justificado por questões como o aumento da impermeabilização, retenção não avaliada no Açude Velho, etc. Contudo, provavelmente são valores estimados pelo método racional e não há informações suficientes nos documentos analisados que garantam a validação dos dados estimados. Diante do efeito da detenção proporcionada pelo açude de Bodocongó, salienta-se a necessidade de levantamentos batimétricos do reservatório e novo levantamento topográfico da área da bacia hidráulica acima do nível do vertedor. Essas informações permitiriam simulações com maior grau de confiança. Tal detenção figura ainda maior importância no cenário de expansão urbana, ao provocar, além do amortecimento da onda de cheia, significativo retardo do primeiro pico, que surge com a impermeabilização simulada nas bacias B2 e B3, localizadas a montante do reservatório. O amortecimento provocado pode ser melhor observado nos gráficos da Figura 5.12:



Fonte: Próprio autor

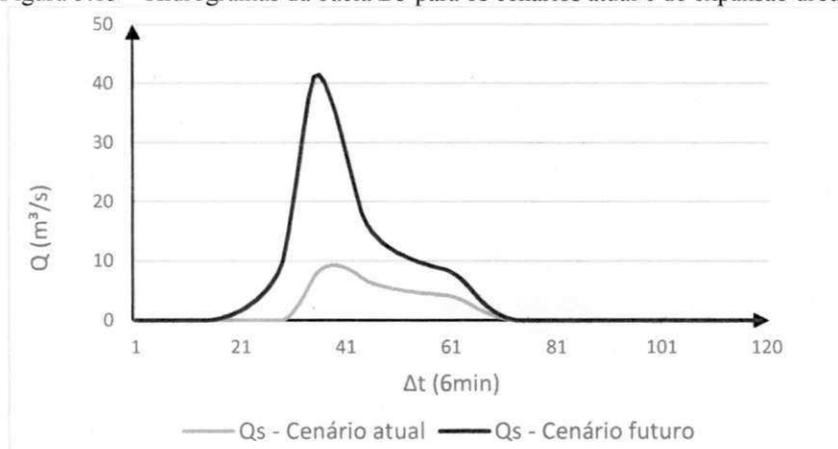
O conhecimento acerca de algumas ações implementadas ou planejadas para a região a montante do reservatório mostram-se como incentivos a sua ocupação, tais como a construção de empreendimentos habitacionais do Programa Minha Casa Minha Vida, e o projeto de urbanização do açude de Bodocongó, orçado em aproximadamente 35 milhões de Reais (Estado da Paraíba, 2014). Este projeto prevê tanto a dragagem do açude (bastante benéfica ao sistema de drenagem), como também uma melhor condição de vida da população usuária de seu

entorno. O planejamento deve estudar as possíveis mudanças na capacidade do sistema que tais intervenções podem acarretar, e regular a ocupação considerando estes aspectos.

Na Bacia do Riacho de Bodocongó, diferenças consideráveis são notadas nas vazões de pico simuladas pelos dois cenários, chegando a taxas de quase 40%, e provocando reduções maiores no tempo de máxima (Tabela 5.2 e Figura 5.7). A vazão de saída do açude de Bodocongó governa a vazão máxima no início do riacho, que em seguida é superada por um pico antecedente que se forma através da soma das vazões das sub-bacias a jusante do açude, com tempo de máxima consideravelmente inferior. Por esta razão, nota-se que a vazão máxima nos pontos de controle PC B1 a PC B6 mantém-se constante, uma vez que as contribuições das bacias a jusante do açude se somam em um tempo menor, não interferindo no valor da vazão de pico gerada pela bacia a montante do açude. A partir do PC B7, a vazão máxima passa a ser resultante do primeiro pico de vazão. Essa mudança é observada em diferentes pontos de controle, de acordo com a chuva e o cenário simulados. Ela só ocorre no trecho canalizado, na simulação que considera a precipitação com TR igual a 10 anos e o cenário de expansão urbana. Observa-se ainda que para as precipitações com TR maior, a mudança demora mais a ocorrer.

No que diz respeito às diferenças percentuais na vazão de pico, vale salientar que analisando a bacia individualmente, diferenças muito superiores são observadas quando analisadas as bacias de forma individual. A bacia B3, por exemplo, que tem a maior taxa de impermeabilização quando comparados os dois cenários, tem um aumento de aproximadamente 350% (Figura 5.13)

Figura 5.13 – Hidrogramas da bacia B3 para os cenários atual e de expansão urbana



Fonte: Próprio autor

Já na Bacia do Riacho do Prado, como reflexo dos resultados encontrados para o valor da curva número (CN), o aumento da vazão de pico, provocado pela impermeabilização

simulada, é pouco percebido (Figura 5.10 e Tabela 5.2), especialmente nas sub-bacias localizadas próximas ao centro da cidade, por serem áreas que já apresentam altas taxas de impermeabilização. Medidas que permitam, na medida do possível, retroagir a impermeabilização devem ser estimuladas nessas áreas, como a troca de pavimentos impermeáveis por aqueles permeáveis, ou melhoria dos espaços abertos. As suas sub-bacias tem tempos de concentração semelhantes, o que leva a um único pico com um alto valor de vazão. Observa-se que há uma redução da vazão de pico quando comparados os pontos de controle PC D8 e PC D9, o que é ocasionado pelo armazenamento em um trecho que apresenta baixa declividade, amortecendo o pico, que não é compensada pela soma do hidrograma da sub-bacia D12.

Outro ponto que merece atenção no que diz respeito ao planejamento da ocupação e dos custos com infraestrutura de drenagem é o fato de que os fluxos das duas bacias estudadas, que já tiveram elevada interferência antrópica, se somam ainda em área urbana, e tem seus picos ocorrendo em tempos similares (PC A1). Deve-se, portanto, ter uma maior atenção na ocupação desta área.

5.4 ANÁLISE PRELIMINAR DA CAPACIDADE DE SUPORTE DO SISTEMA DE DRENAGEM

5.4.1 Análise do trecho canalizado

A análise da capacidade de escoamento dos canais será feita através das seções transversais nos pontos de controle (Figura 4.11), nas quais estão representadas as lâminas d'água nas cheias com TR de 10, 25, 50 e 100 anos, considerando os dois cenários. As Figuras 5.14 a 5.17 correspondem às seções de controle do canal do Prado. E as Figuras 5.18 a 5.23 correspondem às seções de controle do canal de Bodocongó.

Para o cenário atual, o canal inteiro suportou apenas chuvas com tempo de retorno de 10 anos, havendo extravasamento para chuvas com TR de 25 anos nos dois últimos pontos de controle. Para o cenário de expansão urbana, ocorre o mesmo (esperado pelas poucas diferenças entre os picos de vazão obtidos nos dois cenários), mas para este, até a simulação com TR de 10 anos, tem a lâmina d'água atingindo o seu limite. Extravasamentos, entretanto, não são diagnosticados pelos órgãos competentes, nem noticiados pelos jornais. Uma superestimativa pode estar relacionada à chuva com duração de seis horas, retenção no Açude Velho, ou a avaliação do solo como pertencente ao grupo hidrológico D. Ainda, existem vários pontos na

Bacia do Riacho do Prado que sofrem com alagamentos, e tal retenção provocada por problemas na microdrenagem ou macrodrenagem afluente ao riacho principal, pode reduzir a dimensão das cheias no canal principal.

Figura 5.14 - Seção transversal do canal de Prado a jusante do PCD 1 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de legislação de expansão urbana.

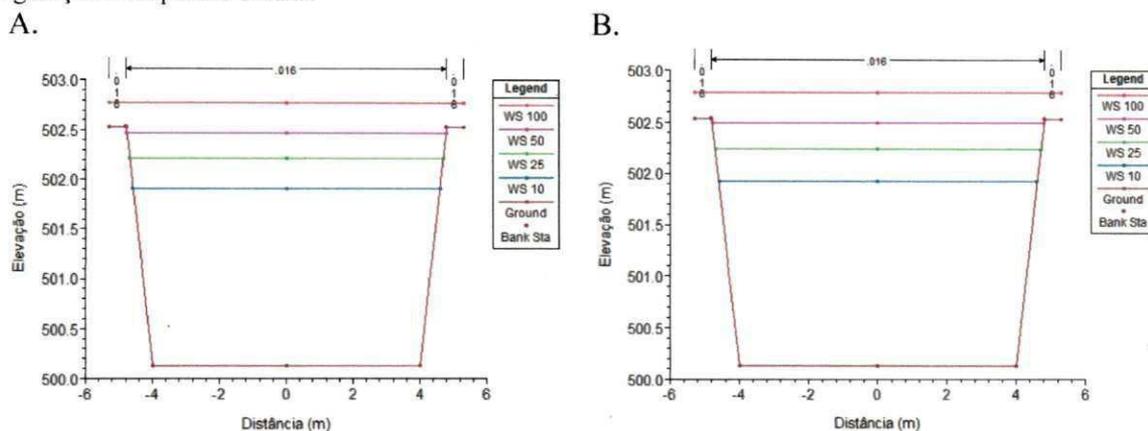


Figura 5.15 - Seção transversal do canal de Prado a jusante do PCD 2 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de legislação de expansão urbana

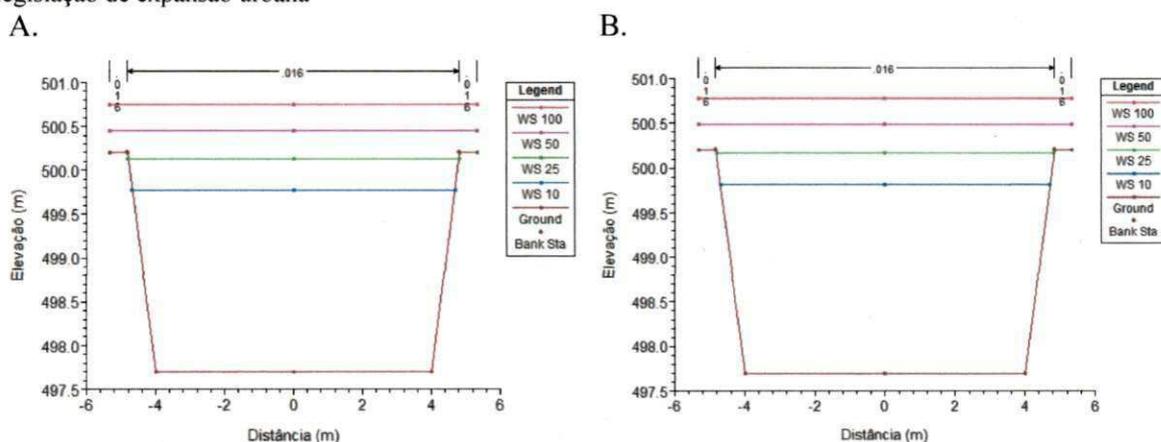


Figura 5.16 - Seção transversal do canal de Prado a jusante do PCD 3 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de legislação de expansão urbana

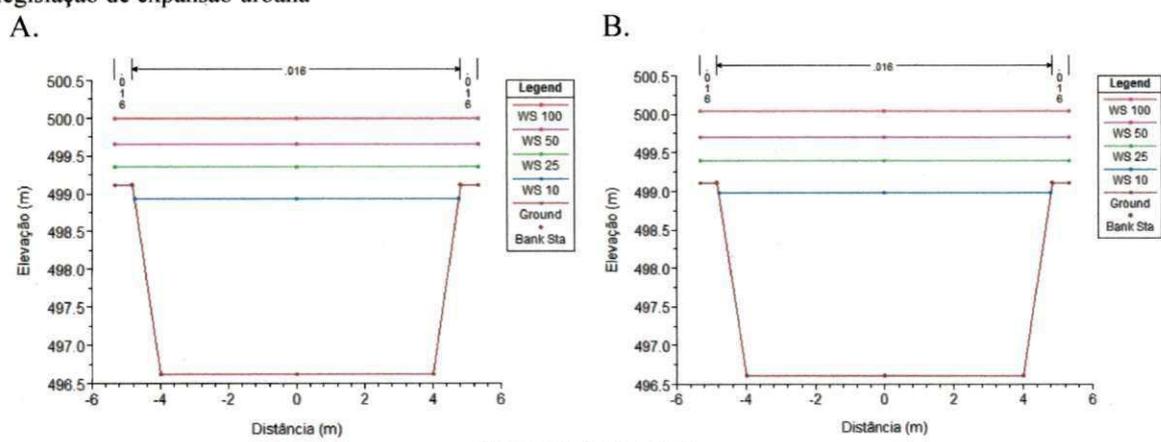
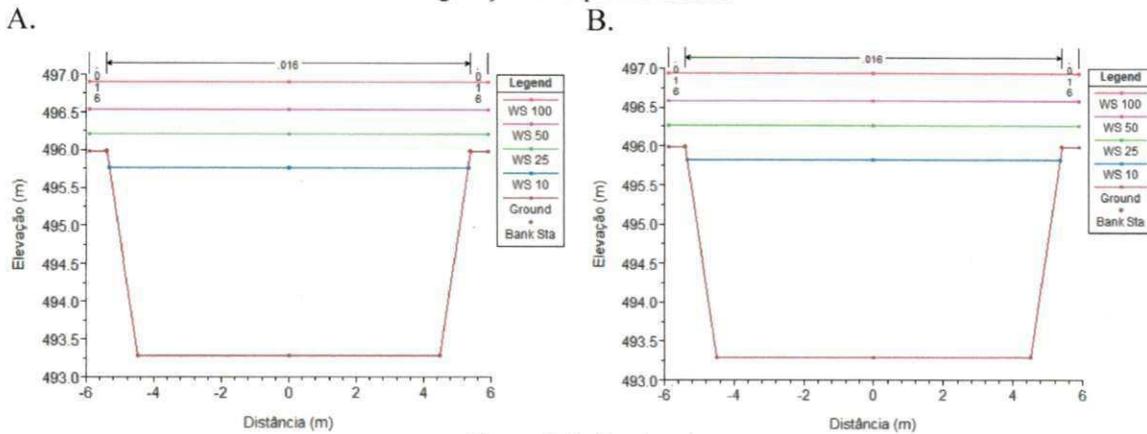
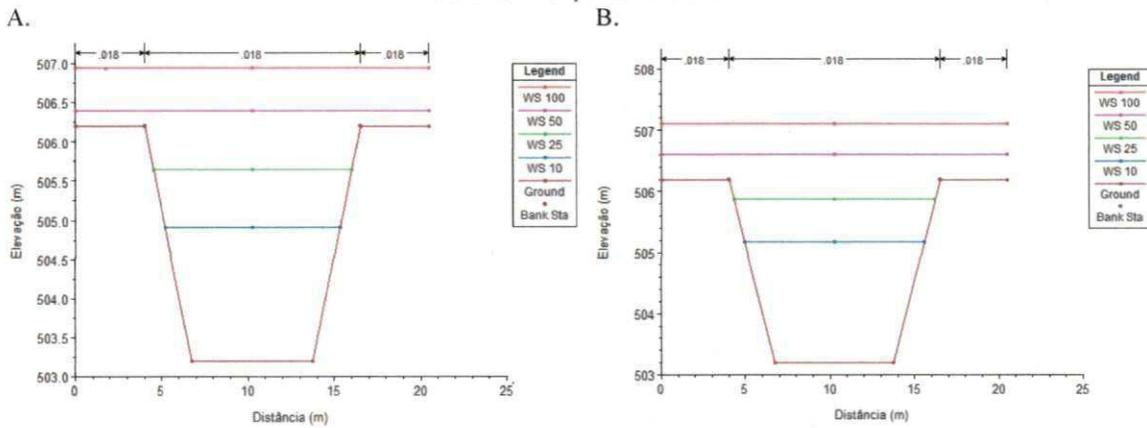


Figura 5.17 - Seção transversal do canal de Prado a jusante do PCD 4 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de legislação de expansão urbana



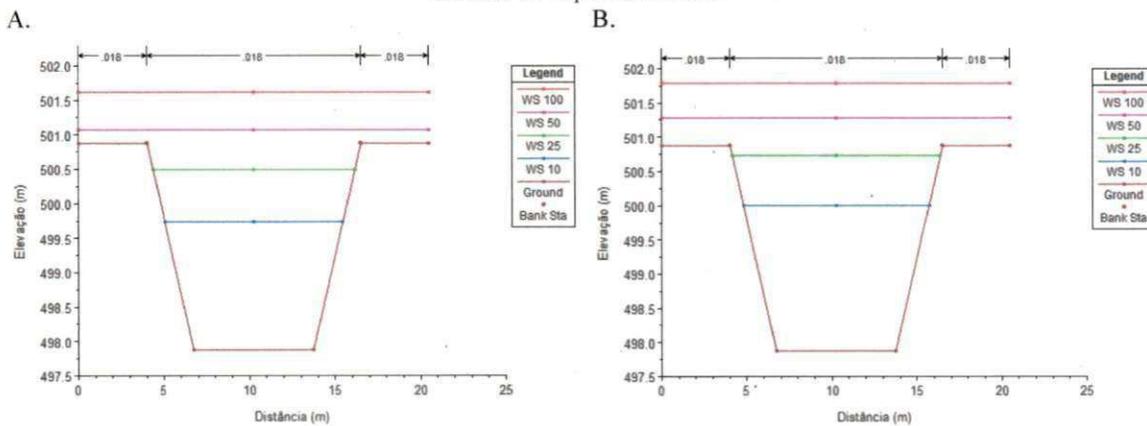
Fonte: Próprio autor

Figura 5.18 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 1 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana



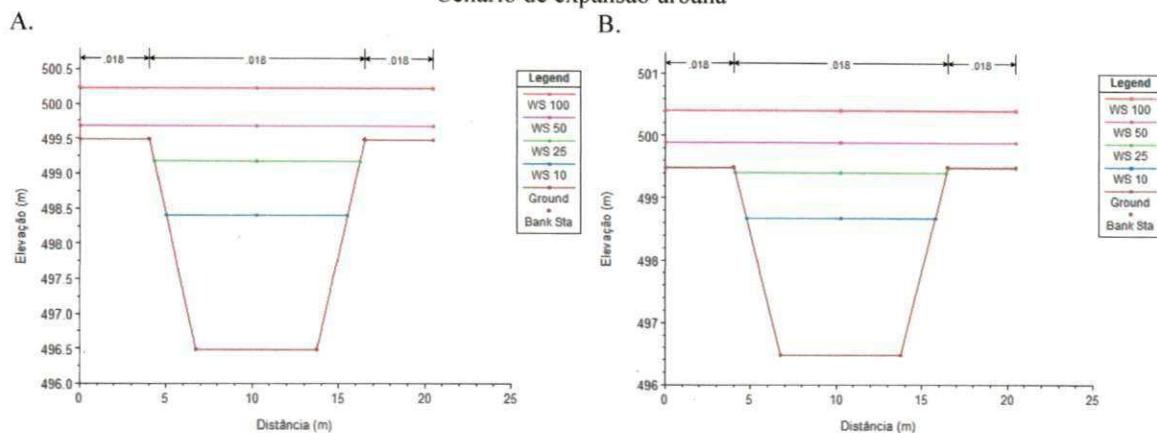
Fonte: Próprio autor

Figura 5.19 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 2 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana



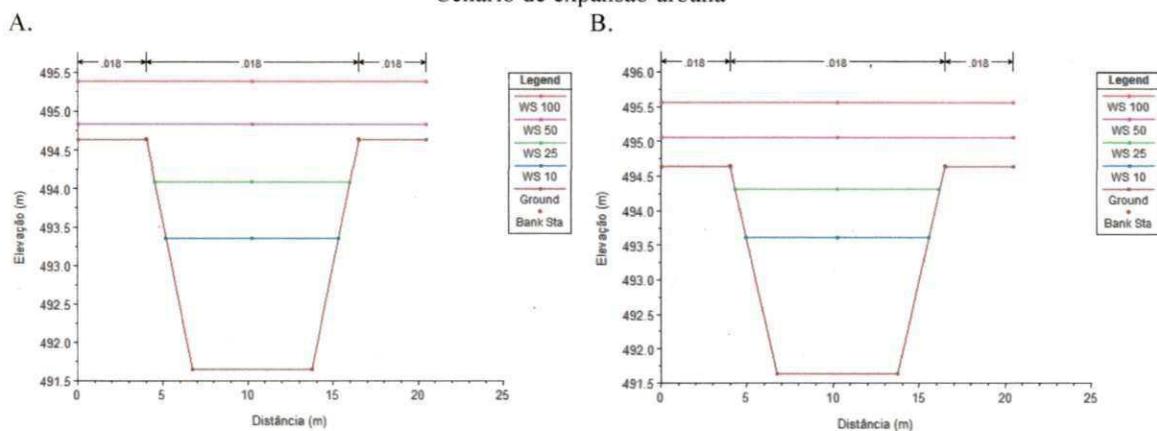
Fonte: Próprio autor

Figura 5.20 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 3 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana



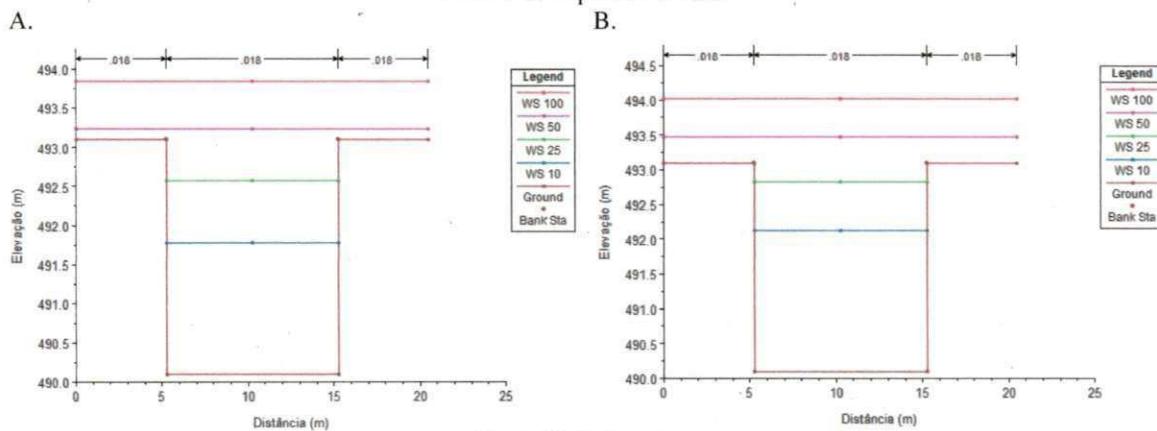
Fonte: Próprio autor

Figura 5.21 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 4 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana



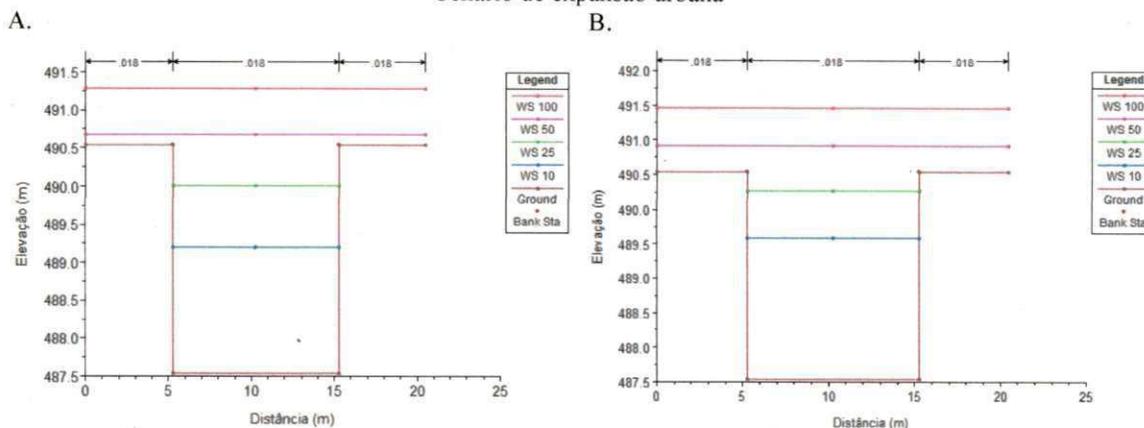
Fonte: Próprio autor

Figura 5.22 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 5 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana



Fonte: Próprio autor

Figura 5.23 - Seção transversal do canal de Bodocongó a jusante do PCB 6 em (A) cenário atual e em (B) Cenário de expansão urbana



Fonte: Próprio autor

No canal de Bodocongó, verifica-se transbordamento do canal apenas diante de eventos pluviométricos com período de retorno de 50 e 100 anos. No cenário atual, para TR igual a 25 anos, verifica-se um nível d'água próximo à extremidade, restando uma folga no entorno de 50 cm. No cenário de expansão urbana, também o canal extravasa apenas para os tempos de retorno de 50 e 100 anos, mas nas simulações para o período de retorno de 25 anos, nas seções transversais controladas pelos PCs B2 e B3, o nível d'água alcança o limite e, nos PCs B5 e B6, a folga é inferior a 20 centímetros.

A avaliação das mudanças nos PCs B5 e B6 é interessante para dar a devida atenção à área superior da Bacia B10, não ocupada, localizada na zona de expansão urbana do Plano Diretor Municipal (PMCG, 2006), de modo a não apenas se preocupar com a infraestrutura de drenagem, mas também com a ocupação do solo em sua fase de planejamento.

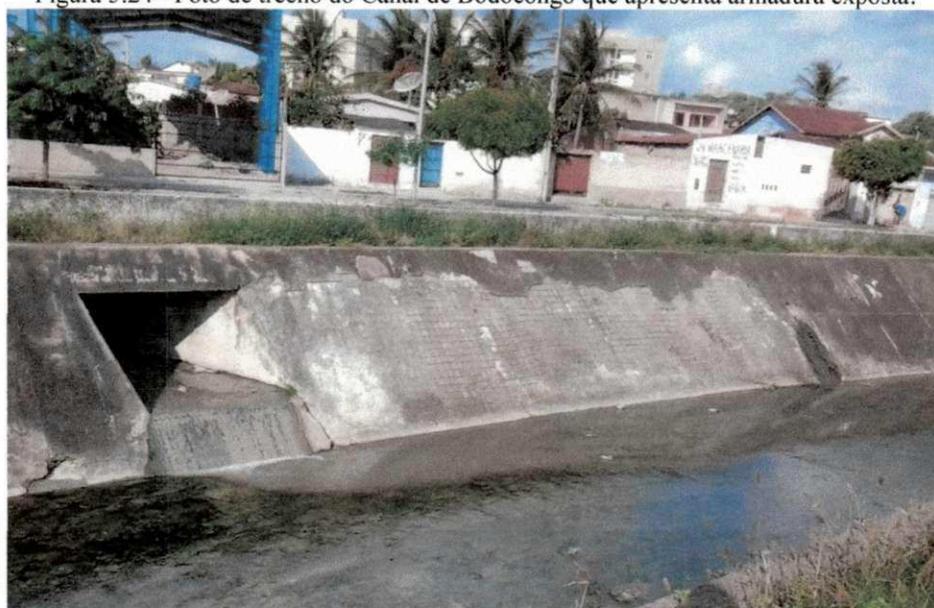
Nas simulações, não foram consideradas obstruções nos canais. Contudo, em muitos pontos do canal de Bodocongó, é observada a presença de lixo, além de armaduras expostas (conforme pode ser visto na foto da Figura 5.24, que registra um trecho do canal). As contribuições de ligações de esgoto ao sistema de drenagem pluvial já diagnosticadas também não foram avaliadas. Estes fatores reduzem a capacidade do canal, e devem levar a situações piores do que as simuladas.

Uma área do canal de Bodocongó (no seu trecho que percorre as sub-bacias B5 a B11, conforme Figura 4.18) é diagnosticada como uma área de alto risco pelo perigo de erosão do revestimento do canal. No trecho analisado (PC B1 a PC B6), não são verificados

extravasamentos, mas elevados níveis de águas em eventos mais extremos, para períodos de retorno de 25 anos.

O extravasamento do canal é diagnosticado pela CPRM próximo ao ponto de controle PCB7. Na simulação, o canal demonstrou suportar chuvas com tempo de retorno de 25 anos, extravasando apenas para TR igual a 50 anos. Contudo, a CPRM detectou excesso de lixo dificultando o escoamento. Além disso, a transição do trecho canalizado para o natural pode ter também influência sobre o extravasamento do canal, o que deve ser melhor analisado.

Figura 5.24 - Foto de trecho do Canal de Bodocongó que apresenta armadura exposta.

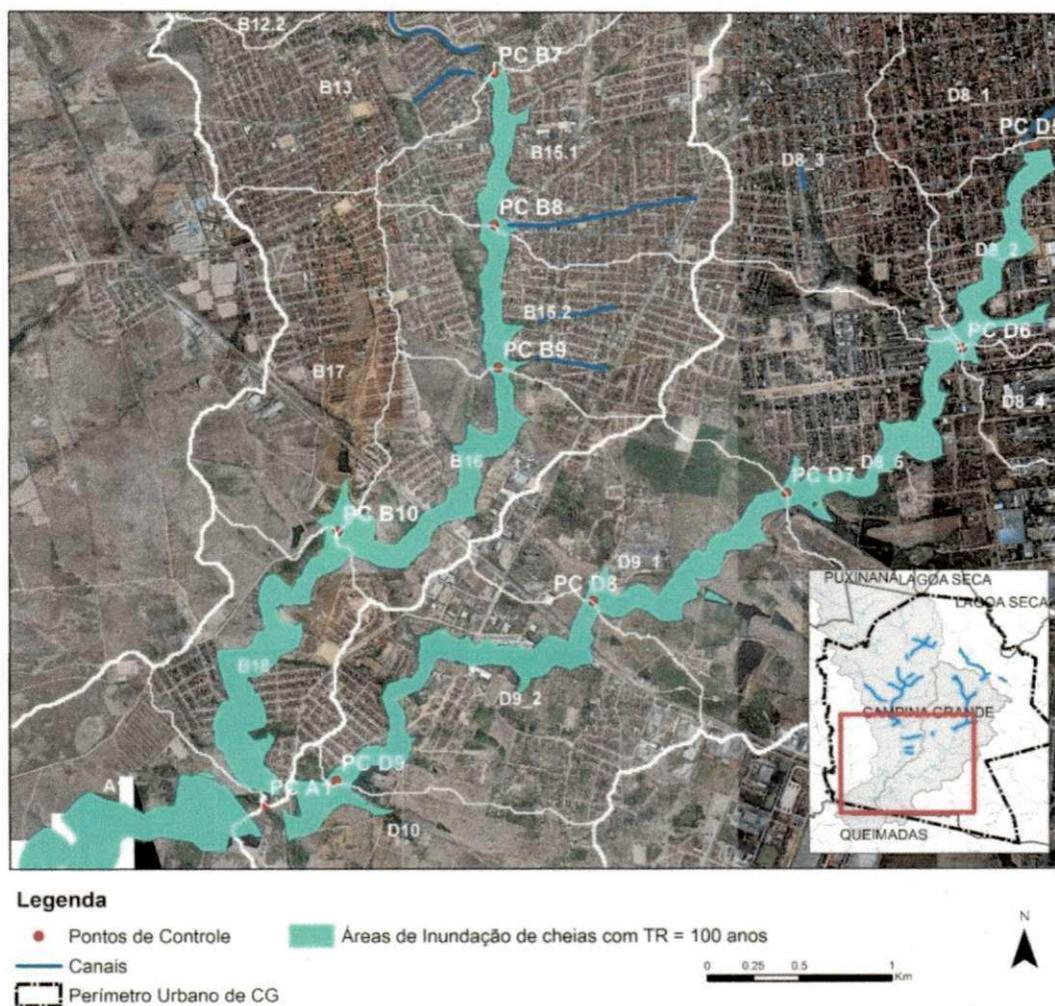


Fonte: PMSB, 2015.

5.4.2 Análise dos mapas de inundação

Ao analisar o mapa de inundação (Figura 5.25), comparando-o com o mapeamento das APPs (Figura 5.9), observa-se que ao longo de todo riacho, se houvesse sido respeitado o limite imposto pelo Código Florestal no que diz respeito às APPs, muitos problemas relacionados a casas alagadas seriam evitados. O fato das faixas estabelecidas no CF não serem suficientes para resolver o problema em sua totalidade demonstra que estas faixas ao longo dos rios, descritas neste código, correspondem a exigências mínimas, de modo que são necessários estudos locais para mapear e proteger as planícies de inundação.

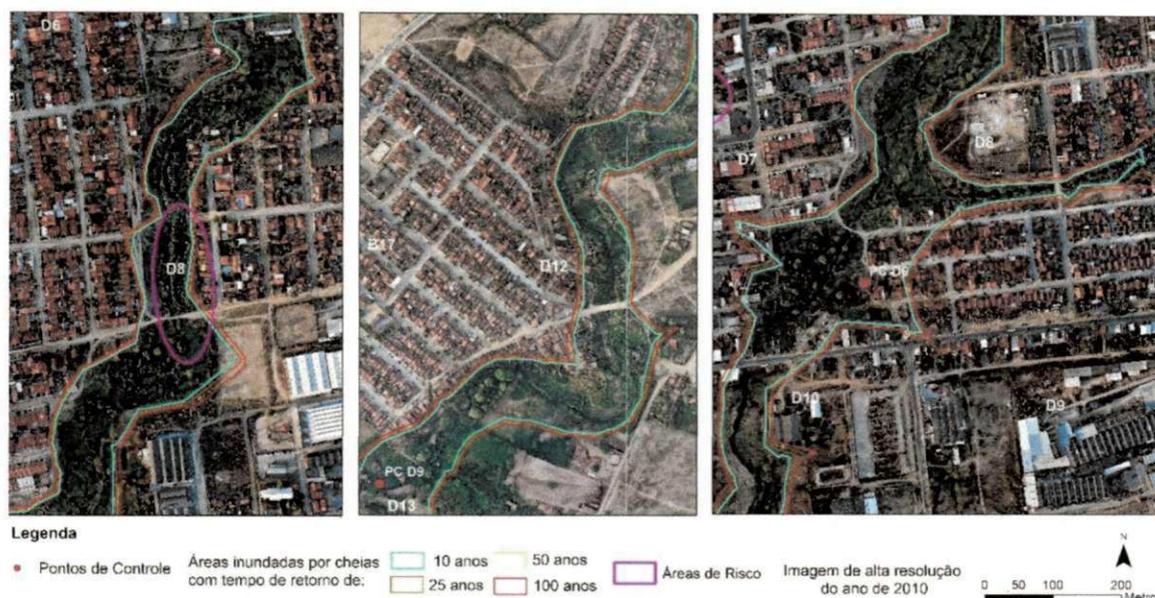
Figura 5.25 - Mapa de inundação ao longo do riacho principal das bacias.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 5.19, são ampliadas as áreas da planície de inundação na Bacia do Riacho do Prado que tem habitações atingidas pelas cheias simuladas. A região apontada na Figura 5.19A, no Riacho do Prado, próxima à rua Maurício Travassos de Moura, é uma das áreas apontadas pela Defesa Civil por apresentar problemas de alagamento. As outras duas (B e C) não foram apontadas nos registros, o que pode ser explicado por uma possível superestimativa da vazão nesse riacho, como descrito acima, mas a verificação é recomendada.

Figura 5.26 - Áreas críticas ao longo do Riacho do Prado



Fonte: Próprio autor

Na Figura 5.27 são ampliadas as áreas da planície de inundação na Bacia do Riacho de Bodocongó que tem habitações atingidas pelas cheias simuladas. Na Figura 5.27^a, observa-se que já no início do riacho, ao fim do canal, as cheias simuladas alagam habitações ribeirinhas. Na Figura 5.27B, verifica-se uma grande quantidade de casas atingidas, no Bairro das Cidades. Trata-se do riacho na sub-bacia A1, onde se somam os fluxos das duas bacias estudadas. As duas áreas são mapeadas pela CPRM como área de alto risco. A primeira é assim classificada devido ao extravasamento do canal do riacho do Bodocongó atingindo as casas que foram construídas nas margens do canal. A segunda área apresenta casas consideradas de médio a baixo padrão construtivo sujeita a elevações temporárias do nível d'água na planície fluvial de rio, onde são notadas trincas nas casas, vazamento da rede de esgoto e acúmulo de lixo e entulho, conforme CPRM. Outras casas ao longo do riacho estão dentro da planície de inundação, mas talvez por sofrerem menos danos não foram identificadas como áreas de alto risco.

Tais áreas críticas devem ser observadas para implementar as medidas imediatas, devido ao caráter de urgência associado ao risco aos bens e à vida da população, como a relocação das pessoas que vivem em moradias frequentemente atingidas pelas cheias. O mapeamento das demais áreas deve ser analisado para impedir a sua ocupação.

Figura 5.27 - Áreas críticas ao longo do Riacho do Bodocongó



Fonte: Próprio autor

5.5 ANÁLISES GERAIS DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

A renaturalização dos rios e proteção da vegetação em suas margens, devem ser questões discutidas de modo a desfazer a imagem de desinteresse por essas áreas. Entende-se que por serem áreas que sofrem com problemas de alagamentos e salubridade devido a lixos e esgotos despejados, mostram-se indesejadas pela parcela da população que tem maior poder aquisitivo e se tornam alvo de ocupações irregulares.

O estudo apresentado já se encontra subsidiando a elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico de Campina Grande, o qual é carente de informações para o planejamento da drenagem. A metodologia aplicada neste estudo está na mesma linha de outras pesquisas que deram suporte à elaboração de planos e torna possível uma estimativa de vazão e uma avaliação preliminar da capacidade de escoamento. Além disso, pretende-se, com estes resultados, estabelecer uma comunicação mais eficiente entre técnicos e gestores.

A legislação de uso e ocupação do solo de uma área urbanizada deve prever os direitos e obrigações de cada um dos envolvidos, além de utilizar suas medidas embasadas nos estudos técnicos desenvolvidos para os sistemas de macro e micro drenagem.

A partir da análise da macrodrenagem realizada, em posse do banco de dados construído nesta pesquisa, é importante estimular a busca por informações da rede de microdrenagem, a fim de realizar estudos nesta escala, onde entende-se que os impactos serão maiores e onde são observados os grandes problemas de funcionamento do sistema por falta de fiscalização e pela grande quantidade de elementos de interferência (obstruções causadas por lixo acumulado, falta de limpeza regular, elementos de sistemas de abastecimento presentes, esgotos clandestinos despejados no sistema de drenagem pluvial, etc).

A análise preliminar da capacidade do sistema nos riachos e canais, de um modo geral, é compatível com diagnósticos realizados através de relatos de alagamentos e análise visual do comportamento do fluxo pela CPRM e Defesa Civil Municipal. Entretanto, é evidente a importância da calibração e validação do modelo, através de dados mais precisos e de escala mais refinada de precipitação e vazão. Desse modo é urgente a necessidade de equipar o sistema de drenagem da cidade com medidores e estações para monitoramento contínuo, de modo a obter dados que permitam a estimativa de parâmetros necessários aos modelos, salientando que os modelos mais robustos, em geral, fornecem melhores resultados, mas também requerem mais parâmetros.

Estações pluviométricas e fluviométricas próximas às áreas críticas devem fazer parte de um futuro sistema de alerta. Adicionalmente, para suprir essa carência de forma imediata, sugere-se a utilização de câmeras para obter registros do nível de água no canal. Na cidade, existem algumas já implantadas para usos diversos como o controle de tráfego, e o seu aproveitamento para esta nova finalidade, possivelmente, seria viabilizado através de ajustes de localização e posicionamento. Pimentel (2009), por exemplo, realizou estimativas de vazão através de registro fotográfico do nível da soleira do pequeno vertedor próximo à foz do riacho.

6 CONCLUSÕES

O Modelo Digital de Elevação mostrou-se um dado valioso, para a delimitação e caracterização das sub-bacias e da rede de drenagem, e como *input* necessário à confecção dos mapas de inundação. As etapas seguintes do trabalho indicou a obtenção de um MDE hidrológicamente consistente, conhecidas as limitações impostas pela escala dos dados topográficos utilizados na sua elaboração.

Os SIGs (ArcGIS e TerraView) e os softwares de simulação hidrológica e hidráulica (IPHS1 e HEC-RAS), assim como a integração entre as duas ferramentas (através do HEC-GEORAS) foram fundamentais na solução de algoritmos e execução de processamentos que demandariam imenso tempo e esforço do analista. Em virtude da extensa mancha urbana como área de estudo, as geotecnologias possibilitaram o uso de técnicas que atribuíram celeridade e qualidade aos diversos mapeamentos, assim como permitiram o armazenamento e a organização necessários às tarefas realizadas.

Os modelos hidrológicos permitiram a estimativa de vazão, nas sub-bacias e bacias estudadas que, assim como a maioria das pequenas bacias, são carentes de dados medidos. Apesar das tabelas e gráficos para determinação do parâmetro CN serem calculadas empiricamente para bacias americanas, entende-se que a análise dos fatores para sua determinação e do método (como características dos grupos hidrológicos e o conceito de áreas impermeáveis conectadas), e um nível de informação mais refinado (o cálculo da média percentual de impermeabilização nos lotes, o conhecimento de tipo de cobertura das vias e o uso de um número maior de classes) devem levar a melhores estimativas

Observando o cenário atual em Campina Grande, verifica-se a impermeabilização e ocupações irregulares nas Áreas de Preservação Permanente (APPs) em sub-bacias mais urbanizadas. Nas duas bacias analisadas foram observadas áreas densamente ocupadas e com elevada impermeabilização, assim como a relação entre as duas variáveis. A relação foi observada através de médias por bacia, e pontos fora da curva ocorrem devido a variações do uso do solo e padrão de ocupação das mesmas.

As análises preliminares da capacidade dos canais apontam que no Riacho de Bodocongó as cheias com TR de 25 anos resultam na lâmina d'água (em algumas seções) beirando a altura máxima do canal, enquanto no Riacho do Prado, situação semelhante ocorre para o TR de 10 anos, na última seção. A análise de sensibilidade (comparando estes resultados com informações encontradas) apontam que resultados melhores foram obtidos na simulação para o canal de Bocongó e para uma superestimativa da vazão no canal do Prado, a ser investigada.

Os mapas de inundação apontam áreas críticas, cuja população residente, está sujeita a riscos e, portanto, requerem medidas mais urgentes. As semelhanças observadas entre os limites das faixas atingidas pelas cheias, e das APPs, ressaltam a necessidade da mudança de percepção, existente na área urbana, do rio como um elemento indesejado para um recurso vital ao equilíbrio ambiental.

Quando comparados os dois cenários, o atual e o de expansão urbana, o que foi possível através da modelagem, foi observado mudanças no comportamento da hidrógrafa, aumentos de vazão de pico que chegam a 37%, reduções no tempo de máxima de até uma hora, e elevações da lâmina d'água nos canais de até 40 cm, assim como o aumento percentual da vazão de pico da bacia B3 de 350%. Esses resultados apontam direcionamentos a um planejamento urbano sensível aos Recursos Hídricos e remetem à necessidade de implementar medidas legais que regulem a ocupação a partir de análises técnicas que considerem o sistema de drenagem, assim como indicam a necessidade de uma fiscalização maior do seu cumprimento.

A necessidade do planejamento considerar o sistema de drenagem sob uma perspectiva sustentável configura-se um desafio global, cuja solução precisa ser amparada também na menor escala, considerando aspectos locais, o que confere ao município maior responsabilidade em tarefas como o registro dos elementos que compõem este sistema, a caracterização física e de ocupação das bacias, e a implementação e fiscalização de leis que proporcionem o melhor ordenamento e uso do espaço. Os Índices urbanísticos, embasados em avaliações técnicas, devem estar claramente presentes nas leis de ocupação do solo, de modo a governar as diferentes zonas delimitadas no plano diretor, considerando suas características, assim como a capacidade de suporte das infraestruturas instaladas e planejadas.

Sabe-se da lacuna existente neste trabalho devido a ausência de dados que permitam calibrar e melhor validar os modelos e, portanto, enfatiza-se a urgência na implantação de pluviômetros e medidores de vazão. Contudo, a base de dados construída e descrita, as análises realizadas e os resultados obtidos e comparados com as informações existentes constituem subsídio a um planejamento do sistema de drenagem, e da cidade, mais eficaz e sustentável. Diante disto, esta pesquisa cumpre seu papel de pesquisa científica aplicada e mostra-se importante no processo de elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico de Campina Grande. O convênio entre a Universidade Federal de Campina Grande e a Secretaria de Planejamento Municipal representa uma iniciativa que se enquadra no "trabalho conjunto entre Gestores Públicos, Academia e Sociedade", tido como um alicerce para a melhor gestão das

águas urbanas, conforme carta redigida ao fim do Encontro Nacional de Águas Urbanas (ENAU, 2014).

A partir das conclusões deste trabalho, e acreditando na parceria entre governo municipal e universidade para viabilizá-las, sugere-se pesquisas com o intuito de:

- Estudar a relação entre densidade habitacional x área impermeável, como realizado por Tucci (2007), realizando ainda zoneamentos ou discretizações que considerem o uso do solo (comercial, residencial e industrial) e padrões de ocupação. Outros índices que permitam relacionar a ocupação e os impactos sobre o sistema de drenagem são de igual importância.

- Melhorar as simulações hidrológicas e hidráulicas através de duas ações principais: i) continuar o avanço no trabalho de cadastro da rede e dos dispositivos de micro e macrodrenagem, desde condutos e bocas de lobo a reservatórios e seus vertedores, canais e riachos, a partir de leitura de projetos, visitas a campo e levantamentos topográficos e batimétricos, utilizando SIGs e outros softwares computacionais para espacialização e armazenamento de informações; ii) Implementação de pluviômetros e medidores de vazão (ou ainda outros instrumentos que forneçam informação do escoamento), em locais estratégicos para estudo de pontos críticos, por exemplo.

- Simular outros cenários de impermeabilização, considerando: i) análise de tendências através da observação da dinâmica espacial e temporal das bacias e de vetores de ocupação; ii) implementação de índices urbanísticos mais restritivos e técnicas de baixo impacto. Para isso, o entorno do açude é uma área piloto interessante devido ao seu projeto de urbanização já iniciado.

6.1 ANÁLISE DE INCERTEZAS

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, algumas incertezas são inseridas nos resultados encontrados através dos métodos empregados, principalmente devido à ausência e/ou incompletude de dados. Tais incertezas devem ser observadas a fim de vislumbrar formas de sobrepô-las através de estudos futuros. Em sua maior parte, elas são comentadas ao longo do texto, e de forma resumida, estão destacadas nos tópicos abaixo.

- Devido à existência de apenas um posto pluviométrico no município, foi assumida a ocorrência de chuva uniforme, em toda área de estudo.

- Para o cálculo da precipitação excedente através do método CN, as abstrações iniciais foram consideradas como 20% da capacidade máxima de armazenamento de água no solo, relação esta obtida através de estudos em bacias agrícolas. Do mesmo modo, a equação de kirpich, utilizada neste estudo para cálculo do tempo de concentração, apesar de ser utilizada em projetos de drenagem urbana, baseia-se em estudos agrícolas.

- Devido a problemas no cadastro da rede de drenagem construída, foram utilizados os projeto dos canais principais;

- No caso dos canais secundários (para os quais não foram localizados os projetos), foi utilizada a declividade do terreno na equação de Kirpich;

- Levantamento topográfico mais refinado é indicado para obter informações relativas a geometria de rios (seção e declividade) e do reservatório (relação cota-volume);

- As informações pedológicas carecem de maior resolução e detalhamento como análises de condutividade hidráulica.

- As vazões no canal do Prado tem duas interferências que devem ser revistas: i) o açude Velho não foi simulado; ii) a possibilidade de contribuição da Bacia do Riacho das Piabas ao Açude Velho deve ser novamente analisada;

- A relação cota descarga deve ser estabelecida para os vertedores dos dois açudes;

- A análise da capacidade de escoamento em trecho natural e canalizado foi feita separadamente e, portanto, é preciso investigar possíveis influências das características da propagação no rio sobre o fluxo no canal;

- A falta de dados medidos impossibilitou a calibração do modelo, tendo sido realizada uma análise de sensibilidade a partir de informações existentes;

- O coeficiente de Manning utilizado no cômputo da propagação, pode ser melhor discretizado para as diferentes condições e materiais de canais, leito de rios e planícies de inundação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGÃO, R.; FIGUEIREDO, E. E. ; SRINIVASAN, V. S. ; GOIS, R. S. S. **Chuvas Intensas no Estado da Paraíba**. V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2000, Natal. Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal – RN. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, p. 74-85, 2000.

ARAGÃO, R.; REIS, C. C. T. **Determinação da Vazão de contribuição para o canal da Av. Dep. Airton Teles através do modelo chuva-vazão IPHS1**. VI Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe. Aracaju, SE. 2013.

ARAÚJO, E. L. Estimativa e análise do crescimento da demanda de água considerando cenários de uso e ocupação do solo. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. 2013.

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. (2009). Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>>

BARBOSA, A. P.; SILVA, A. F.; ZIMBACK, C. R. L. **Modelo numérico do terreno obtido por diferentes métodos em cartas planialtimétricas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.16, n.6, p.655–660. 2012

BECKER, P. **Obtenção de Informações para Plano Diretor e Drenagem Urbana utilizando o SIG**. Universidade Federal De Santa Catarina. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil. 2006.

BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento Remoto e SIG avançados: novos sistemas sensors e métodos inovadores**. Oficina de Textos. p. 175-183. 2005.

BONATES, M. F. **Leis que (des)orientam o processo de verticalização. Transformações urbanas em campina grande à revelia da legislação urbanística**. XI Coloquio Internacional de Geocrítica. La planificación territorial y el urbanismo desde el diálogo y la participación. 2010.

BONTEMPO, V. L.; OLIVER, C.; MOREIRA, C. W. de S.; OLIVEIRA, G. **Gestão de águas urbanas em Belo Horizonte: avanços e retrocessos**. REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina. v. 9, nº. 1. 2012.

BRANGER, F.; KERMADI, S.; JACQUEMINET, C. MICHEL, K.; LABBAS, M.; KRAUSE, P.; KRALISCH, S.; BRAUD, I. **Assessment of the influence of land use data on the water balance components of a peri-urban catchment using a distributed modelling approach**. Journal of Hydrology. p. 312-325.2013.

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**. Diário Oficial da União, em 8 de janeiro de 2007.

_____. **Lei Nº 12.651 de 25 DE MAIO DE 2012.** Diário Oficial da União, em 28 de maio de 2012.

BUARQUE, D. C.; FAN, F. M.; PAZ, A. R. da. **Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 14, n.2. p. 91-103. 2009.

BURNS, M. J.; Fletcher, J. D.; HATT, B. E.; LADSON, A. R.; WALSH, C. J. **Can allotment-scale rainwater harvesting manage urban flood risk and protect stream health?** NOVATECH. 2010.

CAMPANA, N. A. TUCCI, C. E. M. **Previsão da Vazão em Macrobasias Urbanas: Arroio Dilúvio Em Porto Alegre.** RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 4, n.1, p. 19-33, 1999.

CAMPANA, N. TUCCI, C. E. M. **Predicting floods from urban development scenarios: case study of the Dilúvio Basin, Porto Alegre, Brazil.** Civil Engineering Department, University of Brasília. Urban water, v. 3, n.1-2, p. 113-124. 2001.

CANHOLLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos. 2005.

CARDOSO, A. S.; BAPTISTA, M. B. **Metodologia para Avaliação de Alternativas de Intervenção em Cursos de Água em Áreas Urbanas.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 16, n.1, 2011.

COLOMBO, J. C. **Diagnostico e Diretrizes para Plano Diretor e Drenagem Urbana.** Ribeirao Quilombo – Americana - SP. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 2002

COOMBES, P. J. ARGUE, J. R. KUCZERA, G. **Figtree Place: a case study in water sensitive urban development (WSUD).** Urban Water, 2000.

CORDÃO, M. J. S. **Modelagem e Otimização da disposição espacial de unidades de reservação em redes de distribuição de água utilizando geotecnologias**”. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental – UFCG. 2009.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil & DEFESA CIVIL – Campina Grande, PB. **Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa.** Campina Grande, Paraíba. Abril de 2013

DAMS, J.; DUJARDIN, R.; BASHIR, I.; CANTERS, F. BATELAAN, O. **Mapping impervious surface change from remote sensing for hydrological modeling.** Journal of Hydrology. 2012.

DENG, C. WU, C. **A spatially adaptive spectral mixture analysis for mapping subpixel urban impervious surface distribution.** Remote Sensing of Environment Journal. p. 62–70. 2013.

DIETZ, M. E. CLAUSENB, J. C. **Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision.** Journal of Environmental Management. p. 560 – 566. 2007.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** EMBRAPA Solos. 2ª ed. Brasília: Distrito Federal. 2006.

EPA – Environmental Protection Agency. **Handbook for Developing Watershed Plans to Restore and Protect Our Waters.** 2005.

ESRI. **ArcGIS 10.1.** Redlands, California, USA. Disponível em: <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>. 2014.

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

ESTADO DA PARAÍBA. Notícia. Página oficial. Disponível em: <<http://www.paraiba.pb.gov.br/90716/governo-do-estado-autoriza-urbanizacao-do-acude-de-bodocongo-nesta-terca-feira.html>>. 2014.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto.** 3ª ed. Ampl. E atual. São Paulo: Oficina de Textos. 2011

GARCIA, Joaquin Ignacio Bonnacarrère; PAIVA, Eloiza Maria Cauduro Dias de. **Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V. 11 n. 4 Out/Dez 2006, PÁGINAS 99-108

GAROTTI, L. M.; BARBASSA, A. P. **Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v.15, n.1. jan/mar. 2010.

GDF - DISTRITO FEDERAL. **Manual Técnico dos Modelos Hidrológico e Hidráulico.** Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal, v. 3. Secretaria do Estado de Obras. 2009.

GEP – GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. **Capacidade do Sistem Atual e Medidas de Controle de Cheias. Relatório Final. Plano Diretor de Drenagem da Bacia do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba,** v. 3. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 2002.

GOMES, E. F. **Perdas de vazão e seus efeitos na operação do sistema de esgotamento sanitário de Campina Grande - PB.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. 2013.

HINGRAY, B. MUSY, A. PICOUET, C. **Hydrology: A Science for Engineer.** CRC Press. 1ª ed. 2014.

HORA, Silmara Borges da. GOMES, Ronaldo Lima. **Mapeamento e avaliação do risco a inundação do rio Cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA.** Silmara Borges da Hora. Sociedade & Natureza. Uberlândia. 2009.

HUONG, H. T. L.; PATHIRANA, A. **Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam.** *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, p. 379–394. 2013

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

JPB. (2014). **Bueiros em Campina Grande são o motivo dos alagamentos em época de chuva.** Reportagem. *Jornal da Paraíba*.

LECHIU, B. C.; OLIVEIRA FILHO, P. C. O.; SFOUSA, J. B. **Utilização de imagens orbitais de alta resolução em superfícies com níveis distintos de impermeabilização do solo urbano: caso Irati-PR. 2010.** : *Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 33, n. 2, p. 127-140. 2012.

LEVIN-KEITEL, M. **Managing urban riverscapes: towards a cultural perspective of land and water governance.** *Water International*, 39:6, 842-857. 2014.

LIMA, F. A. ALMEIDA, L. S. BRAGA, F. L. NERY, C. V. M. **“Utilização do sistema de informações geográficas TerraView para delimitação da bacia hidrográfica do Rio Vieira, Montes Claros – MG”.** Anais VI Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto - Geonordeste, Aracaju, SE, Brasil. 2012.

MAIDMENT, D. R. **Arc Hydro: GIS for Water Resources**, ESRI press. 2002.

MAIDMENT, David. R. **Handbook of Hydrology**. Book.1992.

MAKROPOULOS, C. BUTLER, D. MAKSIMOVIC, C. **GIS supported evaluation of source control applicability in urban areas.** *Water Science and Technology*, v. 39, p. 243 – 252. 1999.

MARACAJÁ, P. B. **Chuvvas acude de bodocongo Campina Grande 17 07 2011.** Vídeo. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TTdIzX_gS> 3M. Disponibilizado em 17 de julho de 2011.

MARTINS, A. P. **Simulação Hidrológica do Reservatório do Vacacaí-Mirim / Santa Maria-RS utilizando o sistema IPHS1.** Programa de PósGraduação em Engenharia Civil. UFSM. 2004.

MARTINS, C. M. T. MENDES, M. da G. T; ABREU, J. M. ALMEIDA, J. P. L. LIMA, J. P. LIMA, I. P. **Hidrologia urbana: Conceitos básicos. Portugal: Entidade Reguladora de Serviços de Águas e Resíduos.** 2010.

MELO FILHO Hiran de, FEITOSA, Patrícia H. C., ROCHA, Marília S. **Análise dimensional do sistema de macrodrenagem de águas pluviais urbanas de Campina Grande-PB – Estudo de Caso, canal das Piabas.** Anais do X ENAU – Encontro Nacional de Águas Urbanas. ABRH, São Paulo: 2014.

MENDES, H. C.; MEDIONDO, E. M. **Histórico da Expansão Urbana e Incidência de Inundações: O Caso da Bacia do Gregório, São Carlos – SP.** RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, n.1, p. 17 – 27. Jan/Mar 2007.

METHODS, H. DIETRICH, K. **Stormwater Conveyance Modelling and Design**. Bentley Institute Press. 2007.

Ministério dos Transportes. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem. 2005.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. 2005.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 2005

MULUNGU, H. E. Estudo De Inundação na Bacia do Campus da UFSC, Florianópolis-SC. **Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.

NAGARAJAN, N. POONGOTHAI, S. **Spatial Mapping of Runoff from a Watershed Using SCS-CN Method with Remote Sensing and GIS**. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 17, No. 11, November 2012, pp. 1268-1277.

NÓBREGA, P. V. M. **ANÁLISE DO SISTEMA DE DRENAGEM DE CAMPINA GRANDE/PB PARA PROTEÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. 2012.

OLIVEIRA, G. G.. GUASSELLI, L. A. **Relação entre a Suscetibilidade a Inundações e a Falta de Capacidade nos Condutos da Sub-bacia do Arroio da Areia, em Porto Alegre/RS**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V. 16, n.1. Jan/Mar 2011.

PAIVA, J. B. D. PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH. 2001.

PEPLAU, Gustavo José Rochao. **Análise de critérios para definição de vazão de restrição para o controle do escoamento superficial urbano. Estudo de caso: Bacia hidrográfica do Riacho do Sapo, Maceió-AL**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas.. 2013.

PEREIRA, E. **CG tem 41 pontos de alagamento**. Fala, prefeito. O blog de Edson Pereira. Blog. Disponível em: <http://www.fala.prefeitopb.com.br/2014_01_31_archive.html>. 31 de janeiro de 2014.

PIRES, J. M. NASCIMENTO, M. C. SANTANA, R. M. RIBEIRO, C. A. A. S. **“Análise da Exatidão de Diferentes Métodos de Interpolação para Geração de Modelos Digitais de Elevação e Obtenção de Características Morfométricas em Bacias Hidrográficas”**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 10 n.2. pp. 39-47. 2005.

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.**

PMPA – PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **Manual de Drenagem Urbana.** Plano Diretor de Drenagem Urbana. Departamento de Esgotos Pluviais. Volume VI. 2005.

PMBH – PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **Lei Nº 7.165, de 27 de agosto de 1996.** Institui o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte.

PMSP - PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo.** 1998.

PONTES, P. R. M. **Comparação de modelos hidrodinâmicos simplificados de propagação de vazão em rios e canais. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. . **Manual de Drenagem Urbana.** Departamento de Esgotos Pluviais. Plano Diretor de Drenagem Urbana Volume VI. 2005.

PULS, L. G. **Flood Regulation of the Tennessee River. House Document,** N. 185, 70th Congress, 1st Session, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1928.

R Core Team (2014). **R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing,** Vienna, Australia. URL <http://www.R-project.org/>.

REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G.; VERÓI, A. P. **Manejo de Águas Urbanas e sua Relação com o Desenvolvimento Urbano em Bases Sustentáveis Integradas — Estudo de Caso dos Rios Pilar-Calombé, em Duque de Caxias/RJ.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n.2. 2013.

RIBEIRO, Celso de Mello.; LIMA, Ricardo Neves de Souza. **Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica.** Revista de Geografia, v. 2, nº 1. 2011.

ROSIM, S.; MONTEIRO, A.M.V; RENNÓ, C.D.; SOUZA, R.C.M.de; SOARES, J.V. **TERRAHIDRO - Uma plataforma computacional para o desenvolvimento de aplicativos para a análise integrada de recursos hídricos.** Anais XI SBSR. pp. 2589 - 2596. 2003.

SILVA, H. de A. *et al.* **Tecidos urbanos e sistemas de espaço livres em Campina Grande (PB): Uma descrição da qualidade da sua forma urbana.** In: VII Colóquio Quapá-SEL, 2012, Campo Grande – MS. VII Colóquio Quapá-SEL, 2012

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **Urban Hydrology for small watershed. Technical Release No 55. Conservation Service, U.S.D.A.,** Washington, D. C. 1965. 1986.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. **Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n.2. p. 9-18. 2012.

SOUZA, V. C. B. **Gestão da drenagem urbana no brasil: desafios para a sustentabilidade.** Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA), v.1, n.1, p. 057-0722013. 2012.

SOUZA, T. J.; GALVÃO, C. O.; RUFINO, I. A. **Estimativas de disponibilidade de água de chuva em edificações residenciais no meio urbano.** In: Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. ABRH: Natal, 2014.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (SUDENE). I - **Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba.** II - **Interpretação para uso agrícola dos solos do Estado da Paraíba. Convênio de Mapeamento de Solos MA/EPE-SUDENE/DRN.** Convênio MA/CONTAP/USAID/BRASIL. Rio de Janeiro. 1972.

TAKEDA, M. G.; PEREIRA NETO, O. C.; BARROS, M. V. F.; CARDOZO, F. S. SHIMABUKURO, Y. E. **Caracterização geoambiental da bacia urbana córrego roseira – Londrina/PR utilizando sistema de informação geográfica (sig).** 2013.Revista Georaguaiá, p. 56-76. 2013.

TUCCI, C. E. M. **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V. 2, n. 2, p. 5-12. 2007.

TUCCI, C. E. M. **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 2, n.2, p. 5-12. 1997.

TUCCI, C. E. M. **Gerenciamento da Drenagem Urbana.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 7, n.1, 2002.

United Nations. **World Population Prospects: The 2012 Revision. Department of Economic and Social Affairs.** Abril, 2014.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS. **IPHS-1 para Windows v.2.11. Modelagem hidrológica e hidráulica.** Porto Alegre. 2003.

Valeriano, M. M. **Topodata - Banco de Dados Geomorfométricos Locais do Brasil.** Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/topodata/data/grd/>>. 2008.

VERBEIREN, B.; VOORDEB, V. D.; CANTERS, F.; BINARD, M.; CORNET, Y. BATELAAN, O. **Assessing urbanisation effects on rainfall-runoff using a remote sensing supported modelling strategy.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. p. 92–102. 2013.

VOORDE, T. V.; JACQUET, W. CANTERS, F. **Mapping form and function in urban areas: An approach based on urban metrics and continuous impervious surface data.** Landscape and Urban Planning journal. 2011.

WALSH, C. J. J.; ROY, A. H.; FEMINELLA, J. W.; COTTINGHAM, P. D.; GROFFMAN, P. M.; MORGAN, R. P. **The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure.** The North American Benthological Society. p. 706–723. 2005.