



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TENÓRIO JOSÉ DE BRITO

**USO DE GEOTECNOLOGIAS NO MAPEAMENTO DE ALAGAMENTOS EM
CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO: ESTUDO DE CASO NO BAIRRO
ALTO SUMARÉ – MOSSORÓ/RN**

NATAL/RN

2020

TENÓRIO JOSÉ DE BRITO

USO DE GEOTECNOLOGIAS NO MAPEAMENTO DE ALAGAMENTOS EM
CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO: ESTUDO DE CASO NO BAIRRO ALTO
SUMARÉ – MOSSORÓ/RN

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

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro.

NATAL/RN

2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Brito, Tenorio Jose de.

Uso de geotecnologias no mapeamento de alagamentos em cenários de uso e ocupação do solo: estudo de caso no bairro Alto Sumaré - Mossoró/RN / Tenorio Jose de Brito. - 2020.
78 f.: il.

Dissetação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro.

1. Expansão urbana - Dissertação. 2. Sensoriamento remoto - Dissertação. 3. GNSS - Dissertação. 4. SIG - Dissertação. 5. Nordeste do Brasil - Dissertação. I. Amaro, Venerando Eustáquio. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 528.8

TENÓRIO JOSÉ DE BRITO

USO DE GEOTECNOLOGIAS NO MAPEAMENTO DE ALAGAMENTOS EM
CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO: ESTUDO DE CASO NO BAIRRO ALTO
SUMARÉ – MOSSORÓ/RN

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro – Orientador (UFRN)

Prof. Dr. Ada Cristina Scudelari – Examinador Interno (UFRN)

Prof. Dr. Alexandre Bernardino Lopes – Examinador Externo (UFPR)

Natal, 30 de outubro de 2020.

Dedico esse trabalho àqueles que já partiram desse plano, que durante a estada aqui, perseveraram, persistiram, lutaram pela vida. Em especial minha mãe, meu pai e por último minha irmã Jucélia, que sempre acreditou muito na minha determinação, na minha luta e persistência para vencer os desafios da vida. Você foi também uma guerreira, lutou contra o câncer até o último minuto, e é assim que tem que ser, e é assim que sempre será. Que as experiências nos tornem melhores do que ontem, e o amanhã, melhores que hoje. Minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeira a Força maior que rege o equilíbrio do Cosmo, essa energia inteligente que muitos nominam Deus. Aprender a cada dia, seja através da ciência ou das interrelações pessoais é no meu íntimo, uma busca por compreendê-Lo e passo ao Seu encontro.

Agradeço também a minha esposa Simone pela compreensão nos muitos momentos ausentes usados para construção desse trabalho. Agradeço também aos meus filhos, Davi e Bianca, por resgatar a alegria nos momentos difíceis dessa jornada.

Agradeço aos amigos do mestrado pelo apoio na motivação de não desistir, quando pus em dúvida a continuidade por ter que dividir o tempo com a pesquisa, trabalho profissional e a família.

Um agradecimento especial ao professor Venerando pela orientação, pelo tempo dedicado e por acreditar em um orientando tão acometido de responsabilidades.

Também faço um agradecimento especial à professora Maria de Fátima, nossa querida Fatinha, sempre disposta a ajudar.

Agradeço ao professor Paulo Vitor pelos muitos esclarecimentos prestados durante a pesquisa.

Agradeço ao amigo Caio Lima, pelas soluções às muitas dúvidas durante o aprendizado na utilização do *software* ArcGIS.

Agradeço ao amigo Eduardo Baptista Guadain, pelo apoio no levantamento dos dados de campo.

Agradeço à toda a equipe do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração Geotecnia pela convivência, aprendizado e amizade durante todo esse tempo.

Agradeço também àqueles que fazem o laboratório do GNOMO pela convivência e paciência.

O problema das águas em regiões metropolitanas representa positivamente um dos maiores desafios a serem enfrentados pelos órgãos gestores em recursos hídricos. Sobretudo em países em desenvolvimento. (...).

Rui Carlos Vieira da Silva

RESUMO

Inundações, enchentes e alagamentos têm se tornado eventos frequentes nos espaços urbanos em todo o mundo e têm sido analisados tanto como consequência de eventos relativos às mudanças climáticas, quanto de alterações desordenadas no espaço urbano. No Município de Mossoró/RN ocorreu acelerado processo de ocupação urbana nos últimos 10 anos, fomentado pelo Programa Minha Casa Minha Vida do Governo Federal. Mesmo sendo um programa onde os empreendimentos precedem de planejamento sob as boas práticas de engenharia, em que é observada a implantação da infraestrutura de drenagem e, obrigatoriamente, requerem avaliação e chancela do poder público municipal, foram relatados problemas de alagamentos no bairro Alto Sumaré, tratado como área de estudo. Na análise do crescimento urbano foram usadas imagens de sensoriamento remoto disponíveis no Google Earth Pro tratadas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Tal análise permitiu estimar para o bairro Alto Sumaré o percentual de expansão urbana de 180,75% entre 2010 e 2017 e de 112,75% entre 2017 e 2019. A elaboração de Modelo Digital de Superfície (MDS) calibrado com pontos de controle no terreno, baseados em técnicas de levantamentos planialtimétricos com *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e referidos ao Sistema Geodésico Brasileiro, permitiu a avaliação de pontos de alagamento. Os resultados indicaram que os dispositivos de drenagem instalados nos empreendimentos residenciais do bairro Alto Sumaré foram balizados pelo conceito de amortecimento incompleto, pois a maior parte das lagoas de amortecimento implantadas não possui descarregador de fundo. A ausência desse equipamento promoveu um falso efeito de segurança, pois impõe o escoamento rápido quando os volumes das lagoas são atingidos, o que aumenta a área de contribuição e, por conseguinte, o caudal à jusante, causando as inundações e alagamentos. Os volumes de acumulação para tempos de recorrência de 5, 10 e 25 anos apreciando as sub-bacias de contribuição de cada lagoa e baixos topográficos identificados no MDS indicaram volume acumulado maior que a capacidade de reserva da lagoa Cidade Jardim 1 e Res. Monte Olimpo, a exemplo, para os 3 TR calculados. Assim, os cálculos demonstram que a capacidade de amortecimento da maioria das lagoas é insuficiente.

Palavras-chave: Expansão urbana, Sensoriamento Remoto, GNSS, SIG, Nordeste do Brasil.

ABSTRACT

Floods have become frequent events in urban spaces around the world and have been analyzed both as a consequence of events related to climate change and disorderly changes in urban space. In the Municipality of Mossoró/RN, there was an accelerated process of urban occupation in the last 10 years, fostered by the Federal Government program Minha Casa Minha Vida. Even though it is a program where the projects precede planning under good engineering practices, in which the implementation of drainage infrastructure is observed and, mandatorily, require evaluation and seal of the municipality authority, problems of flooding were reported in Alto Sumaré neighborhood, treated as a study area. In the analysis of urban growth, remote sensing images available in Google Earth Pro were used and treated in Geographic Information System (GIS) environment. This analysis allowed estimating for the Alto Sumaré neighborhood the percentage of urban sprawl of 180.75% between 2010 and 2017 and 112.75% between 2017 and 2019. The elaboration of Digital Surface Model (DSM) calibrated with control points in the field, based on planialtimetric surveys techniques with Global Navigation Satellite System (GNSS) and referred to the Brazilian Geodesic System, allowed the evaluation of flooding points. The results indicated that the drainage devices installed in the residential developments of the Alto Sumaré neighborhood were guided by the concept of incomplete cushioning, because most of the damping ponds implanted do not have bottom discharger. The absence of this equipment promoted a false safety effect, as it imposes rapid flow when the volumes of the ponds are reached, which increases the contribution area and, therefore, the flow downstream, causing flooding. Accumulation volumes for recurrence times of 5, 10 and 25 years, appreciating the contribution sub-basins of each pond and low topographies identified in the DSM, indicated greater accumulated volume than accumulation capacity reserve at pond Cidade Jardim 1 and Res. Monte Olimpo, for instance, in the 3 recurrence times. Thus, the calculations show that the damping capacity of most ponds is insufficient.

Keywords: Urban growth, Remote Sensing, GNSS, GIS, Northeast Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Histórico de registros de alagamentos no bairro Alto Sumaré: a) alagamento de ruas do Residencial Monte Olimpo em 05/02/2015. b) alagamento de ruas do Residencial Monte Olimpo em 01/03/2017. Alagamento de rua do bairro Alto Sumaré em 09/04/2018.....	4
Figura 1.2 – Localização da área de estudo no município de Mossoró/RN, bairro Alto Sumaré, zona sul do perímetro urbano.....	5
Figura 2.1 – Conceituação esquemática dos diferentes fenômenos pelas chuvas em ambiente urbano.....	9
Figura 2.2 – Desenvolvimento urbano e seu impacto no sistema de drenagem, tempo de concentração e vazão de pico na bacia hidrográfica.....	10
Figura 2.3 – Posicionamento pelo método RTK.....	17
Figura 3.1 – Fluxograma das principais etapas e atividades implementadas para a elaboração das áreas suscetíveis a alagamentos do bairro Alto Sumaré, Mossoró/RN.....	20
Figura 3.2 – Malha de distribuição dos pontos de controle na área de estudo.....	22
Figura 3.3 – Coleta dos GPC	23
Figura 3.4 – Segmentação das curvas de nível para geração do MDE e área ocupada 2019 do bairro Alto Sumaré – Mossoró/RN	26
Figura 3.5 – Modelo Digital de Elevação do bairro Alto Sumaré – Mossoró/RN.....	27
Figura 3.6 – Modelo Digital de Elevação das lagoas do bairro Alto Sumaré – Mossoró/RN.....	28
Figura 3.7 – Lagoas artificiais construídas na área de estudo: a) Lagoa Residencial Cidade Jardim 1. b) Lagoa Residencial Campo Bello. c) Lagoa Residencial Monte Olimpo.....	29
Figura 3.8 – Coleta de vetores do GPC B2 na soleira da boca de lobo.....	32
Figura 3.9 – Vista em perspectiva de MDS simplificado	34

Figura 4.1 – Comparativo H – Bases de referência e H – MDE por Regressão Linear.....	37
Figura 4.2 – Ocupação urbana na área de estudo em 2010.....	38
Figura 4.3 – Ocupação urbana na área de estudo em 2017.....	40
Figura 4.4 – Ocupação urbana na área de estudo em 2019.....	41
Figura 4.5 – Modelo Digital de Superfície simplificado da área de estudo.....	42
Figura 4.6 – Depressões topográficas.....	43
Figura 4.7 – Rede de fluxo na área de estudo.....	44
Figura 4.8 – Construções no canal principal de drenagem no bairro Alto Sumaré. Baixo topográfico 515466.....	48
Figura 4.9 – a) Perfil de uma depressão antes e depois da ferramenta <i>Fill</i> .b) Perfil de um pico antes e depois da utilização da ferramenta <i>Fill</i>	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Coeficiente de deflúvio.....	14
Tabela 2 –	Coordenadas e precisão dos pontos de controle (GCP).....	25
Tabela 3 –	Pontos de controle (GCP) com ondulação geoidal (N) e altura ortométrica (H)	30
Tabela 4 –	Parâmetros usados na regressão linear, H (GCP) – $f(x)$, H (MDE) – x e variações entre as altimetrias ($\Delta 1$)	33
Tabela 5 –	Estatística descritiva dos dados altimétricos para área de estudo.....	38
Tabela 6 –	Crescimento da população na área de estudo período 2000 a 2010.....	38
Tabela 7 –	Crescimento da área de ocupação na área de estudo período 2010 a 2019. Área do bairro: 11.963.277,05 m ²	41
Tabela 8 –	Características da área de contribuição, área do baixo topográfico, volume do baixo topográfico e volume acumulado para uma chuva com tempo de recorrência, $TR = 5$ anos.....	45
Tabela 9 –	Características da área de contribuição, área do baixo topográfico, volume do baixo topográfico e volume acumulado para uma chuva com tempo de recorrência, $TR = 10$ anos.....	47
Tabela 10 –	Características da área de contribuição, área do baixo topográfico, volume do baixo topográfico e volume acumulado para uma chuva com tempo de recorrência, $TR = 25$ anos.....	48
Tabela 11 –	Características da área de contribuição, área do baixo topográfico, volume do baixo topográfico e volume acumulado para uma chuva com tempo de recorrência, $TR = 5$ anos	50

LISTA DE ABREVIATURAS

GNSS – *Global Navigation System Satellite*
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW - Inverse Distance Weighted
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDE – Modelo Digital de Elevação
NBR – Norma Brasileira
PEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica
PMCMV – Programa Minha Casa Minha Vida
RN – Rio Grande do Norte
SCS – *Soil Conservation Service*
SIG – Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS – Sistemas de Referências Geocêntrico para as Américas
UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte
TIN – *Triangulated Irregular Network*
TtR – *Topo to Raster*
UTM – *Universal Transverse Mecator*
VN – Vizinho Natural
WGS – *World Geodetic System*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Área de estudo.....	4
1.2	Objetivos.....	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1	Enchentes, inundações e alagamentos.....	8
2.2	Modelação hidrológica.....	11
2.1.1	Método racional.....	13
2.3	Geotecnologias como Instrumento de Análise e Gerenciamento de Enchentes, Inundação e Alagamentos.....	15
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1	Dados pretéritos e <i>in situ</i>.....	21
3.1.1	Levantamento topográfico.....	21
3.1.2	Delimitação da área de estudo.....	21
3.1.3	Imagens de sensoriamento remoto.....	21
3.1.4	Coleta dos pontos de controle (GCP – <i>Ground Control Points</i>).....	22
3.1.5	Dados pluviométricos.....	25
3.2	Processamento dos dados.....	26
3.2.1	Segmentação das curvas de nível.....	26
3.2.2	Geração do MDE.....	27
3.2.3	Atualização do MDE.....	27
3.2.4	Cálculo da altitude ortométrica (H) e extração dos valores do MDE.....	30
3.3	Calibração do MDE e geração do Modelo Digital de Superfície – MDS simplificado.....	31
3.3.1	Calibração do MDE.....	31
3.3.2	Geração do MDS simplificado.....	33
3.4	Modelagem Hidrológica Superficial.....	34
3.4.1	Análise geomorfológica preliminar associada à processo de crescimento urbano.....	34
3.4.2	Identificação e avaliação de baixos topográficos.....	34
3.4.3	Cálculo dos volumes acumulados nos baixos topográficos.....	35
3.4.4	Cálculo dos volumes de contribuição nas lagoas artificiais.....	36

4	RESULTADOS.....	37
4.1	MDE Calibrado.....	37
4.2	Processo de ocupação urbana na área de estudo.....	37
4.3	MDS simplificado.....	41
4.4	Depressões topográficas e rede de fluxo.....	42
4.5	Acumulação nos baixos topográficos.....	44
4.6	Volumes de contribuição nas bacias artificiais construídas na área de estudo.....	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
	REFERÊNCIAS.....	54
	ANEXO A – DADOS GERAIS DAS MICRO-BACIAS DOS BAIXOS TOPOGRÁFICO, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 5 ANOS.....	58
	ANEXO B – ANEXO B – DADOS GERAIS DAS MICRO-BACIAS DOS BAIXOS TOPOGRÁFICO, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 10 ANOS.....	59
	ANEXO C – DADOS GERAIS DAS MICRO-BACIAS DOS BAIXOS TOPOGRÁFICO, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 25 ANOS.....	60
	ANEXO D – DADOS GERAIS DAS SUB-BACIAS DAS LAGOAS, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 5 ANOS.....	61
	ANEXO E – DADOS GERAIS DAS SUB-BACIAS DAS LAGOAS, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 10 ANOS.....	62
	ANEXO F – DADOS GERAIS DAS SUB-BACIAS DAS LAGOAS, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 25 ANOS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Eventos de enchentes, inundações e alagamentos são recorrentes no espaço urbano e rural em todo o mundo, no entanto, diante das características peculiares que o meio urbano reúne, como a grande concentração de pessoas e elevado patrimônio material, tais ocorrências nas cidades na maioria das vezes ganham maior destaque pelos prejuízos que causam. Seja de ordem material como de saúde pública, os prejuízos são muitas vezes irreparáveis, como é o caso da perda da vida humana. Tais episódios ocorrem frequentemente deflagrados por chuvas fortes e rápidas ou chuvas de longa duração (FELIZARDO, 2016).

As principais causas das inundações urbanas incluem o aumento da precipitação devido ao efeito da mudança climática, mudança drástica no uso da terra - cobertura da terra (UTCT) e impactos hidrológicos relacionados (ZOPE et al., 2017). Na Holanda as mudanças climáticas provocaram um crescimento de 26% no padrão de precipitação entre os anos de 1910 e 2013 (DAI et al, 2017).

Embora esses fenômenos aconteçam de forma natural, vários estudos apontam que o aumento na frequência e severidade dessas ocorrências no espaço urbano está relacionada ao crescimento da população (OLIVEIRA et al, 2018), uma vez que a urbanização má planejada, influencia diretamente o ciclo hidrológico local pela impermeabilização do solo, promovendo redução de áreas de infiltração e retenção, provocando aumento do escoamento superficial e vazão de pico, que acarreta aumento no volume e ocorrências de inundações e alagamentos (FELIZARDO, 2016; CAPRARIO, 2017; LIMA, 2019). Em Mumbai (Índia), Zope et al. (2017) verificaram que a redução de cerca de 83% de espaços livres do território implicou em aumento das inundações deflagrado pelo pico de cheia que teve período de retorno reduzido de 200 para 2 anos.

As consequências dos alagamentos e inundações são traduzidas em perdas econômicas significativas, como impedimento ao transporte ou perda de colheitas, além de doenças e epidemias, e em muitos casos resultando na perda de vidas humanas (FRANCO, 2004) o que aumenta o custo para sociedade (GRACIOSA, 2010; OLIVEIRA et al, 2018; LIMA, 2019). Dados do estudo da Comissão Internacional para a Prevenção da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CIMA) aponta que o número de vítimas das inundações triplicou na década de 60, o que gerou prejuízos de cerca de 5 milhões de dólares (DA SILVA GALVÃO, 2014). Lyu et al. em estudo realizado em 2016 relata o impacto econômico, após uma forte tempestade, sofrido na província de Guangdong, China, as perdas foram graves nos centros das cidades devido ao alto grau de

urbanização, os alagamentos atingiram principalmente o sistema de metrô que está disposto em área sujeita a inundações. Ainda, segundo dados, observa-se que a maioria da população afetada é a de baixo poder aquisitivo que é forçada a se instalar em lugares mais suscetíveis à inundação (DA SILVA GALVÃO, 2014; MARINHO et al., 2016)

Dados do Censo Demográfico do ano de 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), expõem que a população no Brasil era 84,36% urbana e 15,64% rural (IBGE, 2010). Entre os anos de 2010 e 2019, a população brasileira cresceu cerca 10,17% (IBGE, 2019), alcançando cerca de 211,8 milhões de habitantes, crescimento que trouxe consigo ampla demanda por novas moradias. Este fato é agravado diante do quadro de que maior parte da população brasileira, 84,72%, reside em áreas urbanas (PNUD, 2015) e, logo, ocorre nesse período uma demanda por novas habitações e uma crescente expansão urbana. Esse efeito foi impulsionado pelo momento econômico vivenciado no Brasil no mesmo período, protagonizado pelo Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) de política habitacional lançada pelo Governo Federal em 2009. O programa além de reduzir o déficit habitacional, teve como objetivo também enfrentar a crise econômica originada nos Estados Unidos após o colapso no sistema financeiro de títulos hipotecários (CARVALHO, 2015).

O PMCMV impactou a realidade da população de duas formas, uma delas foi o impulso econômico, pois imprimiu demandas às indústrias primárias (aço, cerâmica, cimento, areia, etc.) e secundárias (eletrodomésticos e mobiliários) causando um aquecimento na economia; por outro lado trouxe consequências danosas no processo de planejamento urbano, uma vez que houve uma periferização, uma segregação espacial, além da flexibilização da legislação urbanística e editalícia dos municípios consignadas nos planos diretores (CARVALHO, 2015). Portanto, o programa não conseguiu unir a solução do déficit habitacional aos problemas de inundações e alagamentos no meio urbano. Se por um lado a ausência de planejamento da expansão urbana é uma das causas do problema de inundação no espaço urbano, por outro, o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) tem o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável das cidades. Esse marco legal foi instituído em 2001 através da Lei Federal nº 10.257 de 10 de julho de 2001, denominada de Estatuto das Cidades.

No mesmo contexto, o Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU) é uma ferramenta de gestão ambiental urbana que, integrado ao PDDU, tem como objetivo auxiliar o planejamento da distribuição da água no tempo e no espaço, com base na evolução do espaço

urbano, compatibilizando-a à evolução e a infraestrutura para redução de prejuízos econômicos e ambientais (MARQUES, 2006).

A complexidade do ambiente urbano e de sua infraestrutura de drenagem tem influência inerente no escoamento superficial (FELIZARDO, 2016). A maioria das cidades brasileiras carece de estudos dedicados a subsidiar medidas de prevenção e/ou solução de problemas ligados à drenagem pluvial (ANDRADE et al., 2014), uma vez que o sistema de drenagem urbana foi construído ao longo dos anos de forma descontinuada e sob o aspecto de escoamento rápido das águas pluviais (TUCCI, 1995). Por essa razão, o planejamento seguido de projetos adequados deve mitigar esses efeitos, dado que historicamente os registros de enchentes, inundações e alagamentos no meio urbano demonstram a ineficiência da realidade do sistema de drenagem existente.

Assim, ganha destaque o uso de ferramentas computacionais no mapeamento de áreas suscetíveis aos alagamentos sendo notório na última década o uso das análises espaciais em ambiente de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) e outras Geotecnologias. A combinação de ferramentas computacionais permite a simulação mais realística das características das bacias hidrográficas, através da incorporação de modelos numéricos do terreno, fornecendo uma reprodução mais confiável do comportamento do escoamento superficial (LIMA, 2019).

Diante dessa constatação, a presente Dissertação de Mestrado fez uso de metodologia de calibração de Modelo Digital de Elevação – MDE desenvolvida por Araújo *et al.* (2018) associada à adaptação de metodologia abordada por Abdelsalheen *et al.* (2016) para analisar a susceptibilidade dos elementos urbanos recém implantados aos rápidos eventos de alagamentos no bairro Alto Sumaré, zona sul da cidade de Mossoró no Estado do Rio Grande do Norte (RN), onde a partir de 2010, incentivado pelo PMCMV, iniciou-se rápida expansão urbana. O residencial *Bella Residence* foi lançado com 144 casas, daí em diante foram surgindo demais empreendimentos imobiliários como o Cidade Jardim 1 com 568 casas, Residencial Monte Olimpo com 335 casas, Cidade Jardim 2 com 285 casas, dentre muitos outros que promoveram impermeabilização de grandes áreas e alteração das condições de drenagem da bacia hidrográfica. Esse processo de expansão urbana através de conjuntos residenciais planejados trouxe consigo aspectos negativos, como alagamentos em algumas áreas do bairro a pouco tempo construídas (Figura 1.1), mesmo diante das regulações constantes no Plano Diretor. Tais eventos são sinais de que o aspecto geomorfológico pode não ter sido considerado no planejamento do sistema de drenagem e na definição do fluxo superficial para construção dos empreendimentos.

Figura 1.1. Histórico de registros de alagamentos no bairro Alto Sumaré: a) alagamento de ruas do Residencial Monte Olimpo em 05/02/2015. b) alagamento de ruas do Residencial Monte Olimpo em 01/03/2017. Alagamento de rua do bairro Alto Sumaré em 09/04/2018.



Assim, esta Dissertação de Mestrado tem como objeto de análise as alterações promovidas no meio físico urbano com uso de geotecnologias como: *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e Sensoriamento Remoto, integrados a outros parâmetros como sistema de drenagem e processados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), na avaliação de eventos de alagamentos já ocorridos, como base para a simulação de eventos futuros baseados na taxa de crescimento urbano experimentada no bairro na última década, diante de cenários de extremos pluviométricos, tendo como parâmetro a taxa de urbanização do bairro na última década.

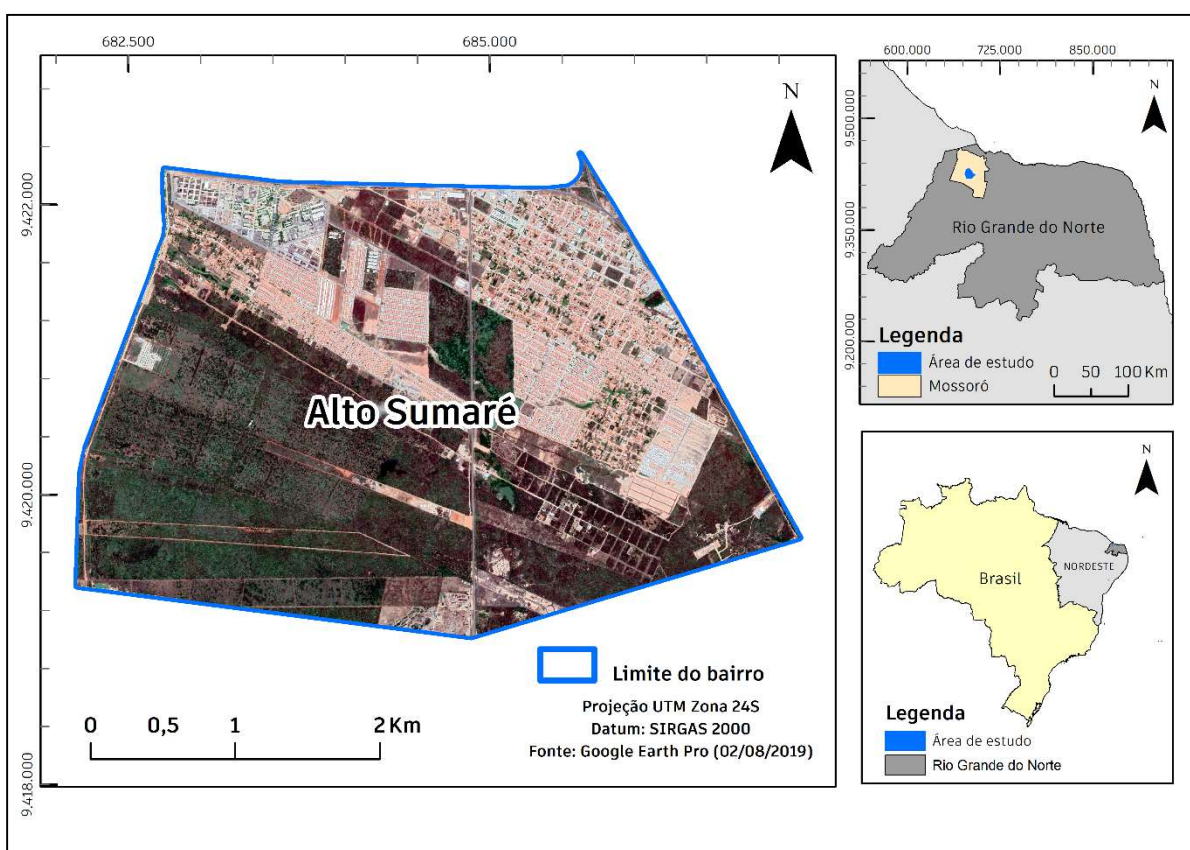
1.1 Área de estudo

O bairro Alto Sumaré, principal área de estudo, está localizado na cidade de Mossoró, situada na Mesorregião Oeste Potiguar. A cidade de Mossoró está compreendida entre as coordenadas Universal Transversa Mercator (UTM) 660.000 – 712.000 mE e 9.470.000 – 9.390.000 mN no fuso 24Sul-M. Possui população com cerca de 297.378

habitantes (IBGE, 2019) e área de 2.099,3 km² (IBGE, 2010), sendo o maior município do RN em extensão territorial, com área urbana de 13,2 km² (ROCHA, 2015).

No mosaico urbano, o bairro Alto Sumaré localizado na periferia Sul da cidade de Mossoró, foi avaliado como área potencial de expansão urbana ZR-2 (PETTA et al., 2009) e, de acordo com Silva (2014), é caracterizado por grandes áreas destinadas ao loteamento. Está inserido entre as coordenadas planas UTM 682.000 – 687.000 mE e 9.422.500 – 9.419.000 mN, Zona 24Sul (Figura 1.2) e possui área de 1.196,33 hectares. Apresenta relevo predominantemente suave ondulado e é cortado por um córrego temporário que durante o período de chuvas conduz o excesso de águas geradas pelo escoamento superficial, até o deságue no rio Mossoró.

Figura 1.2. Localização da área de estudo no município de Mossoró/RN, bairro Alto Sumaré, zona sul do perímetro urbano.



O Município de Mossoró está inserido no trópico semiárido nordestino e apresenta clima semiárido quente do tipo BSW'h na classificação de Köppen em que prevalecem estações secas com 7 a 8 meses de duração, geralmente entre junho a janeiro, um período úmido de fevereiro a maio e um período super úmido de março a maio (IDEMA, 2005). A

precipitação pluviométrica média anual é de 695,8 mm, com temperatura média anual em torno de 27,4°C, com mínima de 21°C e máxima de 36°C (ROCHA, 2015). A umidade relativa do ar acompanha a curva de precipitação ao longo do ano, com média de umidade relativa anual observada de 68,9%. Os ventos dominantes são de nordeste em 48% dos dias, seguidos pelos de sudeste em 31,50%, que são os mais intensos (IDEMA, 2005).

No aspecto geológico o Município de Mossoró está locado na porção central da Bacia Potiguar emersa, que se distribui com porção maior no RN e porção menor no Estado do Ceará a oeste (ARARIPE E FEIJÓ, 1994). Nessa região dominam as unidades litológicas pertencentes à Formação Jandaíra, ao Grupo Barreiras, aos Depósitos Aluvionares Antigos, aos Depósitos Aluvionares de Canal e aos Depósitos Flúvio-marinhos (BEZERRA et al, 2006). Especificamente na área de estudo, os principais litotipos aflorantes são: as rochas carbonáticas da Formação Jandaíra (3,4%), com espessura de poucos metros compondo relevos planos nas margens e leitos de drenagens; as rochas siliciclásticas do Grupo Barreiras (96,5%), compostas por conglomerados e arenitos ferruginosos, por vezes com matriz argilosa e concreções ferruginosas, que constituem relevo plano, predominantemente recoberto por cascalhos e crostas lateríticas.

A geomorfologia da região é marcada pelas unidades de relevo dos Tabuleiros Costeiros e da Planície Litorânea, com destaque para a Serra do Mel e a Serra de Mossoró, no contexto dos Tabuleiros Costeiros, dissecado e modelado pela Planície do Rio Apodi-Mossoró, que se desenvolve como planície flúvio-marinha na desembocadura na Planície Litorânea. O relevo na cidade de Mossoró é plano a levemente ondulado, com declividades baixas da ordem de 0,06° no sentido norte, em direção à Planície Litorânea. As maiores altitudes da ordem de 230m estão na Serra do Mel e na Serra de Mossoró com 250m. A área de estudo está inserida nos domínios da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró caracterizado por terrenos planos e baixos onde ocorrem os processos de acumulação fluvial, transicional ou eólica (BEZERRA et al, 2006). Nesse recorte geográfico está submetido à intensa ação antrópica, com elevados índices de uso e ocupação desordenada dos terrenos, danificando as características naturais dos solos e a disposição paisagística de toda a Planície do Rio Apodi-Mossoró.

As tipologias de solos presentes na área de estudo são: Chernossolos, Vertissolos, Neossolos Litólicos e Argilossolos Vermelho-Amarelo, Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral é analisar através do uso de Geotecnologias os trechos suscetíveis a alagamento decorrentes da expansão urbana no período 2010 a 2019 do bairro Alto Sumaré em Mossoró/RN. A partir desse prisma, serão desencadeadas as seguintes metas físicas:

1. Apresentar aspectos de expansão urbana no contexto nacional e aspectos de urbanização local;
2. Mapear áreas de expansão urbana do bairro Alto Sumaré no período 2010 a 2019;
3. Elaborar Modelo Digital de Superfície simplificado do bairro Alto Sumaré com mapeamento das áreas suscetíveis a alagamento para períodos de retorno $TR = 05, 10$ e 25 anos;
4. Elaborar mapa com áreas suscetíveis a alagamento com projeção da expansão urbana do bairro Alto Sumaré em 2030 baseado na taxa de ocupação ocorrida no período de 2010 a 2019.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Enchentes, inundações e alagamentos

As enchentes, inundações e alagamentos são popularmente colocados como sinônimos, no entanto, são fenômenos hidrológicos distintos, devendo ter suas diferenciações explicadas em trabalhos acadêmicos e técnicos devido a estratégia de gerenciamento de risco que cada caso requer (GRACIOSA, 2010).

Licco e Dowell (2015) fazem uma exploração sobre os conceitos e diferenciações de diversos órgãos e entidades sobre enchentes, inundações e alagamentos, no entanto, para a presente dissertação importa discorrer que as enchentes consistem em fenômeno transitório, cujo canal principal de um corpo d'água recebe um acréscimo de vazão, permanecendo esse na cota limite do canal, já inundações são fenômenos naturais deflagrados por combinação de chuvas fortes e rápidas ou chuvas de longa duração que provocam o transbordamento dos canais para o leito maior, também nominado de planície de inundação (DA SILVA GALVÃO, 2014) e ocorrem em todos os ambientes fluviais (OLIVEIRA et al., 2018); por último o alagamento que é o acúmulo de água passageira nas margens e nos baixos topográficos dos perímetros urbanos (LIMA, 2019) provocado por chuvas intensas onde o sistema de drenagem é insuficiente para drená-las (Figura 2.1), além do sistemas de drenagem, a topografia, obstrução por lixo e entulho, ligações irregulares de esgoto na rede de drenagem pluvial, dentre outras causas estão relacionadas ao alagamento (DANTAS, 2012).

O desenvolvimento urbano provoca basicamente três estágios de impacto no sistema de drenagem (Figura 2.2): (i) Estágio incipiente de ocupação urbana com poucas construções em área ribeirinha, gráfico com baixa vazão de pico e maior tempo para atingimento dessa vazão na bacia hidrográfica; (ii) Estágio consolidado da ocupação urbana com supressão de área de florestas e aumento das ocupações ribeirinhas, gráfico com elevada vazão de pico e curto tempo para atingimento dessa vazão na bacia hidrográfica; (iii) Estágio consolidado da ocupação urbana após obras de contenção de cheia como a construção barragem de amortecimento a montante de um dos afluentes do rio e construção de dique a jusante do rio principal na travessia da cidade, gráfico com redução da vazão de pico e aumento do tempo para atingimento comparado ao Estágio 2 da ocupação urbana.

Figura 2.1 – Conceituação esquemática dos diferentes fenômenos pelas chuvas em ambiente urbano.



Fonte: Proteção e Defesa Civil São Bernardo do Campo (2011).

Quando a inundação ocorre de forma gradual, o transbordamento acontece lentamente, já na inundação brusca ou enxurrada o transbordamento ocorre de forma repentina, com pouco de alerta para o local de ocorrência (DANTAS, 2012). As inundações graduais estão relacionadas a períodos mais espaçados de chuvas, porém contínuos, que provocam saturação do solo, ocasionando um aumento gradual do nível d'água da calha do rio até seu extravasamento a planície de inundação, enquanto que as enxurradas ocorrem comumente em regiões com maiores declividades, que favorece o escoamento superficial e intensificam o fluxo d'água (DAS SILVA GALVÃO, 2014).

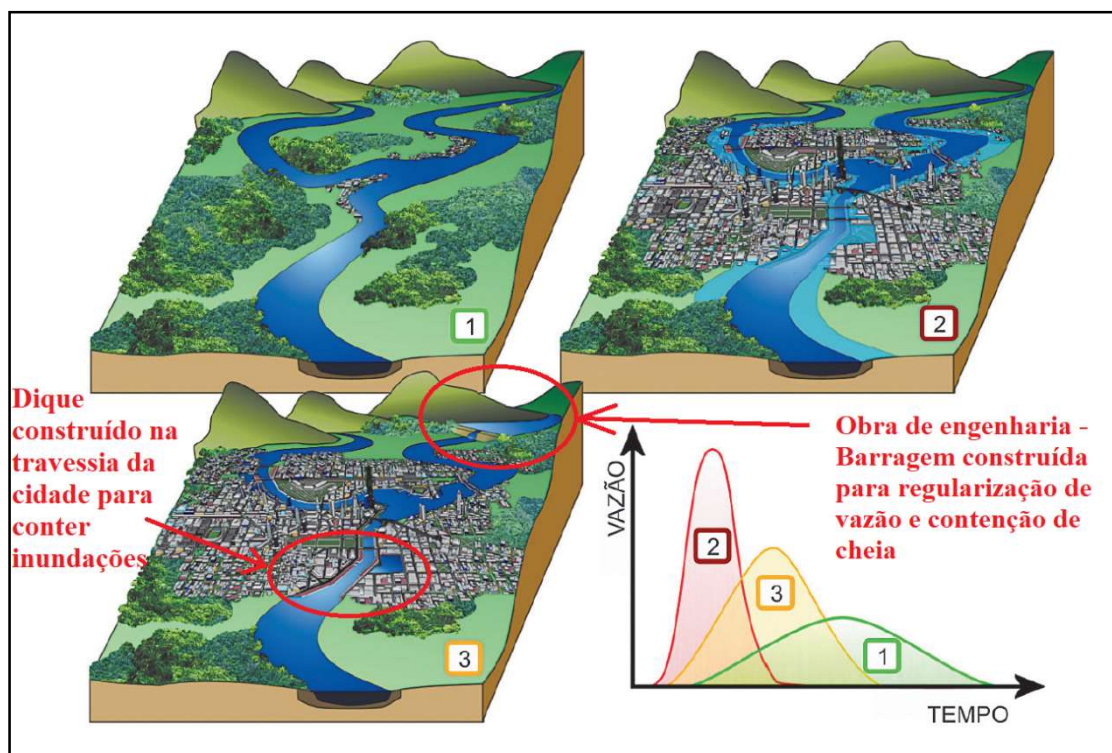
Os eventos de enchente, inundação e alagamento são recorrentes no espaço urbano e rural em todo o mundo, no entanto, diante das características específicas que o meio urbano reúne, como a grande concentração de pessoas e elevado patrimônio material, essas ocorrências nas cidades, na maioria das vezes, ganham maior destaque pelos prejuízos que causam. Seja de ordem material como de saúde pública, os prejuízos são muitas vezes irreparáveis, como é o caso da perda da vida humana. Tais episódios ocorrem frequentemente deflagrados por chuvas fortes e rápidas ou chuvas de longa duração (FELIZARDO, 2016).

A quantidade de inundações está diretamente relacionada ao grau de urbanização de determinadas áreas e o evento extremo de precipitação que ocorre nessas áreas. De acordo com Oliveira (2017) diversos estudos admitem o aumento da frequência cujos fenômenos causam impacto negativo na sociedade. Dados do estudo da Comissão Internacional para a Prevenção da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CIMA) aponta que o número de vítimas das inundações triplicou na década de 60, o que gerou prejuízos de cerca de 5 milhões de dólares (Da Silva Galvão, 2014). Em Guangdong,

província chinesa, uma forte tempestade provocou impacto econômico pelas perdas graves causadas nos centros das cidades devido ao alto grau de urbanização, os alagamentos atingiram principalmente o sistema de metrô que é disposto em área sujeita a inundações (LYU et al, 2016).

O efeito da urbanização na bacia hidrográfica implica na impermeabilização do solo, produzindo alterações no sistema de drenagem, principalmente através de impermeabilização de superfícies e construção de condutos artificiais, o que promove um escoamento mais rápido, reduzindo o tempo de chegada das águas aos cursos d'água cujo resultado é o aumento da vazão de pico e frequência das cheias (PONTREMOLÉZ, 2013).

Figura 2.2 – Desenvolvimento urbano e seu impacto no sistema de drenagem, tempo de concentração e vazão de pico na bacia hidrográfica.



Fonte: SMDU, Volume 2 (2012, p. 71).

Pontremolez (2013) cita que White (1945) descreve a evolução das consequências da inundação ao atingir áreas habitadas em quatro estágios, sendo: (i) o dano a propriedade física pela morte das culturas agrícolas e lixiviação; (ii) a interrupção dos bens de serviços; (iii) a perda de vidas humanas ou prejuízos que atingem a saúde pública; e, (iv) o último estágio, a comunidade é forçada a se retirar da área para minimizar as perdas, tornando a reocupá-las após a inundação. Nesse contexto o mapeamento de áreas mais susceptíveis ao risco de

inundações, por meio de métodos eficazes evita prejuízos e catástrofes (MAGALHÃES et al., 2011) além se consistir em robusta ferramenta no planejamento urbano.

Estudos apontam que as principais causas dessas ocorrências são o desrespeito à legislação e/ou legislação frágil, que não dispõe de dispositivos eficazes capazes de evitar a ocupação de áreas impróprias para construção de moradias, tais como áreas de várzea e fundos de vales (TUCCI, 1995; MAGALHÃES et al., 2011; REIS, 2015; FELIZARDO, 2016). Eckahardt (2008) conclui que as maiores vítimas são classes mais pobres que inevitavelmente ocupam as áreas ribeirinha por serem essas de menor custo, muito embora Lima (2019) tenha mapeado áreas do bairro do Tirol em Natal, predominantemente de classe média a alta), cujos pontos de alagamento durante episódios de precipitação intensa estão inseridos em quadras comerciais, destacando-se o comércio de saúde e estética. O certo é que uma medida para minimizar os efeitos negativos consiste no mapeamento de áreas sujeitas às inundações para implantação de um sistema de alerta, o que permiti a adoção de medidas adequadas à redução prejuízos.

2.2 Modelação hidrológica

A modelação hidrológica consiste na formulação matemática de fenômenos naturais com a finalidade prever de comportamento reais, tendo como sistema de estudo a bacia hidrográfica (GRACIOSA, 2010), ou seja, os modelos hidrológicos tentam reproduzir através de complexas inter-relações de vários fenômenos físicos, as fases do ciclo hidrológico entre precipitação e vazão (DANTAS, 2012).

A complexidade do processo de transformação da chuva em vazão tem sido simplificada teoricamente por meio de modelos matemáticos, os quais têm a finalidade de representar o processo de maneira relativamente simples, fornecendo resultados com os observados através de medições de precipitações e de vazões. O excesso da água de chuva que não é infiltrado no solo acumula-se inicialmente nas pequenas depressões do terreno para, em seguida, formar uma lâmina d'água e, consequentemente, o escoamento de superfície ou deflúvio superficial. (DANTAS, 2012, p. 63).

Os modelos hidrológicos, por permitirem a simulação de condições futuras, são ferramentas úteis que têm sido utilizados na previsão de eventos futuros relacionados ao regime hídrico, auxiliando nos processos de tomada de decisão nas políticas públicas (ALMEIDA & SERRA, 2017).

Segundo Tucci (1998), Almeida & Serra (2017), os modelos são classificados em:

- a) Modelo Determinístico – produzem respostas iguais para um mesmo conjunto de dados de entrada;
- b) Modelo Estocástico – quando uma ou mais variável tem comportamento aleatório, que seguem distribuição probabilística;
- c) Modelo com embasamento físico – os processos são reproduzidos através de equações matemáticas que tem parâmetros e constantes medidos e determinados, não necessitando calibração, porém tem utilização restrita devido à dificuldade de obtenção de todos os parâmetros;
- d) Modelo conceitual – baseado nas equações que descrevem o processo físico ou hipotético;
- e) Modelo concentrado – considera as características da bacia hidrográfica de forma única e homogênea. São atribuídos valores médios para características relacionadas ao solo, à vegetação e à chuva.
- f) Modelos distribuídos – adota-se uma subdivisão da bacia hidrográfica, que pode ser em malhas ou sub-bacias. Os dados são atribuídos de forma espacial.

Dentre as principais aplicações da modelagem hidrológica, Marinho Filho et al. (2012, *apud* LOU 2010) relaciona: análise de consistência e preenchimento de falhas; previsão de vazão; dimensionamento e previsão de cenários de planejamento e, efeitos resultantes da modificação do uso do solo.

No estudo da bacia hidrográfica, os modelos chuva-vazão são formulados para se conhecer qual volume de chuva que cai, escoar e atinge os canais da macrodrenagem, com base nas características físicas da bacia hidrográfica (GRACIOSA, 2010; FELIZARDO, 2016). É um modelo do tipo determinístico, empírico e conceitual, usado para dimensionamento e previsão de cheias, amortecimento em reservatórios, remanso de rios e canais e qualidade de redes pluviais (MARINHO FILHO et al., 2012; ALMEIDA & SERRA, 2017).

Existem muitos modelos para transformação chuva-vazão descritos na literatura, os quais possuem recomendações de utilização a depender do tamanho da bacia hidrográfica. De forma geral, conforme citado por Franco (2004), Tucci (2000); Linsley e Franzini (1964) e Pinto et al., (1975) recomendam o uso do método racional para bacias hidrográficas de até 2 km², podendo ser usado com ressalvas até 5 km² de área. Já para bacias hidrográficas maiores com base nos estudos de Beven (2001), Franco (2004) recomenda o uso do hidrograma unitário (HU) e modelos mais complexos.

2.1.1 Método racional

Consiste na modelagem hidrológica mais antiga que se tem registo, proposta por Mulvany por volta de 1850 na Inglaterra para prever vazão máxima provocada por eventos de precipitação (FRANCO, 2004; MARINHO FILHO et al., 2012). A simplicidade na aplicação e os resultados de saída, frequentemente satisfatórios, conferem ao método uma grande aceitação, sendo um dos mais difundidos para a determinação da vazão de pico em pequenas bacias hidrográficas (FRANCO, 2004).

O método assume a premissa de que não há escoamento de base, que o armazenamento superficial e a intensidade de chuva são constantes no tempo e no espaço e que a intensidade de chuva é superior à infiltração (escoamento hortoriano) (FRANCO, 2004).

Para aplicação do método racional no cálculo da vazão de uma bacia hidrográfica, é necessário conhecer o tempo de concentração, que é definido como sendo o intervalo de tempo necessário para que uma gota de chuva que cai no ponto mais extremo da área da bacia hidrográfica comece a contribuir para a seção cuja vazão se deseja conhecer, a intensidade de chuva que cai sobre a bacia hidrográfica e o coeficiente de deflúvio, que está diretamente relacionado à quantidade de chuva que efetivamente contribui para o escoamento superficial na bacia hidrográfica.

Assim, pelo método racional é possível conhecer a vazão em uma seção qualquer através da seguinte solução algébrica:

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: Q_p = Vazão de pico em m³/s;

C = coeficiente de deflúvio;

i = intensidade média máxima da chuva, em mm/hora;

A = área da bacia hidrográfica, em km²

O coeficiente de deflúvio, relação da chuva que precipita e a que gera escoamento superficial, é baseado em uma série de fatores, tais como: características da superfície, tipo de solo, umidade antecedente, permeabilidade do solo, ocupação da bacia hidrográfica e tempo de concentração (GAROTTI et al., 2010). Esse reflete também os efeitos de amortecimento da bacia hidrográfica e usualmente o valor é adotado em função das características da

urbanização. PORTO (1995) relaciona seus valores em seis classes divididas de acordo com o uso e ocupação do solo (Tabela. 1).

Tabela 1 – Coeficiente de deflúvio

OCUPAÇÃO DO SOLO	(C)
DE EDIFICAÇÃO MUITO DENSE: partes centrais, densamente construídas de uma cidade com rua e calçadas pavimentadas.	0,70 a 0,95
DE EDIFICAÇÃO NÃO MUITO DENSE: partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitações, mas com rua e calçadas pavimentadas.	0,60 a 0,70
DE EDIFICAÇÃO COM POUCAS SUPERFÍCIES LIVRES: partes residenciais com construções cerradas, ruas pavimentadas.	0,50 a 0,60
DE EDIFICAÇÃO COM MUITAS SUPERFÍCIES LIVRES: partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas, mas com muitas áreas verdes.	0,25 a 0,50
DE SUBÚRBIO COM ALGUMA EDIFICAÇÃO: partes de arrabaldes e subúrbios com pequena densidade de construções.	0,10 a 0,25
DE MATAS, PARQUES E CAMPOS DE ESPORTES: partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados e campos de esporte sem pavimentação.	0,05 a 0,20

Fonte: WILKEN, 1978, Appud PORTO, 1995.

A intensidade de chuva é definida por meio de curvas de intensidade *versus* duração *versus* frequência (IDF) através de relações baseadas em dados de postos pluviográficos (FRANCO, 2004). É admitida como sendo uniforme sobre a área da bacia hidrográfica. Os eventos são classificados em ordem decrescente plotando-se os pontos e ajustando-se aos pontos de mesma ordem relativa, que é relacionada ao tempo de retorno, após o qual são formulados os parâmetros K, a, b, c da equação de Bernard (1930) a seguir para a região dos dados pluviográficos utilizados.

$$i_m = \frac{K \cdot T^a}{(t + b)^c} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: i_m = intensidade média máxima, em mm/h;

T = tempo de recorrência em anos;

t = duração da chuva, em minutos;

K, a, b, c = parâmetros da região

Para efeitos de definição do tempo de duração da chuva no uso do método racional, esse é assumido como sendo o tempo de concentração da bacia hidrográfica. Existem várias maneiras e fórmulas para estimar o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica. Paulino (2014) relata que na literatura técnico-científica há fórmulas que determinam o tempo de concentração diretamente e outras desenvolvidas para estimar o tempo de retardo, que é o tempo entre o centro de gravidade temporal da chuva e o respectivo centro de gravidade do hidrograma, onde se estima o tempo de concentração a partir da relação entre esses tempos. Desse modo Silveira (2005) comparou 23 fórmulas usadas no cálculo de tempo de concentração para bacias urbanas e rurais. No estudo destaca-se a fórmula de Carter (1961) que leva a resultados satisfatórios em bacias urbanizadas com área entre 0,02 e 10,70 km². Silveira (2005) adaptou a fórmula de Carter (1961) que define o tempo de concentração em função do comprimento do canal principal e da declividade do canal principal da seguinte forma:

$$t_c = 0,0977.L^{0,6}.S^{-0,3} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: t_c = tempo de concentração em horas;

L = comprimento do canal principal em km;

S = declividade média do canal principal em m/m;

2.3 Geotecnologias como Instrumento de Análise e Gerenciamento de Enchentes, Inundação e Alagamentos

No passado vários tipos de mapeamentos eram limitados, pois as ferramentas computacionais não existiam como hoje (SILVA, 2015). No entanto, a evolução da tecnologia de coleta de informações espaciais e dos equipamentos de manipulação, análise e interpretação, como o desenvolvimento dos SIG mudou esse cenário, trazendo uma dinâmica e amplitude do potencial no uso dessas informações através do geoprocessamento para o planejamento e tomada de decisões sobre problemas urbanos e rurais.

Xavier da Silva (2009) descreve geoprocessamento como sendo um conjunto de técnicas computacionais que opera dados georreferenciados, transformando-os em informação de forma a permitir análises e sínteses que possam validar a tomada de decisão de modo transdisciplinar.

Um uso que tem se tornado bastante comum, consiste na utilização do geoprocessamento, sensoriamento remoto e do SIG para gestão dos recursos hídricos (ECKHARDT, 2008) e para levantamento, análise, avaliação e gerenciamento das ocorrências de enchentes, inundações e alagamento no meio urbano (LIMA, 2019). A interação entre essas geotecnologias permite simulações do comportamento de uma bacia hidrográfica durante um evento de precipitação, evidenciando as áreas de inundação e alagamentos, e a extensão dos danos que poderão causar. Tais simulações fornecem como produto os mapas de inundação, importantes ferramentas que podem ser usadas no planejamento das ações da Defesa Civil, por exemplo.

Eckhardt (2008) descreve diversos estudos que usaram imagens de sensoriamento remoto para o mapeamento de inundação em bacias, porém tais estudos mostraram que a metodologia aplicada pode ser inapropriada devido a algumas razões tais como: casos em que o pico do evento de inundação apresenta curta duração e a não passagem do sensor durante, ou mesmo, dias após o evento. Diante dessas limitações, o uso de Modelos Digitais de Elevação associados às imagens de satélite para avaliação das características de ocupação do solo das áreas afetadas tem trazido melhores resultados no delineamento dessas áreas.

Felizardo (2016) descreve Modelo Digital de Elevação como sendo uma representação matemática da distribuição espacial das cotas altimétricas do terreno estudado. Sua produção é obtida através de pontos altimétricos coletados ou curvas de nível do terreno mediante rotinas computacionais no SIG, e embora não representem sua completa realidade, refletem a topografia da bacia hidrográfica que foi modelada por milhares ou milhões de anos no tempo geológico (LIMA, 2019). Além das áreas de inundação, as simulações que envolvem o MDE e um modelo hidrológico, fornecem também outras características físicas da bacia, como o comprimento de trechos de rios, fluxos de drenagem, declividades e drenagens acumuladas. Porém para um melhor entendimento dos conceitos, é importante observar que na elaboração do MDE consideram-se, na modelagem do relevo, as rugosidades do terreno, o que difere de Modelo Digital de Superfície (MDS), onde demais elementos da cobertura do solo, como vegetação e infraestruturas, são considerados na sua elaboração.

No entanto, para uma boa fundamentação das atividades e da confiança nos dados é imprescindível, assim um MDE que represente a variação contínua do relevo necessita de uma base de dados precisa e acurada, além da escolha do método de geração do MDE, que pode ser construído através de grades regulares (GRID) ou malhas triangulares (TIN).

A garantia da precisão e acurácia é obtida através das etapas de calibração e validação do modelo. A calibração consiste na etapa em que determinados valores do modelo

são selecionados para que seja feita comparação com os valores observados. Os valores do modelo são coletados através do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) que é o sistema de posicionamento mais empregado entre os métodos geodésicos, topográficos, aerofotogramétricos, de navegação marítima e aérea, além de envolver a maioria dos dados que possuem coletas de informações a campo na área do geoprocessamento (PRINA, 2015).

Existem basicamente quatro métodos de posicionamento, são eles: a) posicionamento por ponto, absoluto ou autônomo, que utiliza somente um receptor para realizar posicionamento através de código *C/A* (*Coarse/Acquisition*) e é transmitido somente na banda L1 e de baixa precisão (aproximadamente 10 metros) usado comumente para navegação; b) posicionamento por ponto preciso (PPP), também utiliza apenas um receptor para aquisição dos dados com bandas L1/L2, porém requer um longo período para posicionamento do ponto de interesse e requer pós-processamento para correção do posicionamento; c) posicionamento relativo, onde são usados no mínimo dois receptores L1 ou L1/L2 que são rastreados simultaneamente para o posicionamento, permite posicionamento com alta precisão, porém requer pós-processamento dos dados e; d) posicionamento relativo cinemático em tempo real (*Real Time Kinematic* - RTK), que se destaca pela precisão e produtividade que proporciona. Para uso desse método de posicionamento são utilizados dois receptores, no qual um deles é estacionário e é chamado de "estação base" que fica em um ponto de coordenadas conhecidas, o outro é o *rover*, e fica junto ao usuário executando a coleta de dados (Figura 2.3). As correções são calculadas em tempo real pela base que está posicionada em um ponto conhecido e são transmitidas para o *rover*.

Figura 2.3 Posicionamento pelo método RTK



Fonte: <https://www.santiagoecintra.com.br/blog/geo-tecnologias/como-funciona-o-sistema-rtk-real-time-kinematic-y>.

No Brasil existem estações de referência pré-fixadas, com informações de coordenadas, elevação, entre outros, pertencentes ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), rede geodésica mantida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Para elaboração de um MDE, como se busca gerar um modelo mais próximo possível das feições do terreno, são escolhidas bases de referência no terreno com informações de coordenadas geodésicas e altitude ortométrica, que são obtidos indiretamente através de receptores GNSS, pela aquisição da altitude geométrica ($H = h - N$). Essa base de referência formará os pontos de controle (*Ground Point Control* – GPC), que serão comparados com os pontos do MDE. Os valores preditos são então ajustados aos valores observados por um processo estatístico, objetivando-se a otimização de um indicador estatístico. Para avaliação do desempenho do modelo, foram desenvolvidos diversos indicadores, tais como Coeficiente de Determinação (R^2), Coeficiente de Eficiência (E), Índice de concordância de Willmott (d), *Root Mean Square Error* (RMSE) e *Mean Absolute Error* (MAE), no entanto o RMSE, consiste em índice de desempenho bastante difundido no meio científico e frequentemente usado para comparações de modelos de elevações (Lima et al. 2015).

Quanto ao método de geração de MDE, Santos et al. (2015) de acordo com Burrough (1986) relatam que devido ao baixo custo, rapidez e eficiência, a opção por geração de MDE pelo método TIN são os mais usados, no entanto esse tipo de malha pode gerar perda de informação na reamostragem por interpolação.

Em estudo realizado na Ilha Ponta do Tubarão para analisar o interpolador mais apropriado à geração de MDE que representa morfologia praial, Lima et al. (2015) usou sete seguintes interpoladores: *Inverse Distance Weighted* (IDW), *Krigagem*, *Spline*, *Triangulated Irregular Network* (TIN), *Topo to Raster* (TtR), *Trend* e *Vizinho Natural* (VN). Foram feitas análise de acurácia, precisão e tendência de modo a enquadrar o trabalho nas Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, conforme define o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Dentre os interpoladores analisados para geração de MDE o TIN foi o único completamente livre de tendência e classificado como classe A em termos de precisão e acurácia, para um nível de confiança de 90%.

Prina (2015) usou o interpolador *Topo to Raster*, desenvolvido por Hutchinson (1989) para os dados altimétricos, onde justifica a escolha devido a consistência hidrológica, que realiza modelagem coerente com a realidade da superfície terrestre.

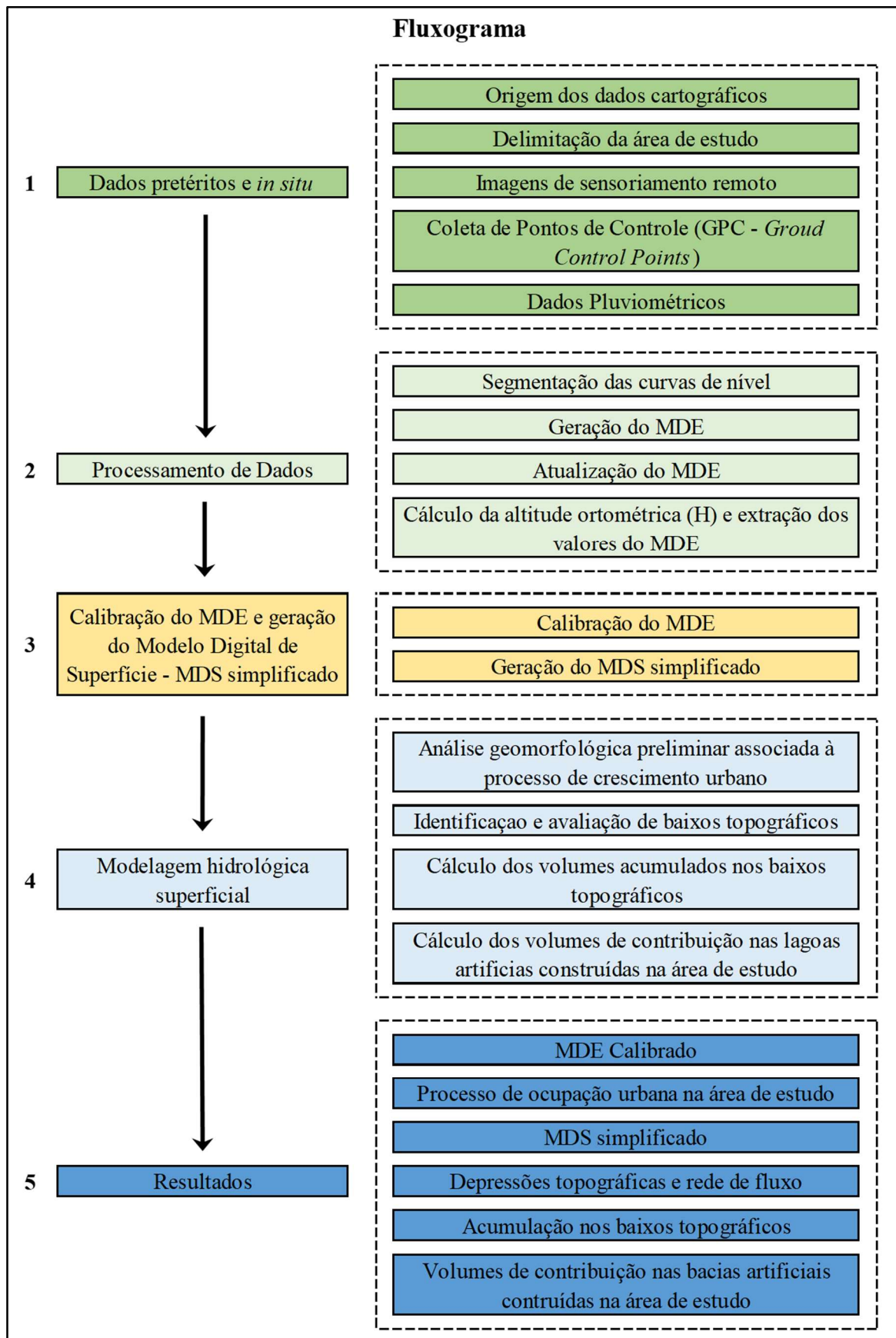
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para elaboração de mapas com trechos suscetíveis a alagamentos no bairro Alto Sumaré foi baseada em adaptação do estudo de Abdelsalheen et al. (2016) e desenvolvida por Araújo et al. (2018). Para isso foi gerado MDE a partir de curvas de nível, em seguida foram definidos pontos de controle (GPC) para calibração do MDE. Outra etapa consistiu em construir vetores a partir de cenas do mosaico de imagens do software Google Earth Pro para avaliação do uso e ocupação do solo na área de estudo que também permitiram a geração de raster representativo das ruas e edificação na área de estudo que somado ao raster do MDE gerou um MDS simplificado.

Usando o MDS simplificado foram geradas depressões (baixos topográficos) na área de estudo para avaliação de como esses baixos topográficos contribuem com o escoamento superficial da bacia hidrográfica, conforme estudo de Abdelsalheen et al. (2016), que demonstrou melhores resultados através de uma abordagem revisada da metodologia do que a abordagem tradicional usada para delinear bacias de drenagem. No estudo, no deserto ocidental do Egito, os baixos topográficos foram considerados no estudo hidrológico, conduzindo maior precisão e redução da vazão de pico. Na presente dissertação os baixos topográficos da área de estudo são avaliados através do método racional quanto à capacidade de amortecimento de chuvas com tempo de recorrência de, $TR = 5, 10$ e 25 anos.

Os procedimentos e estratégia metodológica foram sintetizadas no fluxograma da Figura 3.1 com a descrição das etapas.

Figura 3.1. Fluxograma das principais etapas e atividades implementadas para a elaboração das áreas suscetíveis a alagamentos do bairro Alto Sumaré, Mossoró/RN.



3.1. Dados pretéritos e *in situ*

3.1.1 Origem dos dados cartográficos

A primeira etapa consistiu no levantamento bibliográfico e cartográfico da área de estudo, obtidos a partir de sítios de instituições públicas e de pesquisa. As curvas de nível, dado base para a condução da pesquisa foi um compartilhamento do professor Paulo Cesar Moura da Silva, professor associado do Centro de Engenharias da Universidade Federal Rural do Semi Árido – UFERSA, que consiste em um produto dos serviços prestados pela empresa ENGEFOTO à Petrobras para obtenção e geração de produtos necessários à implantação da faixa de servidão de passagem e áreas para instalações complementares do Gasoduto Pilar/AL – Mossoró/RN, que teve como escopo: voos aerofotogramétricos, apoio de campo, MDT, geração de ortofotocartas digitais, cadastramento de imóveis, levantamento de pontos notáveis e demais atividades (ENGEFOTO, 2020). O levantamento foi realizado em 2016 durante o período chuvoso através de perfilamento a laser. As curvas de nível foram geradas no Sistema de Coordenadas Geométricas, *Datum* SIRGAS2000.

3.1.2 Delimitação da área de estudo

Para delimitação da área de estudo, foram usados arquivos vetoriais dos setores censitários, georreferenciados no Sistema de Coordenadas UTM, Zona 24Sul, *Datum* SIRGAS2000 obtidos no sítio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010). O bairro Alto Sumaré é dividido em 5 setores censitários que foram unidos em um único polígono *shapefile* através da edição do vetor pela seleção dos setores censitários que compõem o bairro.

3.1.3 Imagens de sensoriamento remoto

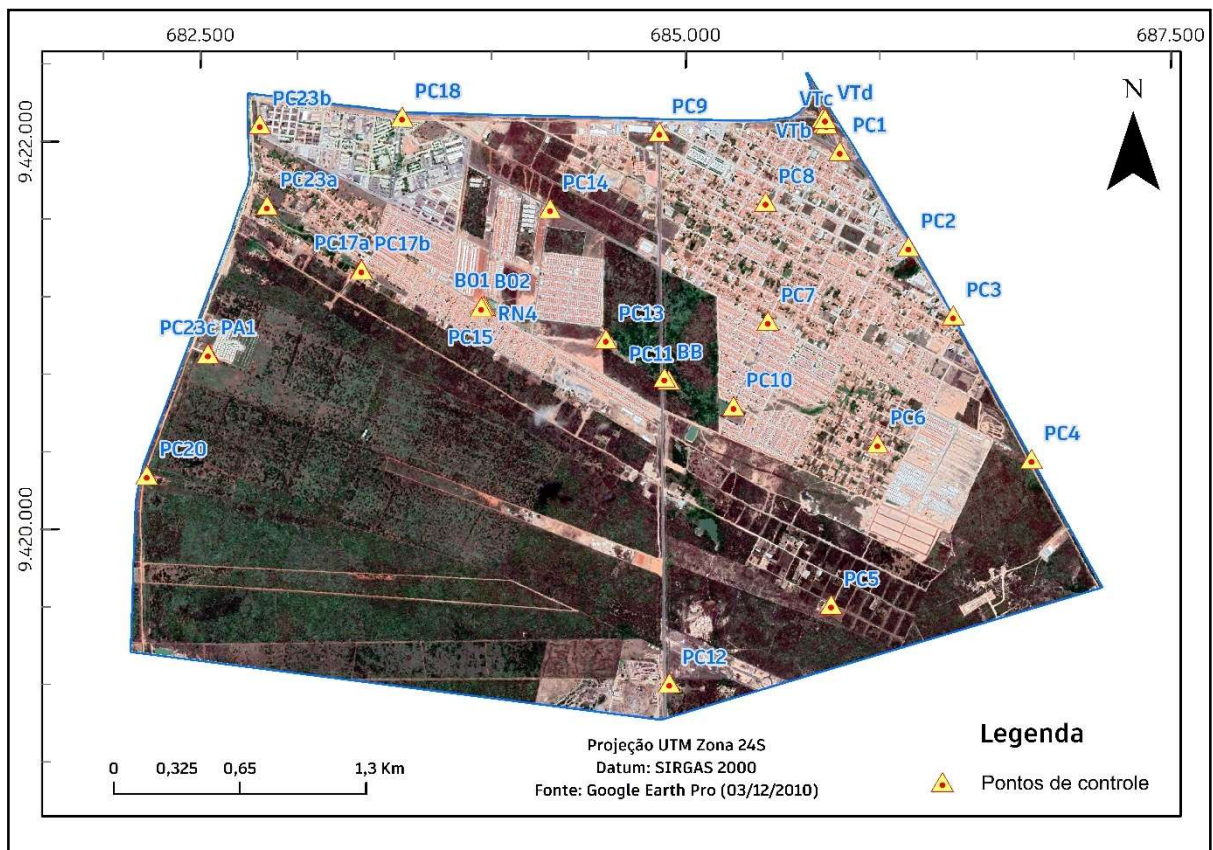
A classificação do uso e ocupação do solo da área de estudo foi feita através da seleção e do processamento digital de imagens obtidas do *Google Earth Pro*. A opção por tais imagens se deve à alta resolução espacial, de 1,57 metros, associada às características de se tratar de repositório de acesso livre, além de apresentar uma série histórica de imagens digitais, com diferentes resoluções espaciais, que destacam a alteração do espaço urbano no recorte da área de estudo. Inicialmente, foi estabelecido o polígono que define a área do bairro como máscara do bairro Alto Sumaré no *Google Earth Pro*, cujos vértices principais tiveram sistema de coordenadas UTM Zona 24S, *Datum* SIRGAS2000, definidas por 5 marcadores, com posterior registro e correção geoposicional da imagem no *software* ArcMap 10.3. Foram

adquiridas uma sequência de 5 cenas de alta resolução das seguintes datas: 03 de dezembro de 2010, 15 de fevereiro de 2017 e 02 de agosto de 2019. Com base nessas cenas foi realizada a vetorização das ocupações urbanas para cada data específica para posterior avaliação da expansão urbana do bairro.

3.1.4 Coleta dos pontos de controle (GCP – *Ground Control Points*)

Esta etapa consistiu na coleta vetorial de pontos de controle (GCP – *Ground Control Points*) seguindo-se a metodologia descrito por Araújo *et al.* (2018). Foram definidos previamente 23 GCP através de exploração no *Google Earth Pro* e a localização dos GPC foi selecionada de forma a alcançar a melhor distribuição espacial na área de estudo. Durante o levantamento identificou-se a necessidade de coleta de mais pontos, além do fato de que houve dificuldade de acesso a alguns dos GCP previamente selecionados (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Malha de distribuição dos pontos de controle na área de estudo.



A aquisição foi feita através do método de posicionamento *Real Time Kinematics* (RTK) com uso de receptor *Global Navigation Satellite System* (GNSS) de dupla frequência

L1/L2 modelo Kronos200 de 220 canais e rádio externo. Inicialmente foram transportados vetores do ponto da Estação GPS-92426, Estação Geodésica do Sistema Geodésico Brasileiro, de coordenadas 9.423.475,572 S - 686.363,974 E, e altitude geométrica 24,757m, ao ponto base 001, que fica sobre viaduto na rodovia BR-304 de coordenadas 9.422.173,02 S e 685.690,68 E, dentro do perímetro área de estudo. A coleta dos GPC foi feita com tempo de ocupação de 5 épocas (média de cinco leituras de localização do *rover* no GPC) no dia 24 de julho de 2019 (Figura 3.3) e o número total de trinta GPC (Tabela 2).

Figura 3.3 – Coleta dos GPC.



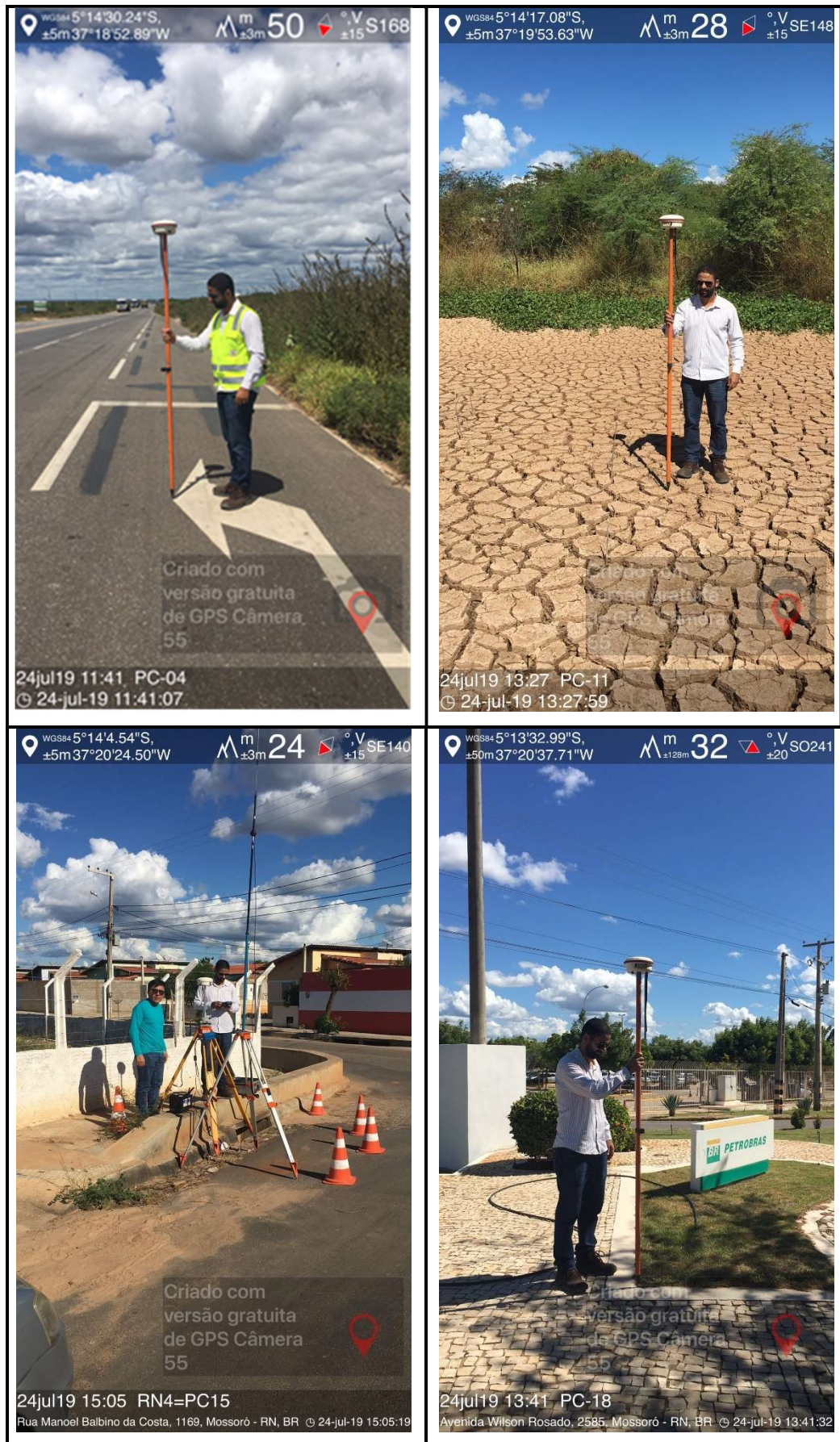


Tabela 2 – Coordenadas e precisão dos pontos de controle (GCP)

Nome	N (m)	E (m)	h (m)	sN (m)	sE (m)	sh (m)
Va	9.422.122,6579	685.705,0029	34,802	0,004	0,005	0,002
Vb	9.422.093,4660	685.712,5014	34,851	0,008	0,003	0,004
Vc	9.422.089,2544	685.725,3472	34,705	0,003	0,003	0,004
Vd	9.422.118,5539	685.717,4446	34,803	0,002	0,002	0,003
PC1	9.421.951,9033	685.793,9954	29,593	0,005	0,006	0,003
PC2	9.421.457,9701	686.146,8043	35,275	0,003	0,003	0,001
PC3	9.421.103,6003	686.378,3339	42,666	0,005	0,004	0,006
PC4	9.420.362,4703	686.781,0706	38,001	0,004	0,006	0,004
PC6	9.420.443,3702	685.987,8962	35,588	0,006	0,002	0,003
PC10	9.420.635,6327	685.246,6401	23,054	0,004	0,005	0,005
PC7	9.421.075,1562	685.423,6464	29,794	0,002	0,005	0,003
PC8	9.421.689,8325	685.411,4951	33,225	0,003	0,002	0,004
PC9	9.422.050,0492	684.863,8691	31,408	0,003	0,004	0,002
PC5	9.419.611,9015	685.748,7690	42,073	0,004	0,003	0,014
PC12	9.419.208,2793	684.915,1671	42,157	0,001	0,001	0,001
PC11	9.420.770,6940	684.912,1105	17,972	0,006	0,008	0,004
BB	9.420.782,8014	684.889,7520	18,032	0,000	0,000	0,000
PC18	9.422.127,9927	683.538,6006	23,609	0,005	0,006	0,009
PC14	9.421.655,8571	684.301,2807	24,652	0,002	0,005	0,003
PC13	9.420.982,1447	684.588,6763	15,273	0,014	0,004	0,002
PC15	9.421.146,0772	683.964,3480	13,004	0,003	0,003	0,002
RN4	9.421.152,0519	683.964,5395	13,607	0,002	0,005	0,005
PC17	9.421.340,2471	683.328,8795	6,752	0,004	0,004	0,022
PC23a	9.421.670,6821	682.843,5783	3,778	0,010	0,008	0,005
PC23b	9.422.090,1915	682.806,1587	7,302	0,003	0,007	0,004
PC23c	9.420.907,2656	682.542,5277	18,227	0,005	0,003	0,003
PA1	9.420.906,7433	682.538,2661	18,328	0,002	0,004	0,005
B1	9.421.152,1385	683.956,2386	11,683	0,004	0,005	0,003
B2	9.421.146,5382	683.946,1290	11,700	0,010	0,008	0,009
PC20	9.420.280,9610	682.223,3760	24,626	0,004	0,003	0,005

N – Coordenada Norte, E – Coordenada Este, h – altura elipsoidal, sN – desvio padrão para N, sE – desvio padrão E, sh - desvio padrão para h.

3.1.5 Dados pluviométricos

Para avaliação dos efeitos das vazões de pico nos eventos de precipitações e geração de hidrogramas, foi utilizada a curva IDF (intensidade – duração - frequência) proposta por Santos (2015) que atualizou os parâmetros para a cidade de Mossoró através de série histórica pluviométrica de 1964 a 2013, obtendo os seguintes valores: $K = 752$, 889 , $a = 0,221$, $b = 9,778$ e $c = 0,741$, resultando na seguinte equação para definição da intensidade de chuva:

$$I_m = \frac{752,889 \cdot T^{0,221}}{(t + 9,778)^{0,741}} \quad (\text{Equação 4})$$

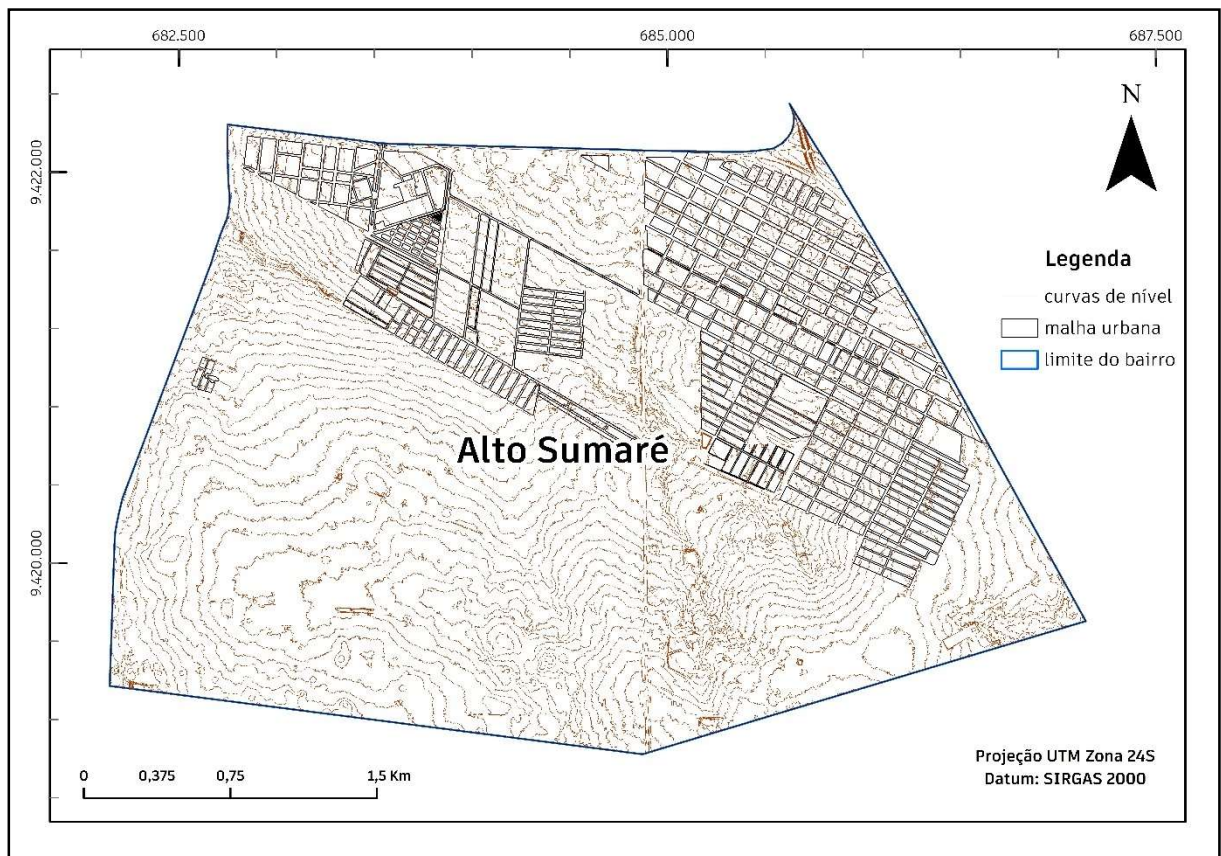
Onde: i_m = intensidade média máxima, em mm/h; T = tempo de recorrência em anos;
 t = duração da chuva, em minutos.

3.2. Processamento dos dados

3.2.1 Segmentação das curvas de nível

Na etapa de processamento dos dados, para geração do Modelo Digital de Elevação – MDE da área de estudo, foi feita a segmentação das curvas de nível (Figura 3.4), onde foram usados dados do levantamento topográfico (3.1.1) e através da ferramenta *Clip* no ArcGIS foi usado como máscara a delimitação da área (3.1.2).

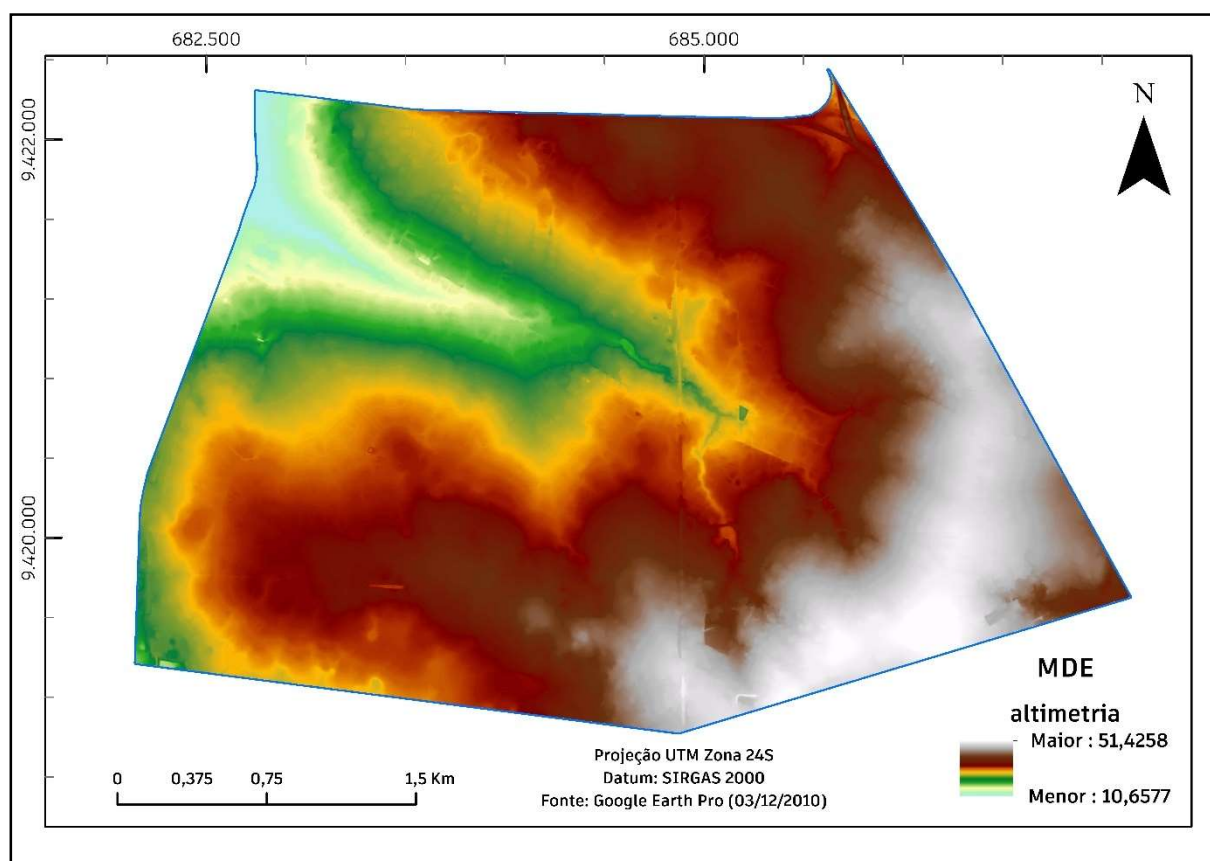
Figura 3.4 – Segmentação das curvas de nível para geração do MDE e área ocupada 2019 do bairro Alto Sumaré – Mossoró/RN.



3.2.2 Geração do MDE

Usando as curvas de nível segmentadas conforme descritas no processo anterior, foi elaborado o MDE (Figura 3.5) utilizando o interpolador *Topo to Raster* no ArcGIS. A rotina de processamento consistiu em importação do *shape* de limite do bairro Alto Sumaré e o *shape* das curvas de nível, em seguida através da caixa de ferramentas do ArcGIS foi procedido o comando *Topo to Raster*, definindo-se o campo elevação no *shape* das curvas de nível e o campo área no *shape* do limite do bairro, e tamanho da célula de saída de 50 centímetros, assumindo-se as demais configurações padrões do ArcGIS para geração do MDE. O MDE gerado apresentou algumas feições topográficas, como por exemplo a Lagoa do Residencial Bella Residence, uma segunda lagoa natural existente no bairro e elevações de um viaduto na BR-304.

Figura 3.5 – Modelo Digital de Elevação do bairro Alto Sumaré – Mossoró/RN.

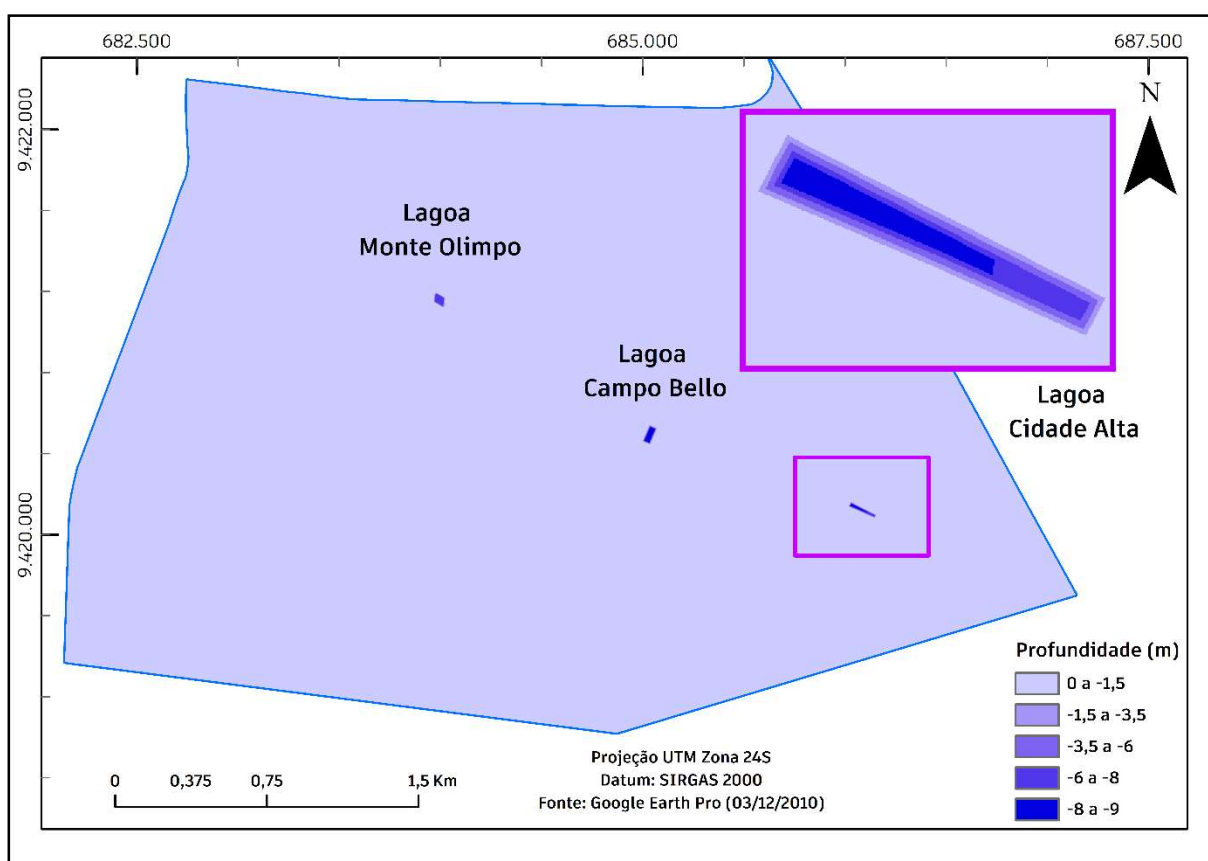


3.2.3 Atualização do MDE

A geração do MDE, comparada as cenas adquiridas do *Google Earth Pro* e após exploração da área de estudo permitiu constatar, após o levantamento e geração das curvas de nível em 2016, que houve transformações na bacia hidrográfica. Identificou-se que foram

construídas 4 lagoas, sendo duas no Residencial Cidade Alta, uma no Residencial Campo Belo e uma no Residencial Monte Olimpo. Assim, foi necessária atualização do MDE com inclusão das infraestruturas (lagoas) que influenciam diretamente na dinâmica do escoamento e acúmulo na bacia hidrográfica. Dessa forma, foram criados polígonos concêntricos nas áreas das lagoas, espaçados adequadamente para que, ao gerar o modelo *raster* das lagoas, esses apresentassem inclinação adequada do talude das lagoas. A cada polígono foi atribuído cota altimétrica, sendo atribuído zero ao polígono mais externo, e aos polígonos internos sequencialmente valores negativos decrescentes até à profundidade de cada lagoa. O passo seguinte foi a geração de MDE de cada lagoa para somar-se ao MDE da área de estudo (Figura 3.6). Das 4 lagoas, somente uma das lagoas do Residencial Cidade Alta não foi somado ao MDE da área de estudo, pois não faz parte da bacia hidrográfica.

Figura 3.6 – Modelo Digital de Elevação das lagoas artificiais do bairro Alto Sumaré – Mossoró/RN.



Na visita de campo para coleta de pontos de controle (GPC) foram feitas inspeções em 3 das lagoas artificiais construídas na área de estudo (Figura 3.7). Adicionalmente, foi adquirido detalhe de projeto das lagoas sobre as quais será feita uma breve descrição:

a) Lagoa Residencial Cidade Alta de acumulação e infiltração, volume de acumulação de 3.689,52 m³; profundidade de 7,00 a 8,00 metros e possui descarregador de fundo a 2,20 metros da cota de fundo, de forma que há acumulação de volume morto.

b) Lagoa Residencial Cidade Jardim 1 de acumulação e infiltração, volume de acumulação de 6.500,00 m³, profundidade de 2,50 a 3,00 metros e não possui descarregador de fundo, sendo o volume excedente drenado pela soleira de jusante.

c) Lagoa Residencial Campo Bello de acumulação e infiltração, volume de acumulação de 21.990,95 m³, profundidade de 10 metros, não possui descarregador de fundo.

d) Lagoa Residencial Monte Olimpo de acumulação e infiltração, volume de acumulação de 17.277,77 m³, profundidade de 8,50 metros, possui descarregador intermediário a 3,24 metros acima da cota de fundo, de forma que há acumulação de volume morto.

Figura 3.7 – Lagoas artificiais construídas na área de estudo: a) Lagoa Residencial Cidade Jardim 1; b) Lagoa Residencial Campo Bello; c) Lagoa Residencial Monte Olimpo.



3.2.4 Cálculo da altitude ortométrica (H) e extração dos valores do MDE

Para calibração, foram obtidos os valores da ondulação geoidal (N) de cada GPC (etapa 3.1.4) através do MAPGEO2015 (IBGE, 2015), a partir dos quais conheceu-se a altura ortométrica (H) de cada GPC (Tabela 3) através do cálculo aritmético: $H = h - N$.

Tabela 3 – Pontos de controle (GCP) com ondulação geoidal (N) e altura ortométrica (H)

Nome	N (m)	E (m)	h (m)	N (m)	H (m)
Va	9.422.122,6579	685.705,0029	34,802	-7,22	42,0215
Vb	9.422.093,4660	685.712,5014	34,851	-7,22	42,0712
Vc	9.422.089,2544	685.725,3472	34,705	-7,22	41,9248
Vd	9.422.118,5539	685.717,4446	34,803	-7,22	42,0234
PC1	9.421.951,9033	685.793,9954	29,5934	-7,22	36,8134
PC2	9.421.457,9701	686.146,8043	35,2754	-7,21	42,4854
PC3	9.421.103,6003	686.378,3339	42,666	-7,21	49,8760
PC4	9.420.362,4703	686.781,0706	38,001	-7,20	45,2005
PC6	9.420.443,3702	685.987,8962	35,5880	-7,2	42,7880
PC10	9.420.635,6327	685.246,6401	23,0536	-7,21	30,2636
PC7	9.421.075,1562	685.423,6464	29,7935	-7,21	37,0035
PC8	9.421.689,8325	685.411,4951	33,2245	-7,22	40,4445
PC9	9.422.050,0492	684.863,8691	31,4078	-7,22	38,6278
PC5	9.419.611,9015	685.748,7690	42,0734	-7,19	49,2634
PC12	9.419.208,2793	684.915,1671	42,1574	-7,19	49,3474
PC11	9.420.770,6940	684.912,1105	17,9715	-7,21	25,1815
BB	9.420.782,8014	684.889,7520	18,0321	-7,21	25,2421
PC18	9.422.127,9927	683.538,6006	23,6088	-7,23	30,8388
PC14	9.421.655,8571	684.301,2807	24,6518	-7,22	31,8718
PC13	9.420.982,1447	684.588,6763	15,2726	-7,21	22,4826
PC15	9.421.146,0772	683.964,3480	13,0040	-7,22	20,2240
RN4	9.421.152,0519	683.964,5395	13,607	-7,22	20,8266
PC17	9.421.340,2471	683.328,8795	6,7524	-7,22	13,9724
PC23a	9.421.670,6821	682.843,5783	3,7780	-7,23	11,0080
PC23b	9.422.090,1915	682.806,1587	7,3018	-7,23	14,5318
PC23c	9.420.907,2656	682.542,5277	18,2274	-7,22	25,4474
PA1	9.420.906,7433	682.538,2661	18,328	-7,22	25,5476
B1	9.421.152,1385	683.956,2386	11,683	-7,22	18,9028
B2	9.421.146,5382	683.946,1290	11,700	-7,22	18,9195
PC20	9.420.280,9610	682.223,3760	19,2240	-7,22	26,4440

3.3. Calibração do MDE e criação do Modelo Digital de Superfície – MDS

3.3.1 Calibração do MDE

A calibração do MDE foi procedida de acordo com a metodologia desenvolvida por Araújo *et al.* (2018). Nessa etapa, foram descartados nove GPC detalhadas a seguir: PC3 e PC4, definidos previamente através do *Google Earth Pro* na fronteira da área de estudo, mas que após coleta, projeção e análise preliminar, verificou-se que esses ficaram fora da área de estudo; Vb, Vc e Vd que devido a proximidade entre si entendeu-se que poderiam provocar uma tendência durante a calibração, assim optou-se pelo GPC com menor desvio padrão da altitude geométrica (Va); B1 e B2 (Figura 3.8) que foram GPC coletados na soleira de caixas de boca de lobo, cujo uso provocaria uma tendência de erro na calibração por não representarem a superfície real do terreno; RN4 que foi usado na mudança da antena GNSS, necessária após início de perda de sinal durante a coleta dos vetores, e também por estar muito próximo do PC15; PA1, usado como ponto de apoio do PC23 e que apresentou maior desvio padrão de altitude geométrica comparado ao PC23. Em seguida, os GPC foram projetados no *raster* do MDE e através do comando *Extract Values to Points* no ArcGIS, obteve-se as altitudes de cada GPC.

Com as altitudes ortométricas de cada GPC e correspondentes no MDE, procedeu-se à análise estatística (Tabela 4), onde o valor da altitude ortométrica é assumido como variável dependente ($f(x)$) e o valor da altitude no MDE como variável independente (x). A comparação da equação de regressão linear para 21 GPC e 20 GPC, demonstrou que eliminando o PC17, obtêm-se uma melhora na acurácia com redução de valor do RMSE.

Figura 3.8 – Coleta de vetores do GPC B2 na soleira da boca de lobo.



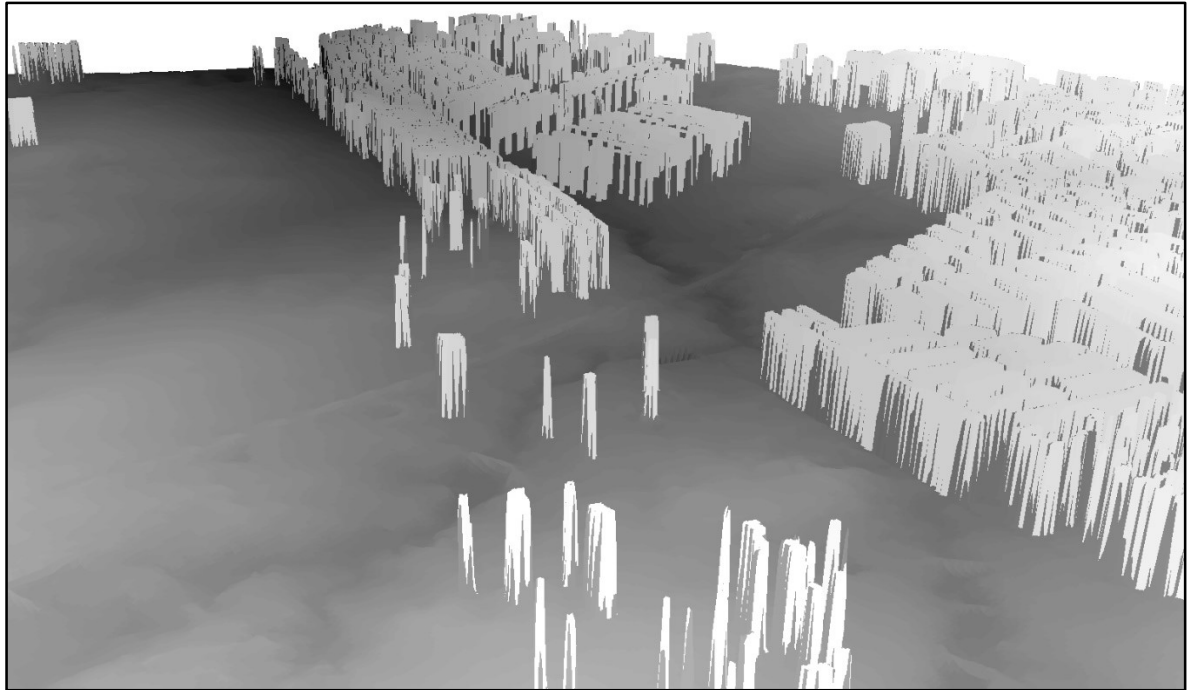
Tabela 4 – Parâmetros usados na regressão linear, $H(\text{GCP}) - f(x)$, $H(\text{MDE}) - x$ e variações entre as altimetrias ($\Delta 1$)

Nome	H (GPC)	H (MDE)	$\Delta 1$	H (MDE calibrado)
VTa	42,022	41,027	-0,995	41,388
PC1	36,813	36,127	-0,687	36,420
PC2	42,485	42,275	-0,211	42,653
PC6	42,788	42,785	-0,003	43,171
PC10	30,264	29,582	-0,682	29,784
PC7	37,004	36,988	-0,016	37,293
PC8	40,445	40,063	-0,382	40,410
PC9	38,628	38,007	-0,621	38,326
PC5	49,263	49,008	-0,255	49,480
PC12	49,347	49,149	-0,198	49,623
PC11	25,182	24,968	-0,213	25,106
BB	25,242	25,070	-0,172	25,210
PC18	30,839	30,156	-0,682	30,367
PC14	31,872	31,831	-0,041	32,064
PC13	22,483	22,888	0,406	22,998
PC15	20,224	20,002	-0,222	20,071
PC23a	11,008	11,135	0,127	11,081
PC23b	14,532	14,691	0,159	14,686
PC23c	25,447	25,737	0,290	25,886
PC20	26,444	26,159	-0,285	26,314

3.3.2 Geração do MDS simplificado

Para um melhor resultado da análise do escoamento superficial das águas pluviais, conforme descrito por Lima (2019), que ressalta a importância da consideração dos fatores antrópicos no ambiente urbano, foram usados os valores aplicados por Lee et al. (2016) que atribuiu valor altimétrico de 0,20 metros para calçadas e 20 metros para lotes urbanos. No entanto, a presente dissertação, adotou valores de 0,20 para as quadras de lotes e 20 metros para edificações (Figura 3.9), que foram vetorizados conforme descrito na seção 3.1.2. e deram origem a polígonos que foram exportados no ArcGIS como arquivo *shape*. Os valores altimétricos foram aplicados somente às edificações, pois verifica-se que no fluxo superficial as águas pluviais podem seguir através dos lotes. Os *shapes* das quadras e edificações com valores altimétricos foram usados como entrada para geração de um *raster* através do comando *Feature to raster*, que somado ao *raster* do MDE calibrado, gerou como produto o MDS simplificado.

Figura 3.9 Vista em perspectiva de MDS simplificado



3.4 Modelagem Hidrológica Superficial

3.4.1 Análise geomorfológica preliminar associada à processo de crescimento urbano

A área de estudo está inserida em contexto geomorfológico propício à alagamento, pois embora a bacia hidrográfica da área seja predominantemente aberta, o que facilita o escoamento, a declividade do terreno é predominante baixa, comum a terrenos planos. Outro aspecto é o contexto geológico, pois a área está predominantemente inserida na Formação Jandaíra do grupo Barreiras com solo do tipo salino, também chamado de Planossolos Solonchak e Solnetz, que apresenta más condições de drenagem (IDEMA, 2005).

3.4.2 Identificação e avaliação de baixos topográficos

Abdelsalheen et. al (2016) aborda que a forma tradicional de delimitação das bacias hidrográficas é feita pelo uso das ferramentas do Arc Hydro, que é um processo sistemático onde o efeito do armazenamento nas depressões é eliminado. Isso ocorre porque a ferramenta *Fill Sink* remove todas as depressões e produz um MDE hidrologicamente corrigido. Assim, conhecer as áreas de concentração de águas pluviais em áreas urbanizadas é importante para correlacionar aos elementos urbanos e avaliar o planejamento da bacia hidrográfica.

A identificação das depressões na área de estudo foi feita através da ferramenta *Depression Evaluation* do software ArcGIS. No processamento, assim como Lima (2019),

eliminou-se baixos topográficos cujos valores de profundidade eram menores que 1 metro, tal valor foi definido em função da precisão dos dados usados na geração do MDE. O processamento gerou arquivo de camadas com 31 áreas de baixos topográficos e suas respectivas microbacias de contribuição.

3.4.3 Cálculo dos volumes acumulados nos baixos topográficos

Os volumes acumulados nos baixos topográficos foram calculados seguindo a forma tradicional de delimitação de bacias hidrográficas, onde a partir do MDS simplificado foi criado o *raster* de direção de fluxo através da ferramenta *Flow Direction* no ArcGIS. O *raster* com a direção de fluxo de saída de cada célula foi em seguida usado como *raster* de entrada na ferramenta *Flow Accumulation* para geração da acumulação de fluxo.

A identificação das linhas de fluxo, gerada a partir da ferramenta *Stream Definition*, onde se definiu a densidade dos canais de drenagem, foi calculada para áreas de influência com dimensão de 7.500 m² devido a extensão da área de estudo e escala usada nas análises. Em seguida, após definição do *raster* com densidade dos canais, foram segmentados com a ferramenta *Stream Segmentation* para posterior geração da camada com os vetores de cada canal.

A etapa seguinte consistiu na vetorização das linhas de fluxo através da ferramenta *Stream to feature* do conjunto *Hidrology* da caixa de ferramentas *Spatial Analyst*, cujos *raster* de entrada foram o *raster* produzido pela ferramenta *Flow Direction* e *Stream Segmentation*.

A identificação do percurso mais extenso dentro das micro bacias dos baixos topográficos foi feita através da ferramenta *Longest Flow Path Catchment*, onde como parâmetro de entrada são utilizados o *raster Flow Direction* e camada com as áreas de contribuição dos baixos topográficos. Com a camada gerada, faz-se a extração dos pontos inicial e final da *polyline*, que são obtidos através da ferramenta *Create points on lines*. A última etapa consiste na extração dos valores altimétricos do início e fim de cada *polyline* que é feita através da ferramenta *Extract value to point* no ArcGIS.

Para calcular o coeficiente de deflúvio de cada micro bacia, foi usado a ferramenta *Intersect*, tendo como camadas de entrada as áreas de contribuição de cada micro bacia e a camada com a área urbanizada da área de estudo.

Após as identificações das características de cada micro bacia de contribuição dos baixos topográficos (comprimento do talvegue, diferença altimétrica e extensão) procedeu-se à análise do escoamento conforme método proposto por Abdelsalheen et al. (2016) com as características de cada micro bacia dos baixos topográficos no software Excel da Microsoft ®

para os tempos de recorrência, $TR = 5, 10$ e 25 anos, sujeitos cálculos são apresentados nos anexos.

3.4.4 Cálculo dos volumes de contribuição nas lagoas artificiais construídas na área de estudo.

As linhas de fluxo geradas na etapa anterior foram usadas para cálculo dos volumes de contribuição nas lagoas artificiais e demais pontos de acumulação mais significativos. O processo consistiu em definir os pontos exutórios de cada lagoa e ponto de acumulação dentro da rede de fluxo, criando um arquivo *shape* de pontos para juntamente com o *raster* de direção de fluxo criado com a ferramenta *Flow Direction*, usar como entrada na ferramenta *Watershed* da caixa de ferramentas *Hydrology* no ArcGIS. O processamento gerou um *raster* com as sub-bacias de cada ponto exutório. Esse arquivo raster foi vetorizado através da ferramenta *Raster to Polygon* para cálculo das características das sub-bacia.

Para identificação do maior caminho a ser percorrido dentro de cada sub-bacia, extensão do percurso, cota altimétrica de início e fim do caminho, e área urbanizada em cada sub-bacia, foram adotados os procedimentos descritos em 4.3. Com essas informações de cada sub-bacia foram feitos os cálculos de acumulação para os tempos de recorrência, $TR = 5, 10$ e 25 anos através do software Excel.

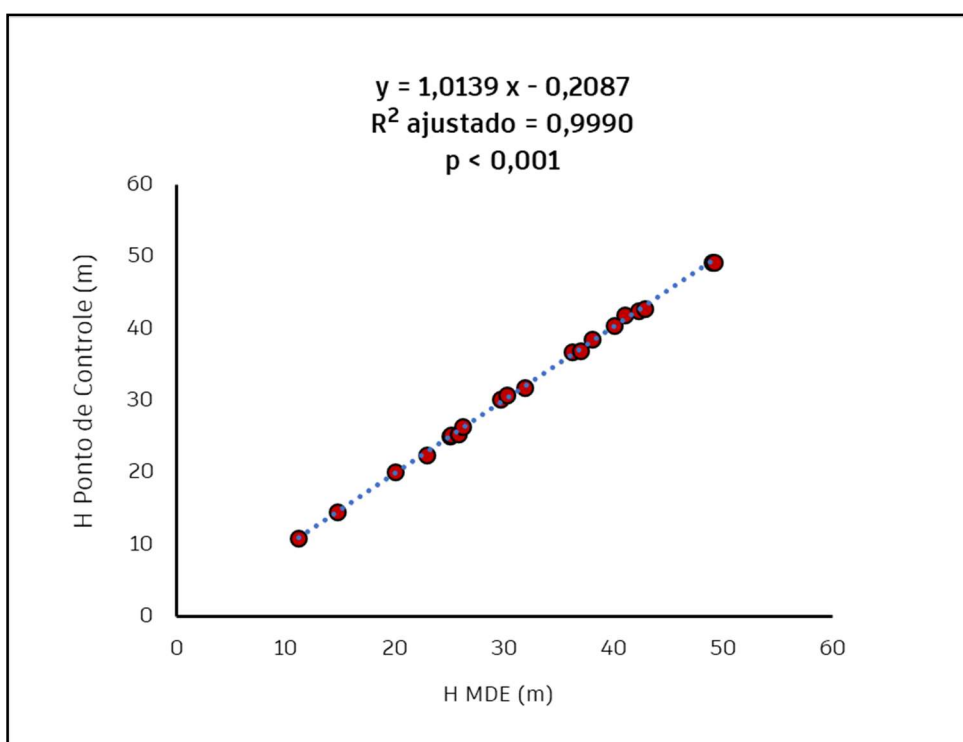
4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados da aplicação dos procedimentos metodológicos no Bairro Alto Sumaré em Mossoró/RN. Nos procedimentos, cujos dados foram avaliados através de geotecnologias, é apresentado o comportamento da rede de fluxos dos canais de drenagem, os volumes de acumulação nos baixos topográficos para chuva com diferentes tempos de recorrência baseados nas características de suas micro bacias e dos volumes acumulados nas lagoas de amortecimento construídas artificialmente na área quando essas lagoas não são mais capazes de amortecer as vazões de pico.

4.1 MDE Calibrado

A calibração realizada com 20 pontos de controle (GPC) pelo método proposto por Araújo et al. (2018) mostrou-se robusto ao apresentar um $R^2 = 0,999$ e $p < 0,001$ (Figura 4.1) o que permite concluir que existe uma forte correlação entre os pontos de controle coletados através de GNSS e o MDE. O modelo forneceu uma equação de regressão: $y = 1,0139 x - 0,2087$ usada na calibração do MDE, em que o valor altimétrico de cada pixel do MDE representou o valor de x , retornando o valor altimétrico y do MDE calibrado.

Figura 4.1 – Comparativo H – Bases de referência e H – MDE por Regressão Linear.



Na estatística descritiva dos dados da área de estudo (Tabela 5), onde destaca-se, com base na média de variação da altura dos pontos de controle em relação à altura do MDE não calibrado, com valor de -0,234 metros, que o plano do MDE não calibrado estava acima do nível dos pontos de controle. Quanto à média de variação dos pontos de controle e MDE calibrado apresentarem o valor zero, devido ao ajustamento do plano do MDE ao plano dos pontos de controle.

Observou-se também a redução do parâmetro do RMSE do MDE não calibrado (22,50%), com valor de 0,40 para 0,31 do MDE calibrado. Isso se deve ao fato de que a base de dados topográficos usados na geração do MDE foi produzida de perfilamento a laser decorrente de sobrevoo na área de estudo.

Tabela 5 – Estatística descritiva dos dados altimétricos para área de estudo.

	H - GPC (m)	H - MDE (m)	$\Delta H = H \text{ (GPC)} - H \text{ (MDE)}$	H - MDE calibrado	$\Delta H = H \text{ (GPC)} - H \text{ (MDE calibrado)}$
Mínimo	11,008	11,135	-0,995	11,081	-0,633
Mediana	31,355	30,994	-0,212	31,215	0,020
Média	32,117	31,882	-0,234	32,117	0,000
Máximo	49,347	49,149	0,406	49,623	0,515
Erro padrão	2,425	2,390	0,081	2,424	0,074
Variância	117,594	114,289	0,130	117,486	0,108
Des. Padrão	10,844	10,691	0,361	10,839	0,329
RMSE (m)		0,40		0,31	

4.2 Processo de ocupação urbana na área de estudo

Em 2000 a população residente na área de estudo era de 3.947 habitantes, enquanto na década seguinte esse número cresceu 64,25% (Tabela 6), crescimento maior que o crescimento da população da cidade de Mossoró. Esse aumento populacional já demonstrava o potencial da área para expansão urbana.

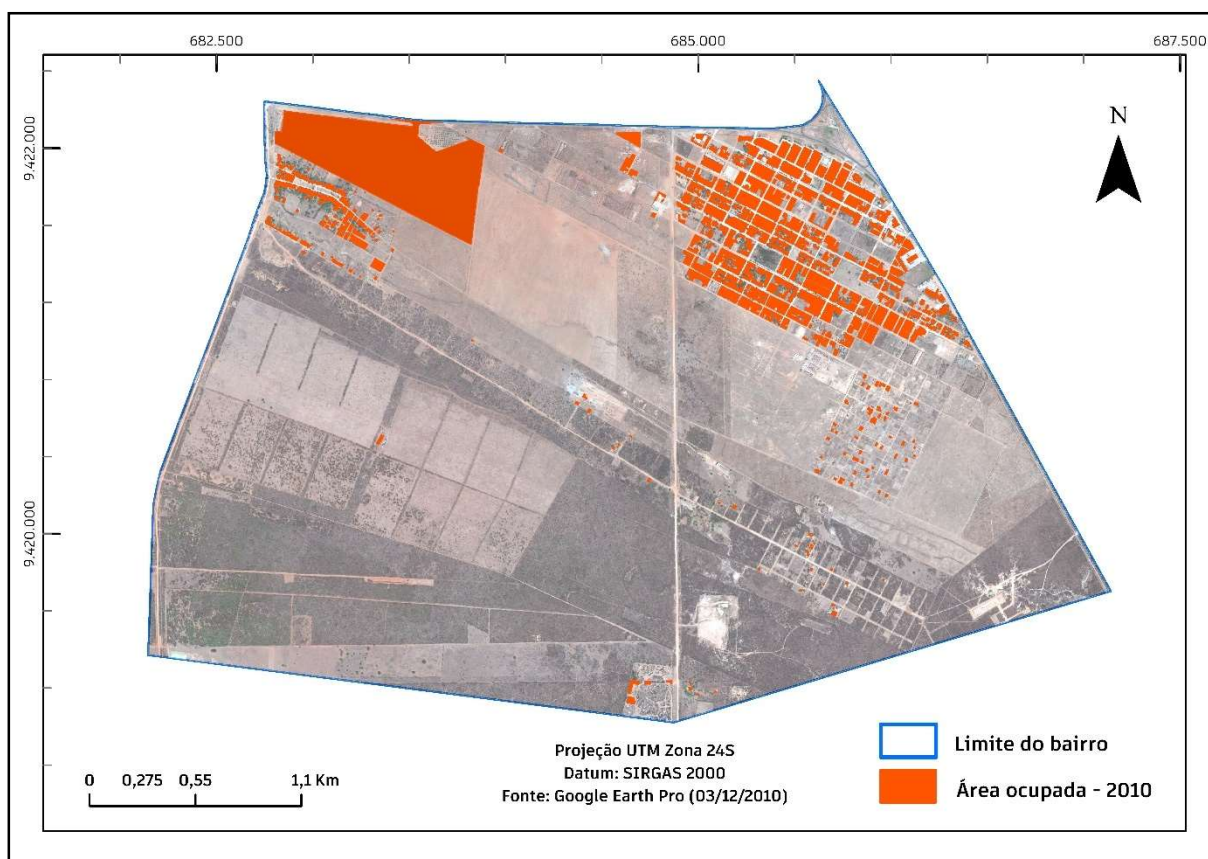
Tabela 6 – Crescimento da população na área de estudo período 2000 a 2010.

População			Crescimento percentual
Local	2000	2010	
Alto do Sumaré	3.947	6.483	64,25%
Mossoró	213.841	262.076	22,56%

Fonte: CENSO 2000, CENSO 2010, IBGE.

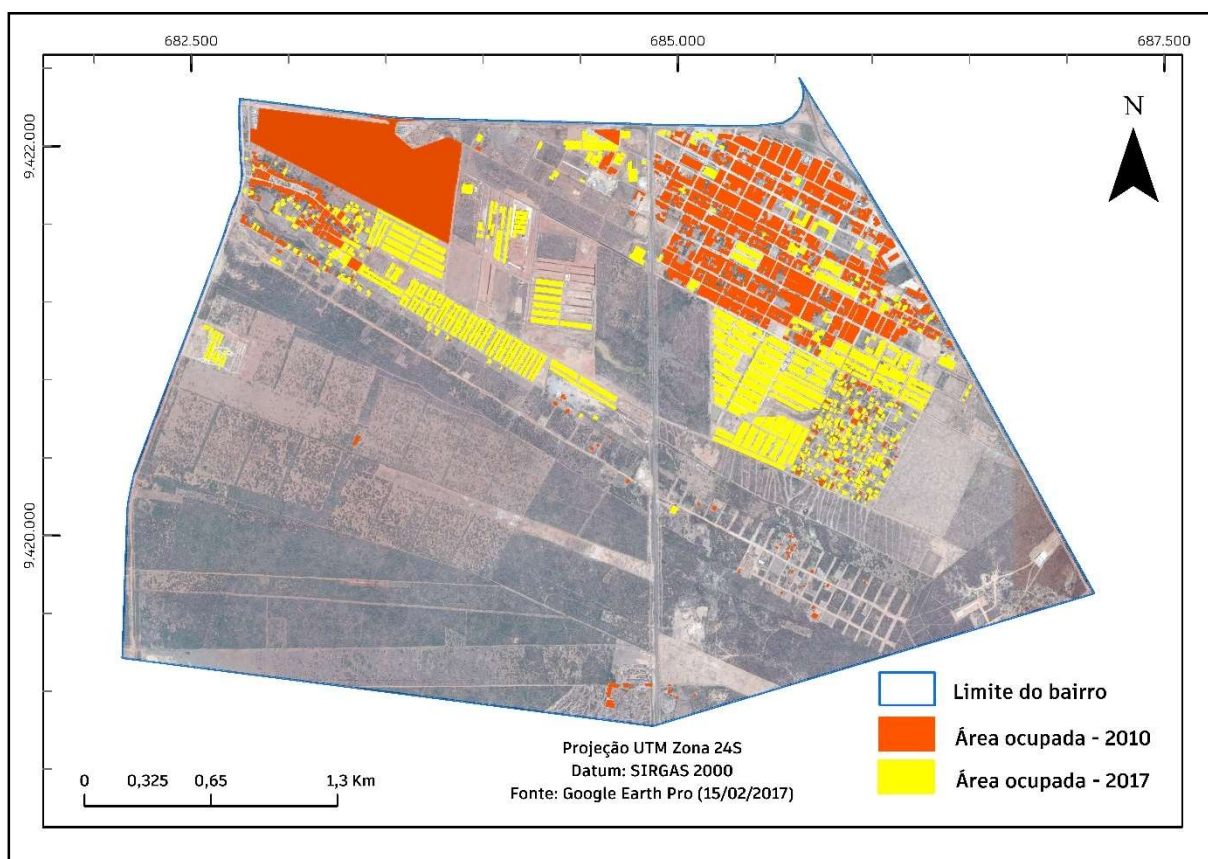
A ocupação iniciou-se na porção nordeste e em parte da porção noroeste do bairro Alto Sumaré, onde se destaca a Unidade de Negócios da PETROBRAS (UN-RNCE/ATP-MO), que representava 5,62% da área total do bairro (Figura 4.2). A partir de 2010 ocorreu a segunda fase de ocupação urbana, com vetores de crescimento tanto na porção nordeste em direção à parte sul da área de estudo, quanto na porção centro-oeste.

Figura 4.2 – Ocupação urbana na área de estudo em 2010.



Em 2017 a porcentagem de área ocupada no bairro era de 10,15%, o que representa um acréscimo de 180,75% na taxa de ocupação do bairro. A expansão urbana na porção nordeste já havia se consolidando com as construções dos residenciais *Bella Residence* e *Cidade Jardim 1*; igualmente, já havia se iniciado a ocupação da porção centro-oeste do bairro com a construção do residencial *Monte Olimpo*, *Cidade Jardim 3* e *Bosque dos Pássaros* (Figura 4.3).

Figura 4.3 – Ocupação urbana na área de estudo em 2017.



Já no ano de 2019 iniciou-se a expansão da ocupação na parte sudeste da área de estudo, com a construção do residencial Cidade Alta e Campo Bello, e na porção centro-oeste há também a conclusão do residencial Bosque dos Pássaro e Village do Oeste (Figura 4.4). No biênio 2017 – 2019 a taxa de expansão no bairro foi de 112,75% (Tabela 7).

Figura 5.4 – Ocupação urbana na área de estudo em 2019.

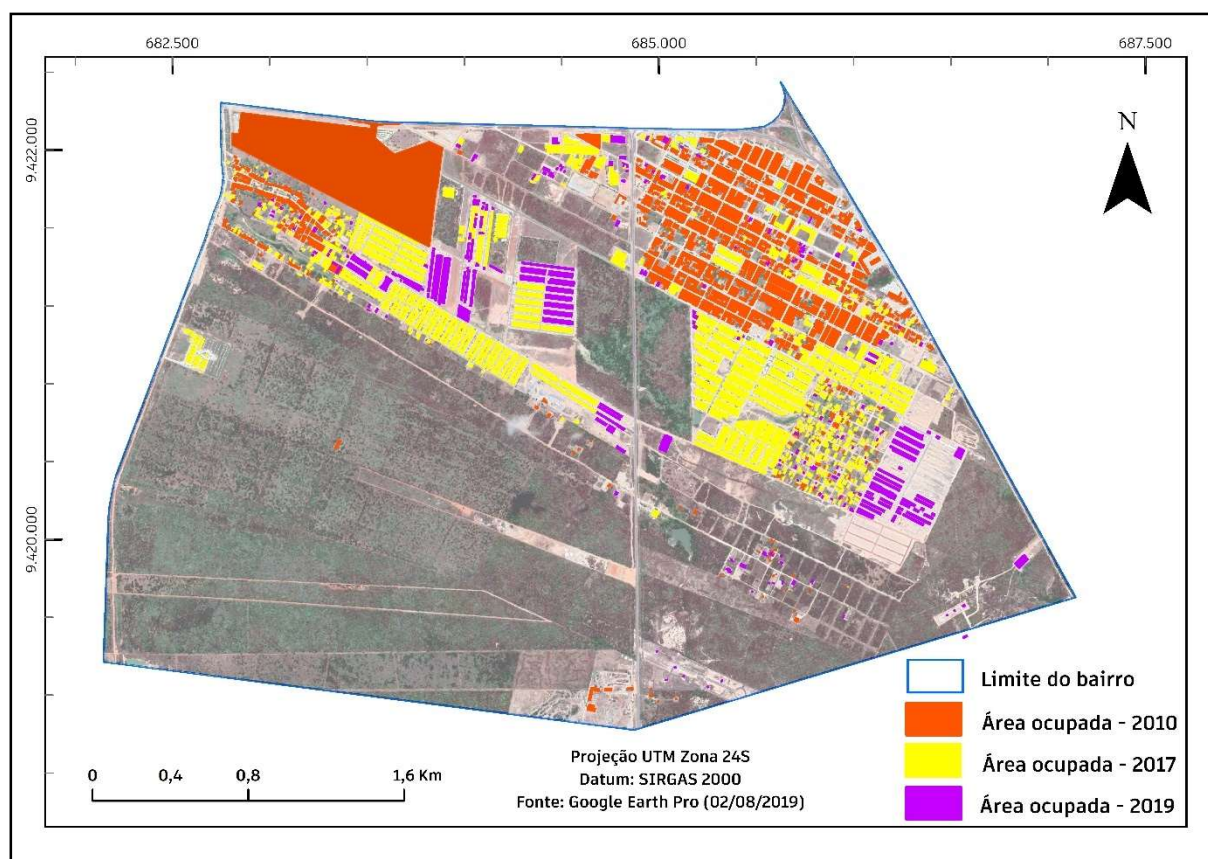


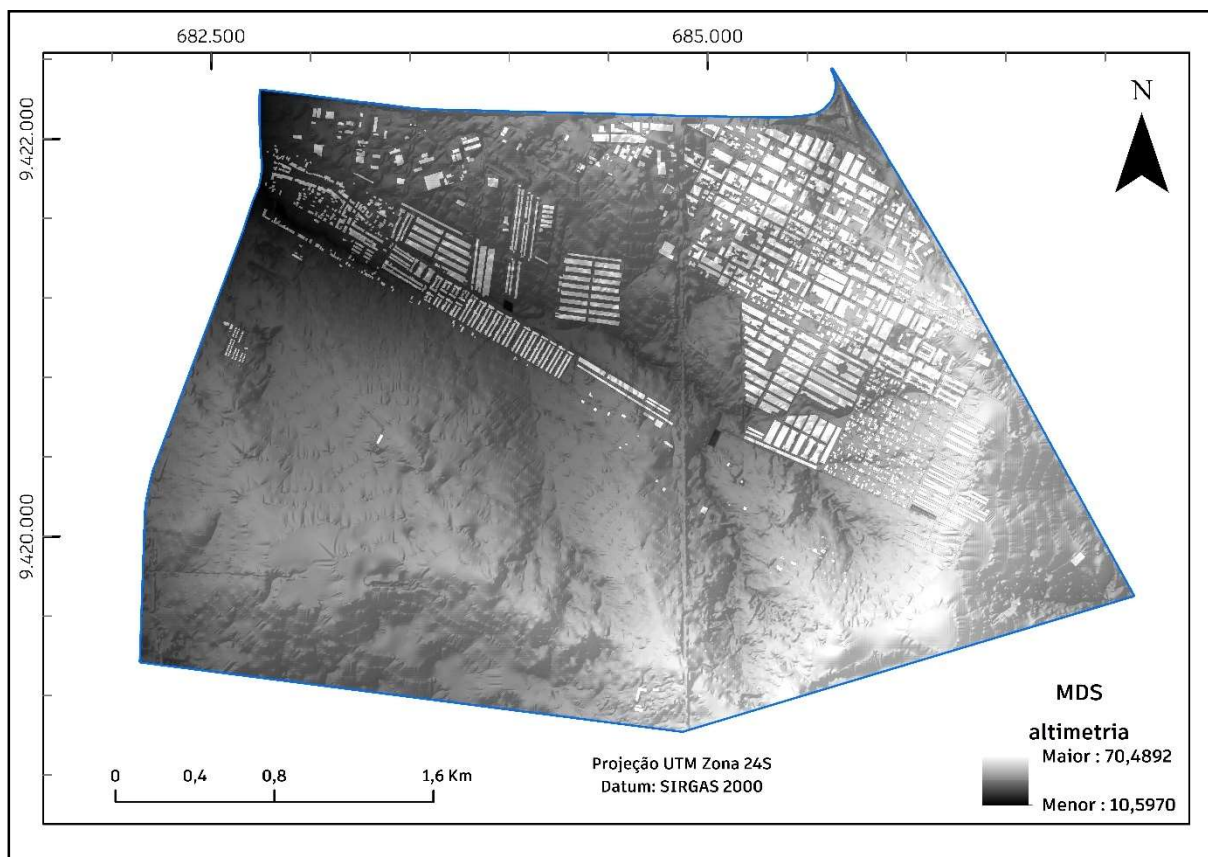
Tabela 7 – Crescimento da área de ocupação na área de estudo período 2010 a 2019.
Área do bairro: 11.963.277,05 m²

Ano	Área total de edificações	Taxa Ocupação	Taxa Crescimento da Ocupação
2010	671.807,17	5,62%	-
2017	1.214.265,28	10,15%	180,75%
2019	1.369.084,55	11,44%	112,75%

4.3 MDS simplificado

O MDS simplificado incorporou feições antrópicas à área de estudo, esses elementos foram essenciais na análise seguinte que consistiu na geração de linhas de fluxo de escoamento. No mapa da Figura 4.5, onde foi usado o efeito sombra, verifica-se, associando-se ao histórico da expansão urbana do bairro Alto Sumaré, descrita na etapa anterior (4.2), que o crescimento no bairro vem ocupado áreas mais baixas do relevo, que são mais propícias às inundações e alagamentos.

Figura 4.5 – Modelo Digital de Superfície simplificado da área de estudo.



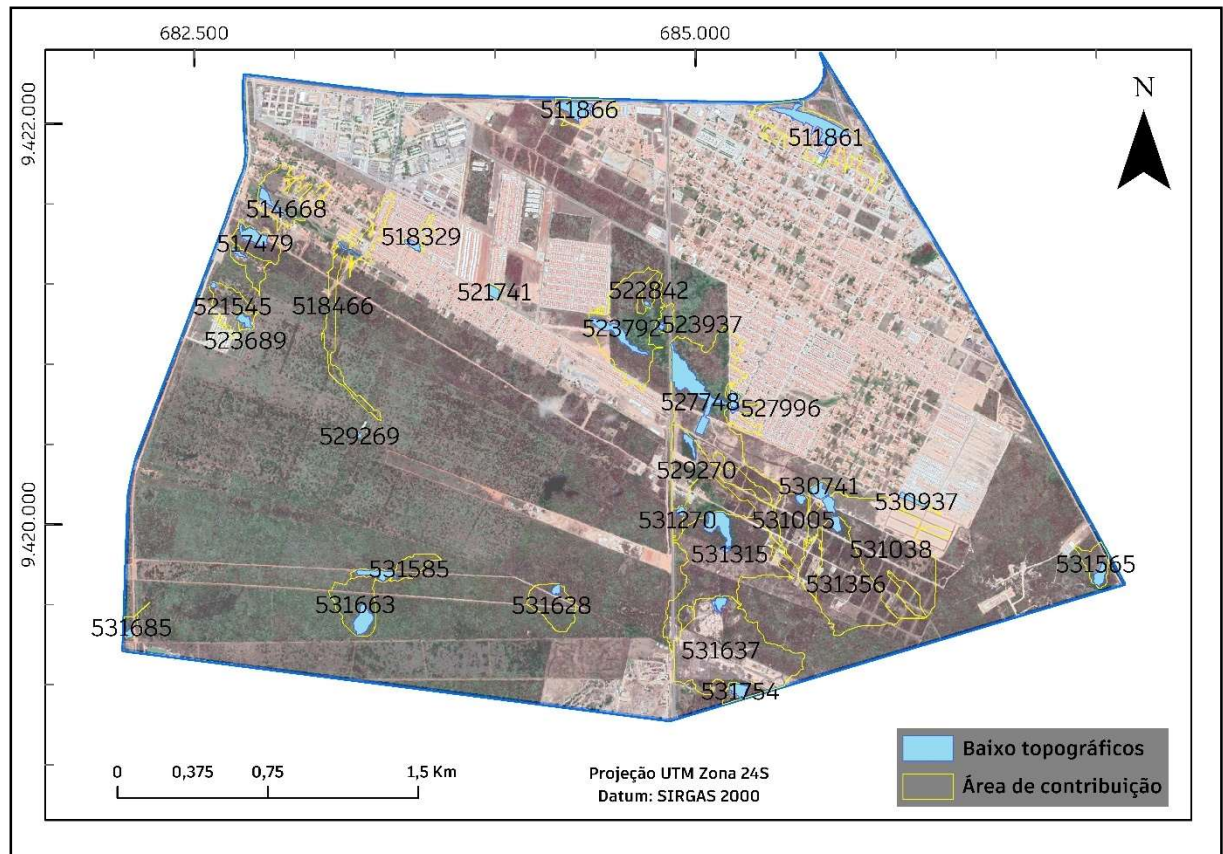
4.4 Depressões topográficas e rede de fluxo

Sobre o MDS simplificado foi aplicado a rotina de processamento *Depression Evaluation* do ArcGIS, que resultou na identificação de depressões, ou seja, baixos topográficos e suas respectivas áreas de contribuição. O resultado representou todos os baixos topográficos onde as células do entorno convergem para uma célula de altimetria abaixo. Assim, o mapa gerado representou também áreas cujas depressões possuíam profundidade menores que 1m. No entanto, o MDS simplificado teve origem em curvas de nível com precisão métrica e, portanto, os baixos topográficos com profundidade menores que 1m foram eliminados, restando na área de estudo 31 baixos topográficos significativos (Figura 4.6).

Os baixos topográficos 530937, 527996, 521741 e 518329 são lagoas artificiais construídas na área de estudo, as lagoas residenciais: Cidade Alta, Cidade Jardim, Monte Belo e Bosque dos Pássaros 1, respectivamente. Os baixos topográficos 530741, 531038, 531356, 531637, 531315, 531270, 514668 são pequenas barragens construídas ao longo do talvegue

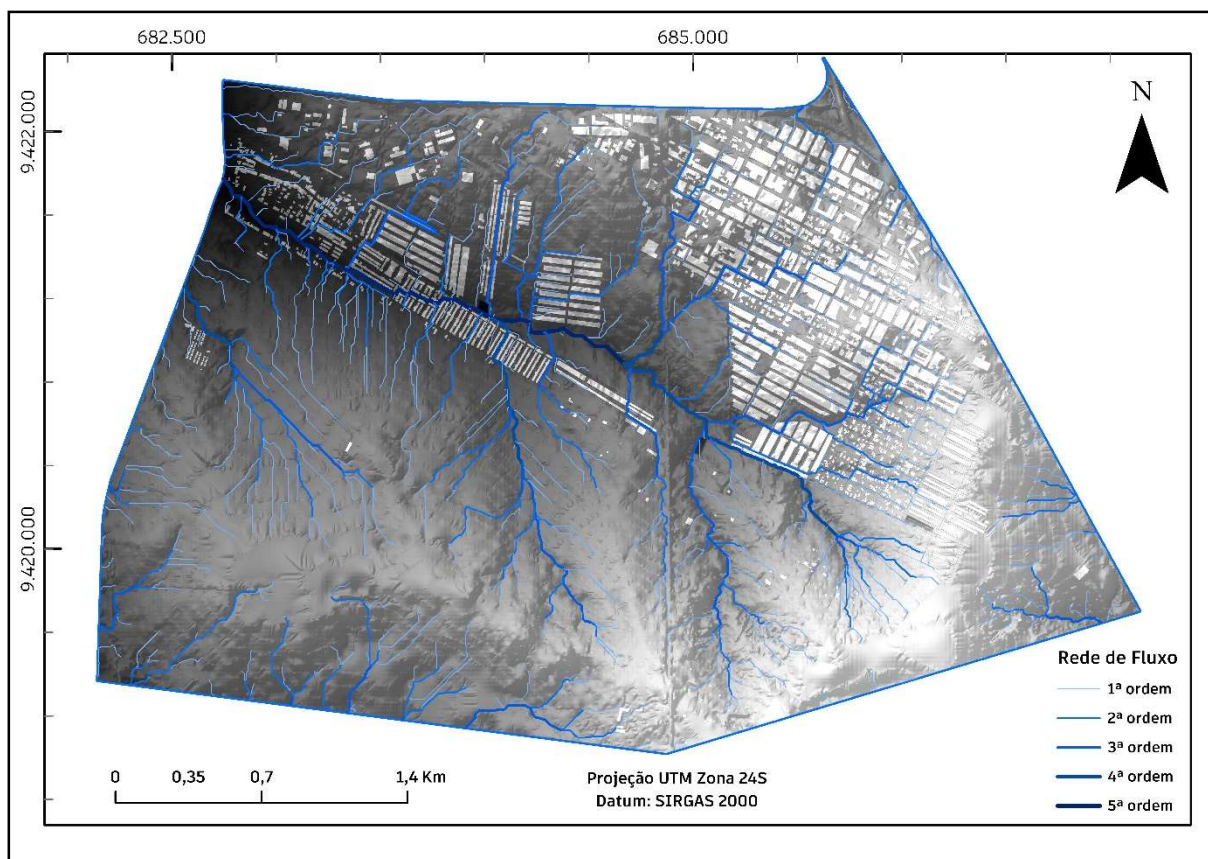
principal. Igualmente, os baixos topográficos 527748, localizado a montante de bueiro na BR-110 associado a lagoa artificial, e 523792 que é área lindeira ao residencial Bosque dos Pássaros 2 que inunda periodicamente.

Figura 4.6 – Depressões topográficas.



As redes de fluxo geradas apresentaram resultado esperado tanto para área urbanizada como para área ainda não antropizadas (Figura 4.7). O delineamento na área urbanizada ocorreu predominantemente através das ruas, o que demonstra o efeito da ação antrópica na urbanização, com a terraplenagem e pavimentação das ruas que cria um caminho preferencial das linhas de escoamento. Também a área livre de ocupação urbana apresentou linhas de fluxo nos pontos mais baixos da área de estudo, onde se formam os caminhos preferenciais de escoamento.

Figura 4.7 – Rede de fluxo na área de estudo.



4.5 Acumulação nos baixos topográficos

Os volumes de acumulação calculados para uma chuva com tempo de recorrência de 5 anos apresentaram valores inferiores aos volumes dos baixos topográficos (Tabela 8), dados completos dos cálculos no ANEXO A. Essa constatação indicou que para chuvas com tempo de recorrência dessa magnitude os baixos topográficos são capazes de amortecer o escoamento ao longo da bacia hidrográfica, eliminando transtornos de alagamento e inundação. Um comparativo linear demonstrou que o quociente do V_s pela Área da Depressão apresenta valores baixos, merecendo destaque ao baixo topográfico da micro bacia 518466 (Figura 4.6) que apresentou uma lâmina d'água de 17 centímetros. Essa é a parte mais baixa do canal principal a jusante da bacia hidrográfica que apresenta forte influência da ação antrópica, com a invasão de área de várzea através da construção de edificações (Figura 4.8).

Tabela 8 – Características da área de contribuição, área do baixo topográfico, volume do baixo topográfico e volume acumulado para uma chuva com tempo de recorrência, TR = 5 anos.

Contribuição Depressão (m²)	Area da Depressão (m²)	Vol. Depressões (m³)	V_s	Altura alagamento
112.713,50	22.900,25	23.445,77	873,36	0,04
27.310,50	10.257,50	4.230,36	26,71	0,00
58.405,25	3.877,25	2.306,36	124,63	0,03
28.881,50	7.577,50	5.552,95	-	0,00
10.036,75	2.402,75	2.637,24	78,24	0,03
64.613,00	907,50	421,49	155,03	0,17
18.781,00	1.340,75	394,09	-	0,00
30.317,75	611,75	399,23	4,18	0,01
3.544,25	2.794,50	15.978,31	-	0,00
8.941,50	567,50	267,12	-	0,00
6.718,75	2.852,00	1.517,57	-	0,00
122.852,75	10.225,00	5.026,59	42,96	0,00
8.368,50	1.064,50	424,72	11,90	0,01
187.079,25	28.521,25	49.843,88	203,79	0,01
19.877,00	3.877,75	6.777,08	84,07	0,02
482,50	387,25	286,44	-	0,00
78.322,25	2.677,50	1.552,53	2,32	0,00
18.683,25	4.289,00	4.610,17	2,89	0,00
4.451,75	2.942,50	13.480,42	2,62	0,00
44.229,00	1.716,25	1.065,95	0,53	0,00
214.565,50	3.613,25	2.366,07	33,63	0,01
8.002,75	1.501,50	930,39	-	0,00
185.057,00	12.780,75	14.611,36	1,50	0,00
131.599,25	3.043,00	3.373,99	2,00	0,00
21.324,25	4.495,50	3.100,23	0,03	0,00
25.332,75	5.345,25	7.958,26	-	0,00
38.598,75	1.643,75	912,86	-	0,00
198.214,75	3.406,50	1.346,35	5,81	0,00
50.571,50	9.049,50	3.522,95	-	0,00
7.389,00	1.207,75	699,24	-	0,00
12.580,00	4.461,50	3.464,40	-	0,00

V_s – Volume de contribuição do baixo topográfico para um TR = 5 anos.

Figura 4.8 – Construções no canal principal de drenagem no bairro Alto Sumaré. Baixo topográfico 515466.



Os volumes de acumulação calculados para chuva com tempo de recorrência de 10 e 25 anos também apresentaram valores inferiores aos volumes dos baixos topográficos (Tabela 8) ($V_s < \text{Vol. Depressões}$). O baixo topográfico da micro bacia 518466 seguiu o comportamento apresentado para uma chuva com $TR = 5$ anos, onde nos $TR = 10$ e 25 anos apresentou altura de lâmina d'água de 20 e 24 centímetros respectivamente (Tabela 9, Tabela 10), dados completos dos cálculos ANEXO B e ANEXO C.

Tabela 9 – Características da área de contribuição, área do baixo topográfico, volume do baixo topográfico e volume acumulado para uma chuva com tempo de recorrência, TR = 10 anos.

Contribuição Depressão (m²)	Area da Depressão (m²)	Vol. Depressões (m³)	V_s	Altura alagamento
112.713,50	22.900,25	23.445,77	1.017,94	0,04
27.310,50	10.257,50	4.230,36	31,13	0,00
58.405,25	3.877,25	2.306,36	145,26	0,04
28.881,50	7.577,50	5.552,95	-	0,00
10.036,75	2.402,75	2.637,24	91,19	0,04
64.613,00	907,50	421,49	180,70	0,20
18.781,00	1.340,75	394,09	-	0,00
30.317,75	611,75	399,23	4,87	0,01
3.544,25	2.794,50	15.978,31	-	0,00
8.941,50	567,50	267,12	-	0,00
6.718,75	2.852,00	1.517,57	-	0,00
122.852,75	10.225,00	5.026,59	50,07	0,00
8.368,50	1.064,50	424,72	13,86	0,01
187.079,25	28.521,25	49.843,88	237,53	0,01
19.877,00	3.877,75	6.777,08	97,99	0,03
482,50	387,25	286,44	-	0,00
78.322,25	2.677,50	1.552,53	2,70	0,00
18.683,25	4.289,00	4.610,17	3,37	0,00
4.451,75	2.942,50	13.480,42	3,06	0,00
44.229,00	1.716,25	1.065,95	0,61	0,00
214.565,50	3.613,25	2.366,07	39,19	0,01
8.002,75	1.501,50	930,39	-	0,00
185.057,00	12.780,75	14.611,36	1,74	0,00
131.599,25	3.043,00	3.373,99	2,33	0,00
21.324,25	4.495,50	3.100,23	0,03	0,00
25.332,75	5.345,25	7.958,26	-	0,00
38.598,75	1.643,75	912,86	-	0,00
198.214,75	3.406,50	1.346,35	6,78	0,00
50.571,50	9.049,50	3.522,95	-	0,00
7.389,00	1.207,75	699,24	-	0,00
12.580,00	4.461,50	3.464,40	-	0,00

V_s – Volume de contribuição do baixo topográfico para um TR = 10 anos.

Tabela 10 – Características da área de contribuição, área do baixo topográfico, volume do baixo topográfico e volume acumulado para uma chuva com tempo de recorrência, TR = 25 anos.

Contribuição Depressão (m²)	Área da Depressão (m²)	Vol. Depressões (m³)	V _s	Altura alagamento
112.713,50	22.900,25	23.445,77	1.246,42	0,05
27.310,50	10.257,50	4.230,36	38,12	0,00
58.405,25	3.877,25	2.306,36	177,87	0,05
28.881,50	7.577,50	5.552,95	-	0,00
10.036,75	2.402,75	2.637,24	111,66	0,05
64.613,00	907,50	421,49	221,26	0,24
18.781,00	1.340,75	394,09	-	0,00
30.317,75	611,75	399,23	5,96	0,01
3.544,25	2.794,50	15.978,31	-	0,00
8.941,50	567,50	267,12	-	0,00
6.718,75	2.852,00	1.517,57	-	0,00
122.852,75	10.225,00	5.026,59	61,31	0,01
8.368,50	1.064,50	424,72	16,98	0,02
187.079,25	28.521,25	49.843,88	290,84	0,01
19.877,00	3.877,75	6.777,08	119,98	0,03
482,50	387,25	286,44	-	0,00
78.322,25	2.677,50	1.552,53	3,31	0,00
18.683,25	4.289,00	4.610,17	4,13	0,00
4.451,75	2.942,50	13.480,42	3,75	0,00
44.229,00	1.716,25	1.065,95	0,75	0,00
214.565,50	3.613,25	2.366,07	47,99	0,01
8.002,75	1.501,50	930,39	-	0,00
185.057,00	12.780,75	14.611,36	2,13	0,00
131.599,25	3.043,00	3.373,99	2,86	0,00
21.324,25	4.495,50	3.100,23	0,04	0,00
25.332,75	5.345,25	7.958,26	-	0,00
38.598,75	1.643,75	912,86	-	0,00
198.214,75	3.406,50	1.346,35	8,30	0,00
50.571,50	9.049,50	3.522,95	-	0,00
7.389,00	1.207,75	699,24	-	0,00
12.580,00	4.461,50	3.464,40	-	0,00

V_s – Volume de contribuição do baixo topográfico para um TR = 25 anos.

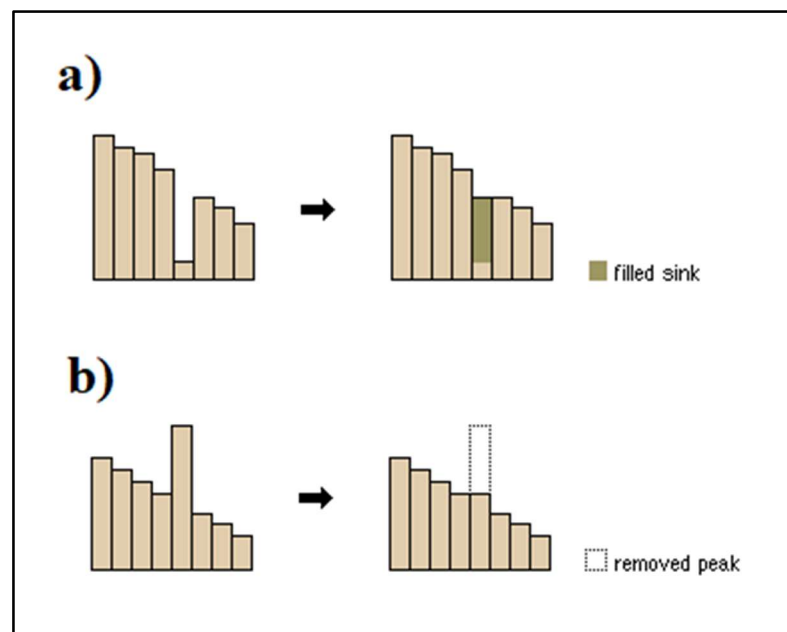
4.6 Volumes de contribuição nas bacias artificiais construídas na área de estudo

O processo de urbanização quando precedido de empreendimentos residenciais impõe na maioria das vezes ao uso e ocupação do solo a interconexão de redes de fluxos. Essa interconexão ocorre tanto pela alteração do relevo natural que é conferida pela terraplenagem de grandes áreas com fins imobiliários, onde a disposição das ruas cria um fluxo condicionado de escoamento, quanto pela interconexão das microbacias através de obras hidráulicas como

galerias e canais. Assim também é a metodologia tradicional de modelos de escoamento superficial por meio do ArcGIS que elimina as depressões e picos do MDE para formar um sistema de drenagem contínuo (Figura 4.9).

A definição dos pontos de exutórios a montante das lagoas artificiais conforme descrito em 4.4, permitiu a delimitação das sub-bacias de contribuição de cada lagoa, bem como as características das sub-bacias, como ponto mais extremo, cota altimétrica de início e fim e padrão de urbanização de cada bacia. Com essas características foram feitos cálculos dos volumes de acumulação de cada sub-bacia para os diferentes tempos de recorrência (TR= 5, 10 e 25 anos) (Tabela 11), dados completos dos cálculos ANEXOS D, E e F.

Figura 4.9 – a) Perfil de uma depressão antes e depois da ferramenta *Fill*. b) Perfil de um pico antes e depois da utilização da ferramenta *Fill*.



Fonte: ESRI (2010).

Tabela 11 – Características da área de contribuição, área do baixo topográfico, volume do baixo topográfico e volume acumulado para uma chuva com tempo de recorrência, TR = 5 anos.

Área de Contribuição (m²)	Área Urbanizada (m²)	Vol. Depressões (m³)	V _s (m³)			Lagoa de amortecimento
			TR = 5	TR = 10	TR = 25	
260.133,44	260.133,44	23.445,77	4.411,03	5.141,23	6.295,23	Viaduto BR-304
24.349,77	24.349,77	2.637,24	553,66	645,32	790,17	Lagoa R. Bosque dos Pássaros 1
8.919,86			-	-	-	-
40.409,03			-	-	-	-
585.153,08	585.153,08	2.306,36	11.609,81	13.531,71	16.569,04	Barragem extremo jusante
980.689,51	980.689,51	421,49	21.249,54	24.767,21	30.326,47	Bueiro final Monte Olimpo
4.452,27	4.452,27	13.480,42	136,41	159,00	194,68	Lagoa R. Cidade Alta
855.058,66	855.058,66	6.777,08	21.488,11	25.045,27	30.666,95	Lagoa Cidade Jardim 1
8.100,53			-	-	-	-
18.853,08	18.853,08	4.610,17	465,09	542,09	663,76	Barragens área R. Campo Bello
788.194,80	788.194,80		16.107,93	18.774,46	22.988,58	-
560.270,72	560.270,72	49.843,88	14.501,37	16.901,94	20.695,76	Lagoa montante bueiro BR-110
257.425,33	257.425,33	2.366,07	7.114,53	8.292,28	10.153,57	Barragens área R. Campo Bello
1.345.327,43	1.345.327,43	5.026,59	35.046,16	40.847,74	50.016,44	Lagoa natural próximo B. Pássaros 2
131.683,24	131.683,24	3.373,99	3.688,09	4.298,62	5.263,49	Barragens área R. Campo Bello
23.605,00			-	-	-	-
337.788,66	337.788,66	14.611,36	9.180,50	10.700,25	13.102,04	Lagoa Natural de Montante
2.047.111,94	2.047.111,94	15.978,31	49.597,94	57.808,44	70.784,15	Lagoa R. Monte Olimpo
213.737,96	213.737,96		6.085,09	7.092,42	8.684,39	-

V_s – Volume de contribuição do baixo topográfico para um TR = 5, 10 e 25 anos.

Os volumes acumulados calculados para uma chuva com TR = 5 anos apresentaram valores maiores que o volume da depressão, ou seja, volume calculado da lagoa através do *raster* nas lagoas Cidade Jardim 1 e Residencial Monte Olimpo, com $21.488,11 > 6.777,08 \text{ m}^3$ e $49.597,94 > 15.978,31 \text{ m}^3$ respectivamente. Além das lagoas, duas das pequenas barragens existentes na área onde há projeto do empreendimento Residencial Campo Bello, também apresentaram volume acumulado maior que o volume da depressão calculada no MDS simplificado. Outro ponto que apresentou capacidade de amortecimento pela depressão inferior ao volume acumulado para TR= 5 anos foi a lagoa natural existente nas proximidades do Bosque dos Pássaros 2, com volume acumulado $V_s = 35.046,16 \text{ m}^3$ maior que o volume da depressão de $5.026,59 \text{ m}^3$.

O bueiro no extremo jusante da linha de fluxo (talvegue principal), final do Residencial Monte Olimpo identificado no em 5.4 pelo baixo topográfico 515466, apresentou

um volume acumulado de 21.249,54 m³ maior que o volume da depressão, que é de 421,49 m³.

Também a capacidade de amortecimento da barragem no extremo jusante da área de estudo que apresentou um volume acumulado de 11.609,81 m³ que é maior que a capacidade de amortecimento da barragem que possui volume de 2.306,36 m³ calculado através do MDS simplificado.

Os volumes de acumulação aumentam a medida em que há um aumento do tempo de recorrência. O estudo não abordou o aspecto dinâmico de funcionamento dos dispositivos de amortecimento na bacia. No entanto, observa-se que a maior parte dos amortecimentos de escoamento superficial existente na área de estudo possuem funcionamento limitado, pois tanto as pequenas barragens como as lagoas artificiais tais como a lagoa do Cidade Jardim 1 e Residencial Campo Bello, não possuem descarregador de fundo. A existência desse tipo de dispositivo é indispensável em bacias hidrográficas abertas a fim de permitir que as lagoas funcionem como amortecimento, pois a medida em que há a ocorrência de chuvas a lagoa amortece o pico de descarga, permitindo vazões menores a jusante, compatíveis com vazões de pré-urbanização, evitando assim descargas maiores a jusante. Quando não há descarregador de fundo, as lagoas só permitem um amortecimento provisório até o completo enchimento e consequente galgamento da soleira extravasora. Tais situações podem gerar uma falsa sensação de segurança, pois nos períodos de maior regime pluviométrico, quando os eventos de chuvas vão ocorrendo de forma contínua, não permitindo tempo adequado para infiltração e evaporação do volume acumulado, basta uma chuva com pequeno tempo de recorrência para que toda a área a montante contribua com grandes descargas a jusante, gerando assim aumento do escoamento superficial e inundações e alagamentos a jusante.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta Dissertação de Mestrado abordou aspectos relativos ao crescimento urbano e as inundações e alagamentos. O estudo avaliou o crescimento urbano planejado do bairro Alto Sumaré, localizado na cidade de Mossoró/RN. No processo de ocupação urbana predominou a instalação de empreendimentos residenciais. A área é predominantemente plana e teve maior crescimento entre os anos de 2017 a 2019 com taxa de crescimento de ocupação de 112,75%.

Os empreendimentos instalados ocuparam não só as partes mais altas do relevo, mas também as áreas mais baixas onde concentra-se a linha de fluxo principal de escoamento da bacia hidrográfica. A infraestrutura dos sistemas de drenagem apresenta aspectos de escoamento por amortecido incompleto, haja vista que a maioria das lagoas e pequenas barragens estão instaladas sob o conceito de acumulação estaque, não havendo dispositivo de esvaziamento constante gradual.

O uso de geotecnologias aplicadas à análise de áreas suscetíveis a alagamentos se mostrou adequada, pois permitiu a identificação das áreas mais propícias à formação de pontos inundáveis que devem ter restrição quanto à sua utilização para fins imobiliários. A adaptação da abordagem metodológica proposta por Abdelsalheen et al. (2016) não mostrou aderência significativa para área de estudo, pois os volumes de acumulação calculados, tomando a área de contribuição dos baixos topográficos, não apresentaram aproximação significativa ao volume das depressões, mesmo para chuvas com tempo de recorrência de 25 anos. Contudo, outras pesquisas devem ser feitas para maior parametrização de todo o processo. Já a avaliação com áreas de contribuição maiores, que formam as sub-bacias das áreas de contribuição das lagoas e baixos topográficos, apresentaram volumes de acumulação que merecem destaque sob o ponto de vista de alerta aos moradores das áreas de influência. Nesse caso, sugere-se que em outros estudos sejam avaliados os aspectos dinâmicos da interrelação do amortecimento das lagoas e pequenas barragens para um melhor delineamento dos riscos de inundação e alagamentos.

A ausência de análise integrada do planejamento de macrodrenagem demonstrou que o sistema apresenta risco aos moradores. Em 2017, ainda durante a implantação da lagoa de amortecimento do Residencial Monte Olimpo, a ocorrência de evento de chuva provocou inundação e alagamento de ruas e residências do residencial Monte Olimpo.

Recomenda-se para trabalhos futuros a avaliação do impacto na dinâmica fluvial do rio Mossoró, pois a área de estudo está à margem do rio, o que permite associar um aumento

de contribuição de escoamento superficial e influência direta nas áreas de risco centrais da cidade de Mossoró que ficam a jusante da área de contribuição do bairro Alto Sumaré.

REFERÊNCIAS

- ABDELSALHEEN, M.; ELMOUSTAFA, A.; HASSAN, A. Evaluation of Depression Storage Using Grid-Based GIS Model. **International Journal of Science and Research**, v. 7, Issue 9, p. 285-289, 2018.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017.
- ANDRADE, S. L.; FERREIRA, V. O.; SILVA, M. M. Elaboração de um mapa de risco de inundações da bacia hidrográfica do córrego São Pedro, área urbana de Uberlândia-MG. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 24, n. 41, p.1–16, 2014.
- ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p.127–141, 1994.
- CAPRARIO, J. Desenvolvimento de um instrumento para o mapeamento de áreas suscetíveis a alagamentos e inundações urbanas. 2017. 223f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- CARVALHO, A. A. V. Da moradia à colcha de retalhos: O processo de construção de cidades à luz do Programa Minha Casa, Minha Vida. 2015. 199f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- BEZERRA, F. H. R.; SILVA, F. O.; SOUSA, M. O. L.; AMARAL, R. F.; FONSECA, V. P.; VIEIRA, M. M.; MOURA-LIMA, E. N. Mapeamento Geológico da Folha Macau (SB-24-X-D-II). Programa Geologia do Brasil - PGB. Recife, CPRM/UFRN: 2006. 1 mapa color. Escala. 1:100.000.
- DAI, L.; WÖRNER, R; RIJSWICK, H. F. M.W. Rainproof cities in the Netherlands: approaches in Dutch water governance to climate-adaptive urban planning. **International Journal of Water Resources Development**, 34:4, 652-674, <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1372273>.
- DANTAS, C. E. O. Previsão e controle de inundações em meio urbano com suporte de informações espaciais de alta resolução. 2012. 221f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Área de concentração em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- DA SILVA GALVÃO, M. I. Zoneamento de risco à inundação da área urbana de Porto Xavier/RS. 2014. 107f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- ECKHARDT, R. R. Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado/RS. 2008. 117f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados – Recursos Naturais e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- FELIZARDO, L. M. Aplicação de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma microbacia. 2016. 98f. Dissertação

(Mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

FRANCO, E. J. Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no método racional. 2004. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

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, p.19–28, 2010.

GRACIOSA, M. C. P. Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulações hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações. 2010. 191f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Área de concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico. 2010. Resultado do Universo do Censo Demográfico 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>. Acesso em: 20/07/2020.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. Atlas para a promoção do investimento sustentável no Rio Grande do Norte. módulo I: zona homogênea mossoroense. Natal: IDEMA, 2005. 205 p. 1 atlas.

LICCO, E. A.; DOWELL, S. F. Alagamentos, Enchentes Enxurradas e Inundações: Digressões sobre seus impactos sócio econômicos e governança. **Iniciação - Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística**. São Paulo, v. 5, n. 3, p.159–174, 2015.

LIMA, C. C. Identificação e avaliação de zonas de alagamentos urbanos na cidade de Natal, Nordeste do Brasil, com o suporte de geotecnologias. 2019. 136f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LIMA, F. G. F., et al. Avaliação de métodos de interpolação na geração de modelos digitais de elevação de precisão em zonas costeiras de alta dinâmica sedimentar. **Revista Brasileira de Cartografia** (2016), Rio de Janeiro, n. 68/3, p. 527–538, 2015

LYU, H-M.; WANG, G-F.; SHEN, J. S.; LU, L.; WANG, G-Q. Analysis and GIS Mapping of Flooding Hazards on 10 May 2016, Guangzhou, China. **Water**, 8, 447, <https://doi.org/10.3390/w8100447>.

MAGALHÃES, I. A. L., THIAGO, C. R. L.; AGRIZZI, D. V., SANTOS, A. R. Uso de Geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: Uma análise comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociências**, Salvador, v. 8, n. 2, p. 63-70, 2011.

MARINHO, R. R.; SILVA, E. C. M. Análise morfométrica de áreas afetadas por inundação urbana em Manaus (AM). **Revista Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 17, n. 59, p.162–176, 2016.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, S. R.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C.; MAGALHÃES FILHO, L. N. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**. Canoas, v. 6, n. 2, p.35–47, 2012.

MARQUES, C. E. B. Proposta de Método para a Formulação de Planos Diretores de Drenagem Urbana. 2006. 168f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

OLIVEIRA, G. G.; ECKHARDT, R. R.; HAETINGER, C.; ALVES, A. Caracterização espacial das áreas suscetíveis a inundações e enxurradas na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas. **Geociências**, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 849-863, 2018

OLIVEIRA, J. P. Uma análise da formação e expansão do urbano de Mossoró: dinâmica e contradições. **Revista Pensar Geografia**, Mossoró, v. I, n. 1, p. 50-71, 2017.

PAULINO, P. F. Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas. 2014. 128. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PETTA, R.; SINDERN, S.; CAMPOS, T. F. C.; NASCIMENTO, P. S. R. Integração e Análises Urbanas do Plano Diretor de Mossoró utilizando-se SIG e Sensoriamento Remoto. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIV., 2009, Natal. Anais Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 795-802.*

PONTREMOLEZ, N. S. Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP. 2013. 132f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PRINA, Z. B. Geotecnologias aplicadas no mapeamento das áreas de inundação do perímetro urbano do perímetro urbano de Jaguari/RS. 2015. 128f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

REIS, P. A. Identificação de áreas vulneráveis as enchentes e inundações em áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos. 2015. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

ROCHA, A. B. Proposta metodológica de gestão dos espaços-riscos de inundações urbana em Mossoró-RN. 2015. 172f. Tese (Doutorado em Geografia – Área de concentração em Natureza, Campo e Cidade) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SIDRA – SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA. Estimativas da População 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579#resultado>. Acesso em: 20/07/2020.

SILVA, A. A. Classificação orientada a objeto para mapeamento da cobertura vegetal da zona urbana de Mossoró/RN. 2015. 151f. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) - Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (org.). **Drenagem urbana**. Porto Alegre, ABRH, 1995

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre. Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998, 668p.

XAVIER DA SILVA, J. O que é Geoprocessamento? **Revista do CREA-RJ**, p. 42-44, 2009.

ZOPE, P. E. et al. Hydrological impacts of land use-land cover change and detention basins on urban flood hazard: a case study of Poisar River basin, Mumbai, India. **Natural Hazards**, 87, 1267-1283, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-017-2816-4>.

ANEXO A – DADOS GERAIS DAS MICRO-BACIAS DOS BAIXOS TOPOGRÁFICO, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 5 ANOS

TR = 5 anos

$$i = \frac{752,889 \cdot T^{0,221}}{(t + 9,778)^{0,741}}$$

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3}$$

Contribuição Depressão (m²)	Area da Depressão (m²)	HydroID	FillDepth	L (km)	H (m)	S (m/m) (declividade do canal)	t _c (h)	i (mm/h)	C _a	Q _a (m³/s)	C _d	Q _d (m³/s)	V _s	Vol. Depressões (m³)
112.713,50	22.900,25	511861	2,199	0,534	8,63	0,016	0,23	103,11	0,13	0,404	0,45	1,453	873,36	23.445,77
27.310,50	10.257,50	511866	1,067	0,282	24,47	0,087	0,10	141,05	0,13	0,134	0,20	0,212	26,71	4.230,36
58.405,25	3.877,25	514668	1,384	0,542	10,13	0,019	0,22	104,67	0,13	0,212	0,22	0,367	124,63	2.306,36
28.881,50	7.577,50	517479	1,314	0,180	3,49	0,019	0,11	133,79	0,13	0,134	0,13	0,134	-	5.552,95
10.036,75	2.402,75	518329	3,060	0,185	4,35	0,023	0,11	135,50	0,13	0,047	0,65	0,246	78,24	2.637,24
64.613,00	907,50	518466	1,191	1,022	19,41	0,019	0,33	88,00	0,13	0,197	0,21	0,330	155,03	421,49
18.781,00	1.340,75	519188	1,360	0,297	5,30	0,018	0,16	120,09	0,13	0,078	0,13	0,078	-	394,09
30.317,75	611,75	521545	1,276	0,343	6,46	0,019	0,17	116,96	0,13	0,123	0,13	0,130	4,18	399,23
3.544,25	2.794,50	521741	8,127	0,063	9,45	0,149	0,03	172,97	0,13	0,021	0,13	0,021	-	15.978,31
8.941,50	567,50	522842	1,109	0,208	4,53	0,022	0,12	131,80	0,13	0,041	0,13	0,041	-	267,12
6.718,75	2.852,00	523689	2,930	0,092	1,70	0,019	0,08	148,85	0,13	0,035	0,13	0,035	-	1.517,57
122.852,75	10.225,00	523792	1,232	0,462	8,63	0,019	0,20	108,95	0,13	0,465	0,14	0,524	42,96	5.026,59
8.368,50	1.064,50	523937	1,143	0,164	3,32	0,020	0,11	136,78	0,13	0,040	0,22	0,071	11,90	424,72
187.079,25	28.521,25	527748	10,232	0,980	15,42	0,016	0,34	86,64	0,13	0,563	0,16	0,732	203,79	49.843,88
19.877,00	3.877,75	527996	3,020	0,244	23,02	0,094	0,09	145,29	0,13	0,100	0,47	0,375	84,07	6.777,08
482,50	387,25	529269	1,156	0,013	1,18	0,094	0,01	186,29	0,13	0,003	0,13	0,003	-	286,44
78.322,25	2.677,50	529270	1,295	0,863	16,29	0,019	0,29	92,37	0,13	0,251	0,13	0,253	2,32	1.552,53
18.683,25	4.289,00	530741	2,018	0,295	29,03	0,098	0,09	141,45	0,13	0,092	0,14	0,100	2,89	4.610,17
4.451,75	2.942,50	530937	8,914	0,183	11,91	0,065	0,08	147,58	0,13	0,023	0,17	0,032	2,62	13.480,42
44.229,00	1.716,25	531005	1,310	0,482	10,40	0,022	0,20	109,74	0,13	0,169	0,13	0,169	0,53	1.065,95
214.565,50	3.613,25	531038	1,197	0,949	15,72	0,017	0,32	88,15	0,13	0,657	0,13	0,686	33,63	2.366,07
8.002,75	1.501,50	531270	1,238	0,200	4,38	0,022	0,12	132,79	0,13	0,037	0,13	0,037	-	930,39
185.057,00	12.780,75	531315	2,512	0,705	14,22	0,020	0,26	98,60	0,13	0,634	0,13	0,635	1,50	14.611,36
131.599,25	3.043,00	531356	2,457	0,804	14,95	0,019	0,28	94,01	0,13	0,430	0,13	0,432	2,00	3.373,99
21.324,25	4.495,50	531565	1,384	0,215	26,32	0,122	0,07	150,75	0,13	0,112	0,13	0,112	0,03	3.100,23
25.332,75	5.345,25	531585	2,848	0,346	6,12	0,018	0,17	115,97	0,13	0,102	0,13	0,102	-	7.958,26
38.598,75	1.643,75	531628	1,078	0,271	7,45	0,027	0,13	128,02	0,13	0,172	0,13	0,172	-	912,86
198.214,75	3.406,50	531637	1,126	0,691	12,24	0,018	0,26	97,44	0,13	0,671	0,13	0,677	5,81	1.346,35
50.571,50	9.049,50	531663	1,174	0,306	4,23	0,014	0,17	115,96	0,13	0,204	0,13	0,204	-	3.522,95
7.389,00	1.207,75	531685	1,205	0,275	4,94	0,018	0,15	122,23	0,13	0,031	0,13	0,031	-	699,24
12.580,00	4.461,50	531754	1,465	0,142	3,52	0,025	0,09	142,53	0,13	0,062	0,13	0,062	-	3.464,40

ANEXO B – DADOS GERAIS DAS MICRO-BACIAS DOS BAIXOS TOPOGRÁFICO, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 10 ANOS

TR = 10 anos

$$i = \frac{752,889 \cdot T^{0,221}}{(t + 9,778)^{0,741}}$$

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3}$$

Contribuição Depressão (m²)	Area da Depressão (m²)	HydroID	FillDepth	L (km)	H (m)	S (m/m) (declividade do canal)	tc (h)	i (mm/h)	C _a	Q _a (m³/s)	C _d	Q _d (m³/s)	V _s	Vol. Depressões (m³)
112.713,50	22.900,25	511861	2,199	0,533864	8,633	0,0162	0,23	120,18	0,13	0,470	0,45	1,694	1.017,94	23.445,77
27.310,50	10.257,50	511866	1,067	0,282087	24,474	0,0868	0,10	164,40	0,13	0,156	0,20	0,247	31,13	4.230,36
58.405,25	3.877,25	514668	1,384	0,541813	10,133	0,0187	0,22	122,00	0,13	0,247	0,22	0,428	145,26	2.306,36
28.881,50	7.577,50	517479	1,314	0,180474	3,485	0,0193	0,11	155,94	0,13	0,156	0,13	0,156	-	5.552,95
10.036,75	2.402,75	518329	3,060	0,185445	4,350	0,0235	0,11	157,93	0,13	0,055	0,65	0,286	91,19	2.637,24
64.613,00	907,50	518466	1,191	1,021891	19,412	0,0190	0,33	102,56	0,13	0,230	0,21	0,385	180,70	421,49
18.781,00	1.340,75	519188	1,360	0,297001	5,299	0,0178	0,16	139,97	0,13	0,091	0,13	0,091	-	394,09
30.317,75	611,75	521545	1,276	0,343350	6,460	0,0188	0,17	136,32	0,13	0,144	0,13	0,151	4,87	399,23
3.544,25	2.794,50	521741	8,127	0,063447	9,455	0,1490	0,03	201,61	0,13	0,025	0,13	0,025	-	15.978,31
8.941,50	567,50	522842	1,109	0,207811	4,529	0,0218	0,12	153,62	0,13	0,048	0,13	0,048	-	267,12
6.718,75	2.852,00	523689	2,930	0,091855	1,705	0,0186	0,08	173,49	0,13	0,040	0,13	0,040	-	1.517,57
122.852,75	10.225,00	523792	1,232	0,461870	8,629	0,0187	0,20	126,98	0,13	0,542	0,14	0,610	50,07	5.026,59
8.368,50	1.064,50	523937	1,143	0,163604	3,324	0,0203	0,11	159,43	0,13	0,046	0,22	0,083	13,86	424,72
187.079,25	28.521,25	527748	10,232	0,979716	15,416	0,0157	0,34	100,99	0,13	0,656	0,16	0,853	237,53	49.843,88
19.877,00	3.877,75	527996	3,020	0,243951	23,021	0,0944	0,09	169,34	0,13	0,117	0,47	0,437	97,99	6.777,08
482,50	387,25	529269	1,156	0,012571	1,176	0,0936	0,01	217,13	0,13	0,004	0,13	0,004	-	286,44
78.322,25	2.677,50	529270	1,295	0,862700	16,294	0,0189	0,29	107,66	0,13	0,293	0,13	0,295	2,70	1.552,53
18.683,25	4.289,00	530741	2,018	0,295223	29,029	0,0983	0,09	164,86	0,13	0,107	0,14	0,117	3,37	4.610,17
4.451,75	2.942,50	530937	8,914	0,182637	11,910	0,0652	0,08	172,01	0,13	0,027	0,17	0,037	3,06	13.480,42
44.229,00	1.716,25	531005	1,310	0,481916	10,398	0,0216	0,20	127,91	0,13	0,196	0,13	0,197	0,61	1.065,95
214.565,50	3.613,25	531038	1,197	0,948773	15,718	0,0166	0,32	102,74	0,13	0,765	0,13	0,799	39,19	2.366,07
8.002,75	1.501,50	531270	1,238	0,200175	4,383	0,0219	0,12	154,77	0,13	0,043	0,13	0,043	-	930,39
185.057,00	12.780,75	531315	2,512	0,705085	14,215	0,0202	0,26	114,93	0,13	0,738	0,13	0,740	1,74	14.611,36
131.599,25	3.043,00	531356	2,457	0,804459	14,951	0,0186	0,28	109,57	0,13	0,501	0,13	0,503	2,33	3.373,99
21.324,25	4.495,50	531565	1,384	0,215329	26,319	0,1222	0,07	175,70	0,13	0,130	0,13	0,130	0,03	3.100,23
25.332,75	5.345,25	531585	2,848	0,345842	6,124	0,0177	0,17	135,16	0,13	0,119	0,13	0,119	-	7.958,26
38.598,75	1.643,75	531628	1,078	0,271267	7,455	0,0275	0,13	149,21	0,13	0,200	0,13	0,200	-	912,86
198.214,75	3.406,50	531637	1,126	0,690628	12,242	0,0177	0,26	113,57	0,13	0,782	0,13	0,789	6,78	1.346,35
50.571,50	9.049,50	531663	1,174	0,305700	4,229	0,0138	0,17	135,16	0,13	0,237	0,13	0,237	-	3.522,95
7.389,00	1.207,75	531685	1,205	0,274658	4,935	0,0180	0,15	142,46	0,13	0,037	0,13	0,037	-	699,24
12.580,00	4.461,50	531754	1,465	0,141548	3,516	0,0248	0,09	166,12	0,13	0,073	0,13	0,073	-	3.464,40

ANEXO C – DADOS GERAIS DAS MICRO-BACIAS DOS BAIXOS TOPOGRÁFICO, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 25 ANOS

TR = 25 anos

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3}$$

$$i = \frac{752,889 \cdot T^{0,221}}{(t + 9,778)^{0,741}}$$

Contribuição Depressão (m²)	Area da Depressão (m²)	HydroID	FillDepth	L (km)	H (m)	S (m/m) (declividade do canal)	t _c (h)	i (mm/h)	C _a	Q _a (m³/s)	C _d	Q _d (m³/s)	V _s	Vol. Depressões (m³)
112.713,50	22.900,25	511861	2,199	0,533864	8,633	0,0161711	0,23	147,16	0,13	0,576	0,45	2,074	1.246,42	23.445,77
27.310,50	10.257,50	511866	1,067	0,282087	24,474	0,0867602	0,10	201,30	0,13	0,191	0,20	0,302	38,12	4.230,36
58.405,25	3.877,25	514668	1,384	0,541813	10,133	0,0187015	0,22	149,38	0,13	0,303	0,22	0,524	177,87	2.306,36
28.881,50	7.577,50	517479	1,314	0,180474	3,485	0,0193120	0,11	190,94	0,13	0,191	0,13	0,191	-	5.552,95
10.036,75	2.402,75	518329	3,060	0,185445	4,350	0,0234568	0,11	193,38	0,13	0,067	0,65	0,350	111,66	2.637,24
64.613,00	907,50	518466	1,191	1,021891	19,412	0,0189965	0,33	125,59	0,13	0,282	0,21	0,471	221,26	421,49
18.781,00	1.340,75	519188	1,360	0,297001	5,299	0,0178428	0,16	171,39	0,13	0,112	0,13	0,112	-	394,09
30.317,75	611,75	521545	1,276	0,343350	6,460	0,0188142	0,17	166,92	0,13	0,176	0,13	0,185	5,96	399,23
3.544,25	2.794,50	521741	8,127	0,063447	9,455	0,1490164	0,03	246,86	0,13	0,030	0,13	0,030	-	15.978,31
8.941,50	567,50	522842	1,109	0,207811	4,529	0,0217933	0,12	188,10	0,13	0,058	0,13	0,058	-	267,12
6.718,75	2.852,00	523689	2,930	0,091855	1,705	0,0185590	0,08	212,43	0,13	0,050	0,13	0,050	-	1.517,57
122.852,75	10.225,00	523792	1,232	0,461870	8,629	0,0186826	0,20	155,48	0,13	0,663	0,14	0,747	61,31	5.026,59
8.368,50	1.064,50	523937	1,143	0,163604	3,324	0,0203144	0,11	195,21	0,13	0,057	0,22	0,101	16,98	424,72
187.079,25	28.521,25	527748	10,232	0,979716	15,416	0,0157347	0,34	123,66	0,13	0,803	0,16	1,044	290,84	49.843,88
19.877,00	3.877,75	527996	3,020	0,243951	23,021	0,0943675	0,09	207,36	0,13	0,143	0,47	0,535	119,98	6.777,08
482,50	387,25	529269	1,156	0,012571	1,176	0,0935705	0,01	265,87	0,13	0,004	0,13	0,004	-	286,44
78.322,25	2.677,50	529270	1,295	0,862700	16,294	0,0188867	0,29	131,82	0,13	0,358	0,13	0,362	3,31	1.552,53
18.683,25	4.289,00	530741	2,018	0,295223	29,029	0,0983293	0,09	201,87	0,13	0,131	0,14	0,143	4,13	4.610,17
4.451,75	2.942,50	530937	8,914	0,182637	11,910	0,0652098	0,08	210,62	0,13	0,033	0,17	0,046	3,75	13.480,42
44.229,00	1.716,25	531005	1,310	0,481916	10,398	0,0215766	0,20	156,62	0,13	0,241	0,13	0,242	0,75	1.065,95
214.565,50	3.613,25	531038	1,197	0,948773	15,718	0,0165665	0,32	125,80	0,13	0,937	0,13	0,978	47,99	2.366,07
8.002,75	1.501,50	531270	1,238	0,200175	4,383	0,0218979	0,12	189,51	0,13	0,053	0,13	0,053	-	930,39
185.057,00	12.780,75	531315	2,512	0,705085	14,215	0,0201607	0,26	140,72	0,13	0,904	0,13	0,907	2,13	14.611,36
131.599,25	3.043,00	531356	2,457	0,804459	14,951	0,0185858	0,28	134,16	0,13	0,613	0,13	0,616	2,86	3.373,99
21.324,25	4.495,50	531565	1,384	0,215329	26,319	0,1222249	0,07	215,14	0,13	0,159	0,13	0,159	0,04	3.100,23
25.332,75	5.345,25	531585	2,848	0,345842	6,124	0,0177086	0,17	165,50	0,13	0,146	0,13	0,146	-	7.958,26
38.598,75	1.643,75	531628	1,078	0,271267	7,455	0,0274821	0,13	182,70	0,13	0,245	0,13	0,245	-	912,86
198.214,75	3.406,50	531637	1,126	0,690628	12,242	0,0177255	0,26	139,06	0,13	0,957	0,13	0,966	8,30	1.346,35
50.571,50	9.049,50	531663	1,174	0,305700	4,229	0,0138331	0,17	165,50	0,13	0,291	0,13	0,291	-	3.522,95
7.389,00	1.207,75	531685	1,205	0,274658	4,935	0,0179695	0,15	174,44	0,13	0,045	0,13	0,045	-	699,24
12.580,00	4.461,50	531754	1,465	0,141548	3,516	0,0248391	0,09	203,41	0,13	0,089	0,13	0,089	-	3.464,40

ANEXO D – DADOS GERAIS DAS SUB-BACIAS DAS LAGOAS, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 5 ANOS

TR = 5 anos

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3}$$

$$i = \frac{752,889 \cdot T^{0,221}}{(t + 9,778)^{0,741}}$$

Contribuição Depressão (m²)	HydroID	FillDepth	L (km)	H (m)	S (m/m) (declividade do canal)	t _c (h)	i (mm/h)	C _a	Q _a (m³/s)	C _d	Q _d (m³/s)	V _s	Vol. Depressões (m³)	
260.133,44	511861	2,199	1,021	8,409	0,0082	0,42	77,40	0,13	0,699	0,65	3,635	4.411,03	23.445,77	Viaduto BR-304
24.349,77	518329	1,384	1,785	4,397	0,0025	0,84	51,66	0,13	0,044	0,65	0,227	553,66	2.637,24	Lagoa R. Bosque dos Pássaros 1
8.919,86	522842	1,314	2,874	3,456	0,0012	1,38	37,43	0,13	0,012	0,13	0,012	-	-	
40.409,03	519188	3,060	0,645	7,379	0,0114	0,29	93,44	0,13	0,131	0,13	0,131	-	-	
585.153,08	514668	1,191	2,169	24,677	0,0114	0,60	63,48	0,13	1,290	0,65	6,707	11.609,81	2.306,36	Barragem extremo jusante
980.689,51	518466	1,276	2,642	21,606	0,0082	0,74	55,78	0,13	1,899	0,65	9,877	21.249,54	421,49	Bueiro final Monte Olimpo
4.452,27	530937	8,127	4,570	4,091	0,0009	2,00	29,23	0,13	0,005	0,65	0,023	136,41	13.480,42	Lagoa R. Cidade Alta
855.058,66	527996	1,109	5,064	40,438	0,0080	1,10	43,46	0,13	1,290	0,65	6,710	21.488,11	6.777,08	Lagoa Cidade Jardim 1
8.100,53	531270	2,930	3,903	3,146	0,0008	1,87	30,52	0,13	0,009	0,13	0,009	-	-	
18.853,08	530741	1,232	4,183	27,094	0,0065	1,05	44,94	0,13	0,029	0,65	0,153	465,09	4.610,17	Barragens área R. Campo Bello
788.194,80	521545	1,143	2,169	19,467	0,0090	0,64	60,87	0,13	1,666	0,65	8,663	16.107,93	-	
560.270,72	527748	10,232	4,553	22,204	0,0049	1,20	41,16	0,13	0,801	0,65	4,163	14.501,37	49.843,88	Lagoa montante bueiro BR-110
257.425,33	531038	1,295	4,922	14,767	0,0030	1,45	36,25	0,13	0,324	0,65	1,685	7.114,53	2.366,07	Barragens área R. Campo Bello
1.345.327,43	523792	2,018	4,880	25,702	0,0053	1,22	40,66	0,13	1,899	0,65	9,877	35.046,16	5.026,59	Lagoa natural próximo B. Pássaros 2
131.683,24	531356	8,914	4,867	12,494	0,0026	1,51	35,29	0,13	0,161	0,65	0,839	3.688,09	3.373,99	Barragens área R. Campo Bello
23.605,00	531685	1,310	0,548	7,136	0,0130	0,25	99,48	0,13	0,082	0,13	0,082	-	-	
337.788,66	531315	1,197	4,803	16,202	0,0034	1,38	37,47	0,13	0,439	0,65	2,285	9.180,50	14.611,36	Lagoa Natural de Montante
2.047.111,94	521741	1,238	4,061	29,294	0,0072	0,99	46,40	0,13	3,298	0,65	17,149	49.597,94	15.978,31	Lagoa R. Monte Olimpo
213.737,96	531637	2,512	4,947	11,116	0,0022	1,59	34,14	0,13	0,253	0,65	1,317	6.085,09	-	

ANEXO E – DADOS GERAIS DAS SUB-BACIAS DAS LAGOAS, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 10 ANOS

TR = 10 anos

$$i = 752,889 \cdot T^{0,221}$$

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3} \quad (t + 9,778)^{0,741}$$

Contribuição Depressão (m²)	HydroID	FillDepth	L (km)	H (m)	S (m/m) (declividade do canal)	t _c (h)	i (mm/h)	C _a	Q _a (m³/s)	C _d	Q _d (m³/s)	V _s	Vol. Depressões (m³)	Localização
260.133,44	511861	2,1990	1,021	8,409	0,0082	0,42	90,22	0,13	0,815	0,65	4,237	5.141,23	23.445,77	Viaduto BR-304
24.349,77	518329	1,3845	1,785	4,397	0,0025	0,84	60,21	0,13	0,051	0,65	0,265	645,32	2.637,24	Lagoa R. Bosque dos Pássaros 1
8.919,86	522842	1,3144	2,874	3,456	0,0012	1,38	43,63	0,13	0,014	0,13	0,014	-	-	
40.409,03	519188	3,0597	0,645	7,379	0,0114	0,29	108,91	0,13	0,153	0,13	0,153	-	-	
585.153,08	514668	1,1906	2,169	24,677	0,0114	0,60	73,99	0,13	1,503	0,65	7,817	13.531,71	2.306,36	Barragem extremo jusante
980.689,51	518466	1,2758	2,642	21,606	0,0082	0,74	65,01	0,13	2,214	0,65	11,511	24.767,21	421,49	Bueiro final Monte Olimpo
4.452,27	530937	8,1272	4,570	4,091	0,0009	2,00	34,07	0,13	0,005	0,65	0,027	159,00	13.480,42	Lagoa R. Cidade Alta
855.058,66	527996	1,1087	5,064	40,438	0,0080	1,10	50,66	0,13	1,504	0,65	7,821	25.045,27	6.777,08	Lagoa Cidade Jardim 1
8.100,53	531270	2,9297	3,903	3,146	0,0008	1,87	35,57	0,13	0,010	0,13	0,010	-	-	
18.853,08	530741	1,2325	4,183	27,094	0,0065	1,05	52,38	0,13	0,034	0,65	0,178	542,09	4.610,17	Barragens área R. Campo Bello
788.194,80	521545	1,1428	2,169	19,467	0,0090	0,64	70,95	0,13	1,942	0,65	10,097	18.774,46	-	
560.270,72	527748	10,2317	4,553	22,204	0,0049	1,20	47,97	0,13	0,933	0,65	4,853	16.901,94	49.843,88	Lagoa montante bueiro BR-110
257.425,33	531038	1,2955	4,922	14,767	0,0030	1,45	42,25	0,13	0,378	0,65	1,964	8.292,28	2.366,07	Barragens área R. Campo Bello
1.345.327,43	523792	2,0182	4,880	25,702	0,0053	1,22	47,39	0,13	2,214	0,65	11,512	40.847,74	5.026,59	Lagoa natural próximo B. Pássaros 2
131.683,24	531356	8,9145	4,867	12,494	0,0026	1,51	41,14	0,13	0,188	0,65	0,978	4.298,62	3.373,99	Barragens área R. Campo Bello
23.605,00	531685	1,3098	0,548	7,136	0,0130	0,25	115,95	0,13	0,095	0,13	0,095	-	-	
337.788,66	531315	1,1968	4,803	16,202	0,0034	1,38	43,67	0,13	0,512	0,65	2,664	10.700,25	14.611,36	Lagoa Natural de Montante
2.047.111,94	521741	1,2379	4,061	29,294	0,0072	0,99	54,08	0,13	3,844	0,65	19,988	57.808,44	15.978,31	Lagoa R. Monte Olimpo
213.737,96	531637	2,5124	4,947	11,116	0,0022	1,59	39,79	0,13	0,295	0,65	1,535	7.092,42	-	

ANEXO F – DADOS GERAIS DAS SUB-BACIAS DAS LAGOAS, VOLUME DE ACUMULAÇÃO PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA, TR = 25 ANOS

TR = 25 anos

$$i = 752,889 \cdot T^{0,221}$$

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3} \quad (t + 9,778)^{0,741}$$

Contribuição Depressão (m²)	HydroID	FillDepth	L (km)	H (m)	S (m/m) (declividade do canal)	t _c (h)	i (mm/h)	C _a	Q _a (m³/s)	C _d	Q _d (m³/s)	V _s	Vol. Depressões (m³)	
260.133,44	511861	2,199	1,021	8,409	0,0082	0,42	110,47	0,13	0,998	0,65	5,188	6.295,23	23.445,77	Viaduto BR-304
24.349,77	518329	1,384	1,785	4,397	0,0025	0,84	73,73	0,13	0,062	0,65	0,324	790,17	2.637,24	Lagoa R. Bosque dos Pássaros 1
8.919,86	522842	1,314	2,874	3,456	0,0012	1,38	53,43	0,13	0,017	0,13	0,017	-	-	
40.409,03	519188	3,060	0,645	7,379	0,0114	0,29	133,35	0,13	0,187	0,13	0,187	-	-	
585.153,08	514668	1,191	2,169	24,677	0,0114	0,60	90,59	0,13	1,841	0,65	9,571	16.569,04	2.306,36	Barragem extremo jusante
980.689,51	518466	1,276	2,642	21,606	0,0082	0,74	79,60	0,13	2,711	0,65	14,095	30.326,47	421,49	Bueiro final Monte Olimpo
4.452,27	530937	8,127	4,570	4,091	0,0009	2,00	41,72	0,13	0,006	0,65	0,034	194,68	13.480,42	Lagoa R. Cidade Alta
855.058,66	527996	1,109	5,064	40,438	0,0080	1,10	62,03	0,13	1,842	0,65	9,576	30.666,95	6.777,08	Lagoa Cidade Jardim 1
8.100,53	531270	2,930	3,903	3,146	0,0008	1,87	43,56	0,13	0,012	0,13	0,012	-	-	
18.853,08	530741	1,232	4,183	27,094	0,0065	1,05	64,14	0,13	0,042	0,65	0,218	663,76	4.610,17	Barragens área R. Campo Bello
788.194,80	521545	1,143	2,169	19,467	0,0090	0,64	86,87	0,13	2,378	0,65	12,363	22.988,58	-	
560.270,72	527748	10,232	4,553	22,204	0,0049	1,20	58,74	0,13	1,143	0,65	5,942	20.695,76	49.843,88	Lagoa montante bueiro BR-110
257.425,33	531038	1,295	4,922	14,767	0,0030	1,45	51,73	0,13	0,462	0,65	2,405	10.153,57	2.366,07	Barragens área R. Campo Bello
1.345.327,43	523792	2,018	4,880	25,702	0,0053	1,22	58,03	0,13	2,711	0,65	14,096	50.016,44	5.026,59	Lagoa natural próximo B. Pássaros 2
131.683,24	531356	8,914	4,867	12,494	0,0026	1,51	50,37	0,13	0,230	0,65	1,198	5.263,49	3.373,99	Barragens área R. Campo Bello
23.605,00	531685	1,310	0,548	7,136	0,0130	0,25	141,98	0,13	0,116	0,13	0,116	-	-	
337.788,66	531315	1,197	4,803	16,202	0,0034	1,38	53,48	0,13	0,627	0,65	3,262	13.102,04	14.611,36	Lagoa Natural de Montante
2.047.111,94	521741	1,238	4,061	29,294	0,0072	0,99	66,22	0,13	4,707	0,65	24,475	70.784,15	15.978,31	Lagoa R. Monte Olimpo
213.737,96	531637	2,512	4,947	11,116	0,0022	1,59	48,72	0,13	0,362	0,65	1,880	8.684,39	-	