



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 8, nº 2 (2022)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n2ID23022>



Alagamentos em cenários de expansão urbana acelerada: estudo de caso no bairro Alto Sumaré, Mossoró/RN

Flooding in accelerated urban expansion scenarios: case study bairro Alto Sumaré, Mossoró/RN

Tenório José de Brito¹; Venerando Eustáquio Amaro²; Maria de Fátima Alves de Matos³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: tenoriobrito@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6967-9926>

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: venerandoamaro@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7357-2200>

³ Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis, SENAI-DR-RN, Natal/RN, Brasil. Email: mfatimalves.m@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2864-2027>

Resumo: Na última década, o Município de Mossoró/RN tem vivenciado um avanço acelerado no processo de ocupação urbana, fomentado em grande parte pelo Programa Minha Casa Minha Vida do Governo Federal. Foram relatados problemas de alagamentos no bairro Alto Sumaré, tratado como área de estudo. Com objetivo de simular ocorrências futuras de alagamentos baseados na taxa de urbanização, ocorrências passadas e eventos extremos de precipitações, foi empregado o uso de Geotecnologias na análise da expansão urbana no período de 2010 a 2019 e mapeamento das áreas suscetíveis a alagamento do bairro Alto Sumaré, associado aos parâmetros do sistema de drenagem e integrados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas. Os resultados apontam um percentual de expansão de 180,75% entre 2010 e 2017 e de 112,75% entre 2017 e 2019. Essa expansão, associada a instalação de um inadequado sistema de drenagem, tem promovido 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 apresentaram valores maiores que o volumes das depressões. Os volumes de acumulação aumentam a medida em que há um aumento do tempo de recorrência, demonstrando assim que a capacidade de amortecimento da maioria das lagoas é insuficiente.

Palavras-chave: Expansão urbana; Sensoriamento remoto; Nordeste do Brasil.

Abstract: In the last decade, the Municipality of Mossoró/RN has experienced an accelerated advance in the process of urban occupation, largely promoted by the Federal Government's 'My Home My Life Program', flooding problems were reported in the Alto Sumaré neighborhood, a study area. In order to map and analyze the stretches susceptible to flooding in the period 2010 to 2019, the use of Geotechnologies was used to analyze urban expansion, mapping of areas susceptible to flooding of the urban expansion of the *Alto Sumaré* neighborhood. The results show an expansion percentage of 180.75% between 2010 and 2017 and 112.75% between 2017 and 2019. This expansion, associated with the installation of an inadequate drainage system, has promoted rapid drainage when lake volumes are reached, which increases the contribution area and, therefore, the flow downstream, causing flooding. Accumulation volumes for recurrence times of 5 showed values greater than the volume of depression. The accumulation volumes increase as the recurrence time increases, thus demonstrating that the damping capacity of most lagoons is insufficient.

Keywords: Urban expansion; Remote sensing; Northeast of Brazil.

Recebido: 14/10/2020; Aceito: 02/08/2022; Publicado: 09/09/2022.

1. Introdução

Estudos recentes indicam que o percentual de população mundial exposta ao risco de desastres relacionados a eventos de enchentes, inundações e alagamentos aumentou em 25% desde o ano 2000 (TELLMAN *et al.* 2021). Igualmente, os danos causados por esse eventos mais que dobraram no decorrer dos últimos 50 anos (MUNICH RE, 2005). A distinção entre esse fenômenos é a seguinte: o acúmulo transitório da vazão no canal principal até a cota limite do corpo d'água é definido como enchente; o evento natural deflagrado pela combinação de chuvas fortes e rápidas ou chuvas de longa duração que provocam o transbordamento dos canais para a planície fluvial é definido como inundação; e, o acúmulo de água nas margens e baixos topográficos é definido como alagamento. Tais fatos tem sido recorrentes no espaço urbano e rural em todo o mundo e são desafiadores aos gestores do planejamento urbano, sobretudo por se tratarem de temas interconectados entre os aspectos do meio físico e as questões inerentes à dinâmica da urbanização, que exerce crescente pressão por terrenos para expansão urbana (KURZBACH *et al.*, 2013).

A população urbana deverá aumentar dos atuais 4,4 bilhões para 6,7 bilhões em 2050 (ALVES, 2021). Este incremento seguramente acarretará em alterações na dinâmica da urbanização dos territórios e, conseqüentemente, em mudanças no padrão de uso e ocupação do solo que impactarão o comportamento hidrológico e hidráulico (MERZ *et al.*, 2010). Estes resultados dos efeitos da urbanização acelerada serão potencialmente agravados quando aliados às avaliações dos impactos das mudanças climáticas globais e suas decorrências em escala local (AKTER *et al.* 2018).

A exposição aos desastres, à medida que mais pessoas sejam expostas às enchentes, inundações e alagamentos, passou a ser um dos principais desafios ao gerenciamento de riscos urbanos (JHA *et al.*, 2011). Isto ocorre, sobretudo, em cidades com dinâmica desordenadas de urbanização e/ou com planejamento urbano desarticulado das condicionantes locais combinada às mudanças climáticas globais, como no caso da intensificação nos eventos extremos de precipitação (MARENGO *et al.*, 2013). As enchentes, inundações e alagamentos já são os maiores desastres na Europa em termos econômicos, nas dimensões de danos às propriedades, infraestruturas, lesões físicas e perdas de vidas humanas, podendo atingir diretamente mais de meio milhão de pessoas e 40 bilhões de euros em prejuízos por ano até 2050 (STERN, 2007; EU-SCIENCE-HUB, 2020).

No Brasil, o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED/UFSC, 2013) mostrou que entre 1991 e 2012 ocorreram 31.909 catástrofes, sendo 73% apenas na última década, grande parte deles relativos a enchentes, inundações e alagamentos. Assim, diante das características peculiares que o meio urbano reúne, como a grande concentração populacional e os recursos em patrimônio material, tais eventos de enchentes, inundações e alagamentos nas áreas urbanas frequentemente ganham maior destaque diante da dimensão dos prejuízos que causam (FELIZARDO, 2016). Seja de ordem material como de saúde pública, tais prejuízos são muitas vezes irreparáveis, como no caso da perda de vidas humanas.

As áreas urbanas estão em maior risco de inundações devido ao aumento do volume de escoamento da chuva e devido à maior exposição de pessoas e bens, devido à concentração de recursos (SATO, 2006). A complexidade do ambiente urbano e de sua infraestrutura de drenagem instalada têm influência essencial no fluxo de escoamento superficial (FELIZARDO, 2016). A maioria das cidades brasileiras carece de estudos dedicados a subsidiar medidas de prevenção e/ou mitigação de problemas relacionados à drenagem pluvial (ANDRADE *et al.*, 2014), uma vez que o sistema de drenagem urbana foi construído no decorrer dos anos de forma descontinuada e sob o aspecto de escoamento rápido das águas pluviais (TUCCI, 1995). Por essa razão, o planejamento urbano pautado em projetos adequados deve ser estruturado de modo a mitigar os efeitos nocivos, dado que historicamente os registros de enchentes, inundações e alagamentos no meio urbano demonstram a ineficiência da realidade do sistema de drenagem existente. Portanto, é importante identificar os indicadores de risco que afetam o processo e a variabilidade das inundações urbanas (BANSAL *et al.*, 2015).

O gerenciamento de inundações é uma das etapas principais na mitigação e redução dos riscos de desastres. Estudos têm sugerido que a identificação de zonas de risco de inundações, alagamentos e enchentes, além da aplicação de medidas essenciais de redução de risco, por meios estruturais e/ou não estruturais, podem efetivamente reduzir os prejuízos a um nível aceitável, além de favorecer a compreensão do perigo das inundações em escala local, para melhor mitigação e adequada gestão urbana (NAULIN *et al.*, 2013; GUO *et al.*, 2014; DANDAPAT; PANDA, 2017; DAS, 2018; DOU *et al.*, 2018). A análise dos perigos e mapeamento dos riscos de inundações desempenham papel significativo no planejamento de inundações, alagamentos e enchentes, orientando sistemas de alerta precoce, serviços de resposta às emergências e projetos de medidas de redução do risco de inundação (GUO *et al.*, 2014; ZHANG; CHEN, 2019).

Até o momento, vários estudos foram realizados para avaliar e mapear áreas propensas a inundações em diferentes regiões do mundo (KIA *et al.*, 2012; TEHRANY *et al.*, 2013; HONG *et al.*, 2018; LIMA *et al.*, 2019). A obtenção de dados adequados para o mapeamento de enchentes, inundações e alagamentos usando métodos e técnicas convencionais são financeiramente onerosos, demorados e, por vezes, não estão disponíveis no nível regional ou local de bacias hidrográficas, especialmente no

Brasil. Por esse motivo, atualmente, o sensoriamento remoto e o Sistema de Informações Geográficas (SIG) oferecem ferramentas poderosas e além de serem fontes de dados adequados ao gerenciamento de perigos, suscetibilidade a enchentes, inundações e alagamentos, além de subsidiarem a elaboração de cenários previsionais (ARAÚJO *et al.*, 2018; LIMA *et al.*, 2019). A combinação dessas ferramentas permite a simulação mais realística das características das bacias hidrográficas localmente, através da elaboração de Modelo Digital de Elevação (MDE) e Modelos Digitais de Superfície (MDS) que retratam de modo confiável o comportamento do escoamento superficial (LIMA *et al.*, 2019).

Logo, este artigo tem o intuito de analisar a suscetibilidade de setores residenciais urbanos, recém implantados, aos rápidos eventos de alagamentos, tendo como estudo de caso o bairro Alto Sumaré na zona sul da cidade de Mossoró, Estado do Rio Grande do Norte (RN). A partir do ano de 2010, incentivado pela política habitacional do Governo Federal conhecido como Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), iniciou-se uma acelerada expansão urbana em Mossoró, onde se destaca o bairro Alto Sumaré. A partir do surgimento do primerio conjunto residencial Bella Residence, com 144 casas, novos empreendimentos imobiliários foram sendo criados, como o Cidade Jardim 1 com 568 casas, o Residencial Monte Olimpo com 335 casas, o Cidade Jardim 2 com 285 casas, promovendo a partir desse período a rápida impermeabilização do solo em grandes áreas e a alteração das condições de drenagem da microbacia do rio Apodi-Mossoró. O processo de expansão urbana, por meio da implantação desses conjuntos residenciais planejados, trouxe consigo aspectos negativos, como os frequentes alagamentos em algumas áreas do bairro recém construídas (Figura 1). Este fato ocorreu mesmo diante das regulações constantes no Plano Diretor do Município de Mossoró. Portanto, tais eventos são indicativos de que alguns aspectos do meio físico, como os aspectos geomorfológico e geológico/pedológico, podem não terem sido considerados a contento no planejamento do sistema de drenagem e na definição do fluxo superficial que subsidiaria a construção dos empreendimentos.



Figura 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; C) Alagamento de rua do bairro Alto Sumaré em 09/04/2018.

Fonte: autores (2020).

Assim, este artigo analisou as alterações promovidas no meio físico urbano com base no uso de Geotecnologias, como o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e imagens de sensoriamento remoto, correlacionados aos parâmetros do sistema de drenagem e integrados em ambiente SIG. Deste modo, pretende avaliar eventos de alagamentos ocorridos como base para

a simulação de eventos futuros, diante da taxa urbanização urbano conhecida para o bairro na última década, considerando cenários de eventos extremos de precipitação.

1.1. Caracterização da Área de Estudo

O bairro Alto Sumaré está localizado na periferia sul da cidade de Mossoró/RN, na mesorregião Oeste Potiguar (Figura 2). No mosaico urbano, o bairro Alto Sumaré foi avaliado como área potencial de expansão urbana (PETTA *et al.*, 2009) em área de 1.196,33 hectares destinadas a loteamentos (SILVA, 2015). Está inserido entre as coordenadas planas 682.000/687.000mE e 9.422.500/9.419.000mN da projeção Universal Transversa Mercator (UTM) Zona 24 Sul.

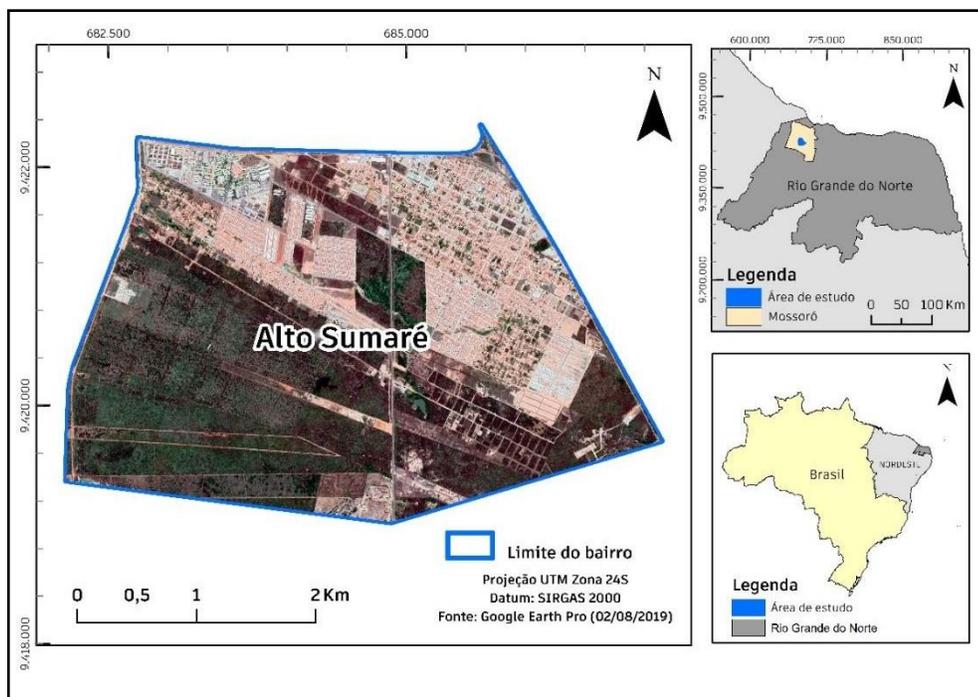


Figura 2 – Localização da área de estudo no Município de Mossoró/RN, bairro Alto Sumaré, zona sul do perímetro urbano.

Fonte: autores (2020).

O Município de Mossoró apresenta clima semiárido quente do tipo BSw'h na classificação de Köppen, em que a precipitação 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 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 (ROCHA, 2015).

No contexto geológico o Município de Mossoró está localizado 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; FEIJÓ, 1994). Nesta 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 (CPRM, 2014). Especificamente na área de estudo, os principais litotipos aflorantes são da Formação Jandaíra (98%) compondo relevos planos nas margens e leitos de drenagens, sobrepostos pelos depósitos de conglomerados e arenitos do Grupo Barreiras, por vezes com matriz argilosa e concreções ferruginosas, e ainda recobertos 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. O terreno é dissecado e modelado pela planície do rio Apodi-Mossoró, que se desenvolve como planície flúvio-marinha na desembocadura já na Planície Litorânea. O relevo é plano a levemente ondulado, com declividades baixas da ordem de 0,06° no sentido norte, em direção à Planície Litorânea. As maiores altitudes

são da ordem de 250m e na Serra de Mossoró. 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 (CPRM, 2014). Nesse recorte geográfico está submetido à intensa antropização, com elevados índices de uso e ocupação solo, normalmente desordenados, 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 (IDEMA, 2005).

2. Metodologia

Os procedimentos metodológicos, conduziu à elaboração de mapas indicativos de trechos suscetíveis a alagamentos no bairro Alto Sumaré, foram adaptados das propostas de Abdelsalheen *et al.* (2016) e Lima *et al.* (2019). As etapas e atividades foram descritas a seguir.

2.1. Compilação de dados espaciais pretéritos e levantamento topográfico

A primeira etapa consistiu nos levantamentos bibliográfico e cartográfico prévios da área de estudo, obtidos a partir de sítios de instituições públicas e de pesquisa. As curvas de nível foram adquiridas a partir da parceria com o Centro de Engenharias da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) e as empresas ENGEFOTO que realizou o levantamento aerofotogramétrico, contratada pela PETROBRAS, para a implantação da faixa de servidão de passagem e áreas para instalações complementares do Gasoduto Pilar/AL a Mossoró/RN. Igualmente foi realizado o cadastramento de imóveis, levantamento de pontos notáveis, entre outros. O aerolevanteamento foi realizado no ano de 2016 durante o período chuvoso e as curvas de nível foram geradas no Sistema de Coordenadas Geométricas, *datum* SIRGAS2000.

Os pontos de controle no terreno (GCP, do inglês *Ground Control Points*), resultado de trabalho de campo, foram obtidos seguindo a metodologia sugerida por Araújo *et al.* (2018). Previamente foram definidos 23 pontos no aplicativo *Google Earth Pro* e a localização de cada GCP foi selecionada de forma a alcançar a melhor distribuição do posicionamento planialtimétrico na área de estudo. Durante o levantamento identificou-se a necessidade de densificação dos GCP, além de que houve dificuldades de acesso a alguns dos locais previamente selecionados (Figura 3).

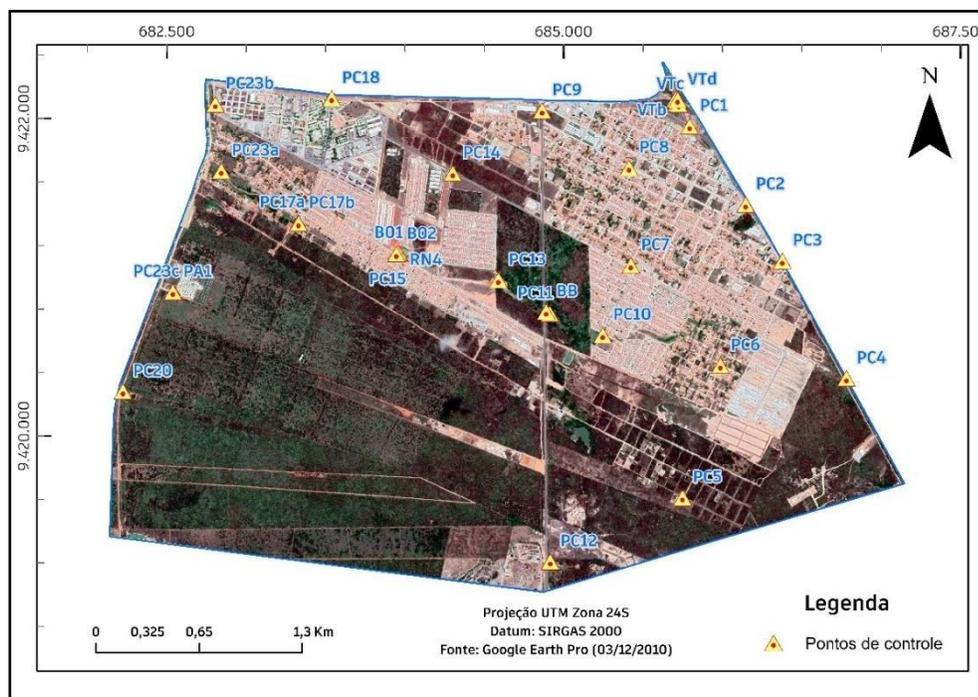


Figura 3 – Malha de distribuição dos pontos de controle no terreno (GCP) na área de estudo. Fonte: autores (2020).

A aquisição foi feita através do modo de posicionamento *Real Time Kinematics* (RTK), com uso de receptor de dupla frequência L1/L2, modelo Kronos 200, de 220 canais e rádio externo. Inicialmente foram transportados vetores do ponto da Estação Geodésica do Sistema Geodésico Brasileiro GPS-92426, de coordenadas 9.423.475,572mN-686.363,974mE e altitude geométrica 24,757m, ao ponto base 001, localizado sobre viaduto na rodovia BR-304, dentro do perímetro área de estudo. A coleta dos totais de 30 GCP ocorreu no dia 24/07/2019 (Figura 4).



Figura 4 – Coleta dos GCP. A) PC-01, BR-340, Mossoró; B) PC-18, Avenida Wilson Rosado.
Fonte: autores (2020).

2.2. Dados pluviométricos

Para avaliação dos efeitos das vazões de pico nos eventos de precipitações e geração de hidrogramas, foi utilizada a curva Intensidade – Duração – Frequência (IDF) 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 Equação (1) para a intensidade de chuva:

$$I_m = \frac{752,889 \cdot T^{0,221}}{(t+9,778)^{0,741}} \quad (\text{Equação 1})$$

2.3. Geoprocessamento dos dados e elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE)

Nesta etapa de geoprocessamento foi gerado o MDE, com base na segmentação das curvas de nível do levantamento topográfico (Figura 5), utilizando o interpolador *Topo to Raster* (LIMA *et al.*, 2016). O MDE destacou as feições de baixos topográficos, como a Lagoa do Residencial Bella Residence, uma lagoa natural existente no bairro, além de poucas elevações e o viaduto na BR-304 (Figura 6).

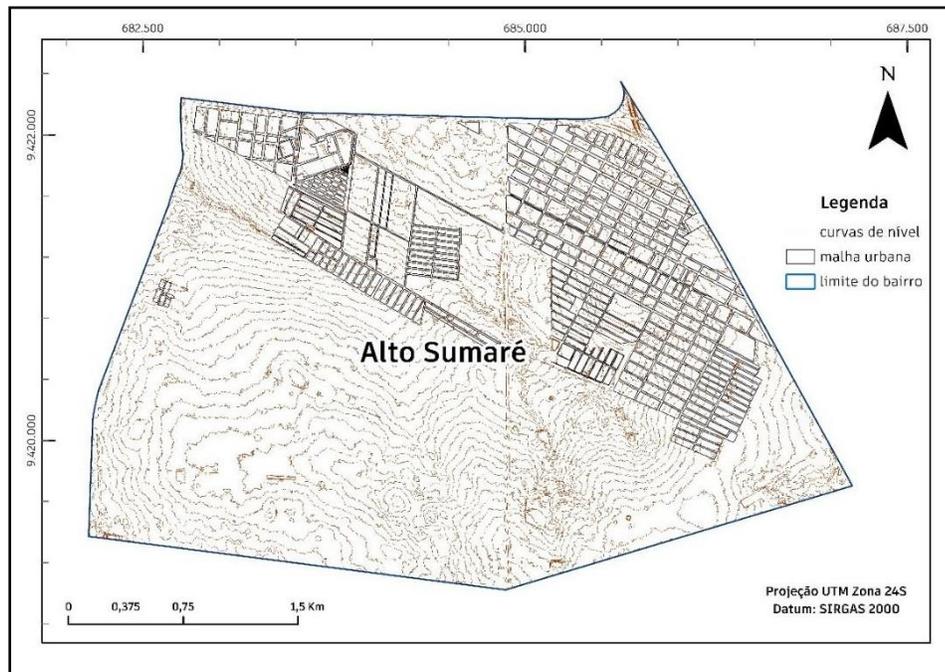


Figura 5 – Segmentação das curvas de nível para geração do MDE e área ocupada 2019 do bairro Alto Sumaré, Mossoró/RN.
Fonte: autores (2020).

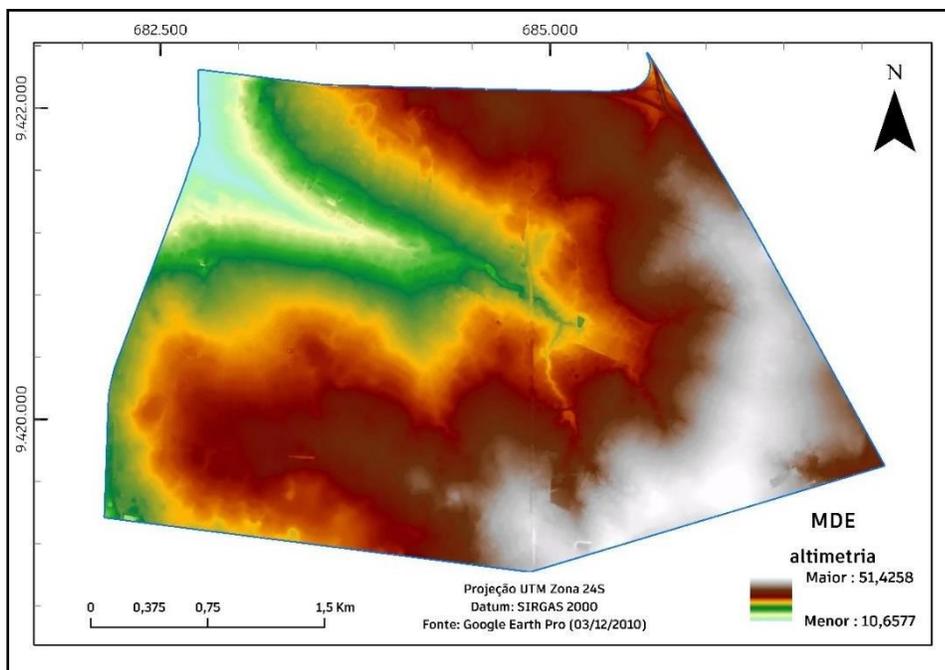


Figura 6 – Modelo Digital de Elevação do bairro Alto Sumaré, Mossoró/RN com medida altimétrica em metros.
Fonte: autores (2020).

O MDE, quando comparado as cenas do *Google Earth Pro*, permitiu constatar que após o aerolevantamento de 2016 foram implementadas transformações na microbacia hidrográfica, com a construção de quatro lagoas de captação, sendo duas no Residencial Cidade Alta, uma no Residencial Campo Belo e uma no Residencial Monte Olimpo. Assim, foi necessário atualização do MDE com inclusão dessas infraestruturas (lagoas) que influenciam diretamente na dinâmica do escoamento e acúmulo na microbacia hidrográfica. Dessa forma, foram criados polígonos concêntricos nas áreas das lagoas (Figura 7), espaçados adequadamente para que, ao gerar o modelo *raster* das lagoas, esses apresentassem inclinação adequada do talude das lagoas, permitindo o fluxo. 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. Das quatro lagoas (Lagoa Residencial Cidade Alta, Lagoa Residencial Cidade Jardim 1, Lagoa Residencial Campo Bello e Lagoa Residencial Monte Olimpo), somente a Lagoa do Residencial Cidade Alta não foi adicionada ao MDE da área de estudo, pois não faz parte da microbacia hidrográfica.

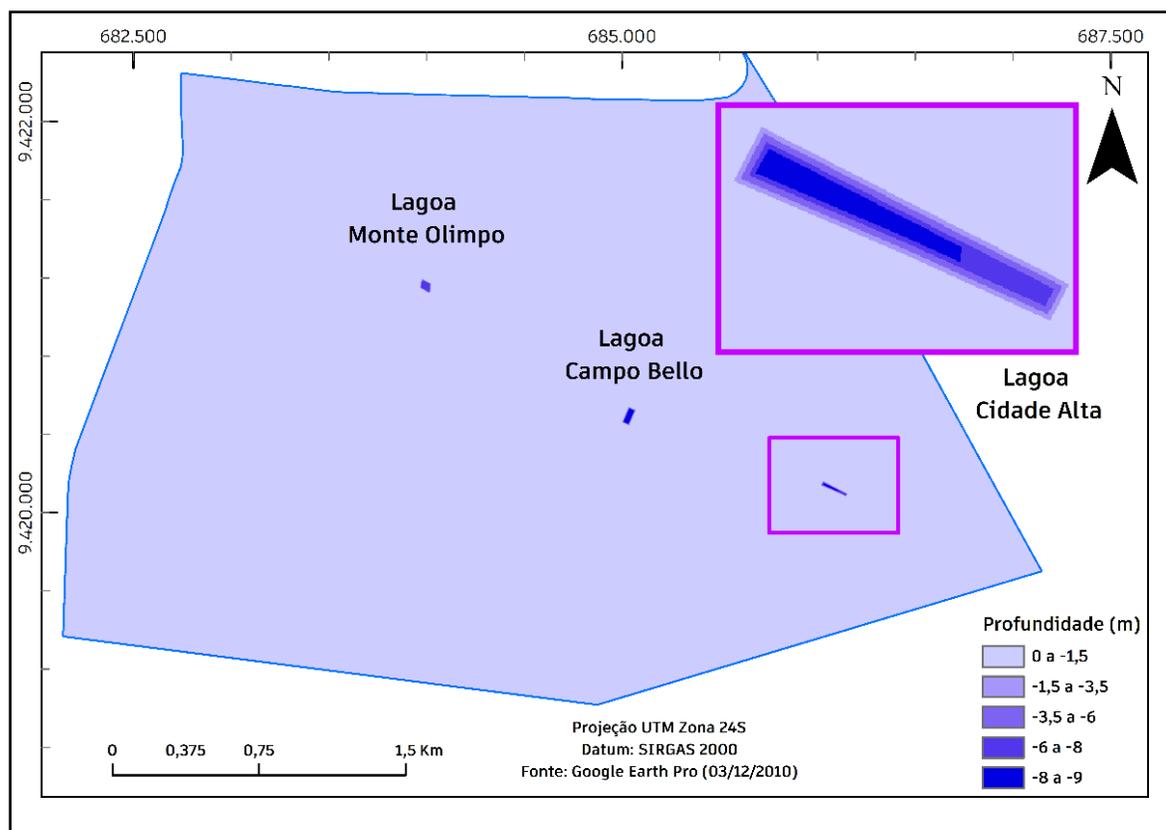


Figura 7 – Modelo Digital de Elevação das lagoas dos Residenciais Monte Olimpo, Campo Bello e Cidade Alta no bairro Alto Sumaré, Mossoró/RN.

Fonte: autores (2020).

Para correção dos 30 GCP foram obtidos os valores da ondulação geoidal (N) do modelo MAPGEO2015 (IBGE, 2015) onde foram aplicadas as correções de efeitos sistemáticos, a partir dos quais admitiu-se a altura ortométrica (H) de cada GCP (Tabela 1), através do cálculo aritmético: $H = h - N$; onde: h = altitude geométrica; H = altitude ortométrica; N = ondulação geoidal.

Tabela 1 – Coordenadas e precisão dos pontos de controle (GCP).

Nome	Coordenadas N (m)	Coordenadas 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

Onde: h = altitude elipsoidal, N = ondulação geoidal e H = altitude ortométrica.

Fonte: autores (2020).

2.4. Calibração do MDE e Elaboração do Modelo Digital de Superfície – MDS

A calibração do MDE foi procedida de acordo com a metodologia sugerida por Araújo *et al.* (2018). Nove GCP foram descartados: PC3 e PC4 por encontrarem-se fora da área de estudo; Vb, Vc e Vd devido a proximidade entre si, que poderiam gerar uma tendência durante a calibração; B1 e B2, coletados na soleira de caixas de boca de lobo, por não representarem a superfície real do terreno e que, também, poderiam provocar uma tendência de erro; RN4, usado na mudança da antena GNSS, devido a proximidade com o PC15; PA1, usado como ponto de apoio do PC23, que apresentou maior desvio padrão de altitude geométrica comparado ao PC23. Em seguida, os GCP foram projetados no *raster* do MDE e através do comando *Extract Values to Points* no ArcGIS, obteve-se as altitudes de cada GCP. Com as altitudes ortométricas de cada GCP e correspondentes no MDE, procedeu-se à análise estatística (Tabela 2), 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 GCP e 20 GCP, demonstrou que eliminando o PC17, obtêm-se uma melhora na acurácia com redução de valor do RMSE.

Tabela 2 – Parâmetros usados na regressão linear, $H(GCP) - f(x)$, $H(MDE) - x$ e variações entre as altimetrias (ΔI).

Nome	H (GCP)	H (MDE)	ΔI	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

Fonte: autores (2020).

Na melhoria do desempenho da análise do escoamento superficial das águas pluviais, conforme descrito por Lima *et al.* (2019), que ressalta os fatores antrópicos no ambiente urbano, foram usados os valores aplicados por Lee *et al.* (2016) que atribuiu valor altimétrico de 0,20m para calçadas e 20m para lotes urbanos. Igualmente se adotou valores de 0,20m para as quadras de lotes e 20m para edificações. Aplicou-se os valores somente às edificações pois verifica-se que no fluxo superficial as águas pluviais podem seguir através dos lotes. Esses vetores permitiram a geração do *raster*, através do comando *Feature to raster*, que adicionado ao MDE calibrado origina o MDS simplificado.

2.5. Modelagem hidrológica superficial

Abdelsalheen *et al.* (2016) mostrou que a forma tradicional de delimitação das bacias hidrográficas é feita pelo uso das ferramentas do *Arc Hydro* do *software* ArcGIS, 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 hidrológicamente corrigido. Assim, reconhecer as áreas de acúmulo 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 *et al.* (2019), eliminou-se baixos topográficos cujos valores de profundidade eram menores que 1m, valor definido em função da precisão dos dados usados na geração do MDE. O processamento gerou 31 áreas de baixos topográficos e suas respectivas microbacias de contribuição.

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 do *Flow Direction*. O *raster* com a direção de fluxo de saída de cada célula foi em seguida usado como *raster* de entrada para o *Flow Accumulation*, para geração da acumulação de fluxo.

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

A etapa seguinte consistiu na vetorização das linhas de fluxo através do *Stream to feature* do conjunto *Hydrology* associado ao *Spatial Analyst*, cujos *raster* de entrada foram o *raster* produzido pelo *Flow Direction* e *Stream Segmentation*. A identificação do percurso mais extenso dentro das microbacias dos baixos topográficos foi feita através do *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 opção *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 cálculo do coeficiente de deflúvio de cada micro bacia foi usada a ferramenta *Intersect*, tendo como camadas de entrada as áreas de contribuição de cada microbacia e a camada com a área urbanizada da área de estudo.

Após as identificações das características de cada microbacia de contribuição dos baixos topográficos procedeu-se a análise do escoamento, conforme método proposto por Abdelsalheen *et al.* (2016), com as características de cada microbacia dos baixos topográficos para os tempos de recorrência, TR = 5, 10 e 25 anos (Tabelas 3).

Tabela 3 – Características da área de contribuição, área do baixo topográfico, volume do baixo topográfico e volume acumulado para chuvas com tempo de recorrência, TR = 5, 10 e 25 anos.

Contribuição Depressão (m ²)	Area da Depressão (m ²)	Vol. Depressões (m ³)	TR = 5 anos		TR = 10 anos		TR = 25 anos	
			Vs	Altura alagamento	Vs	Altura alagamento	Vs	Altura alagamento
112.713,50	22.900,25	23.445,77	873,36	0,04	1.017,94	0,04	1.246,42	0,05
7.310,50	10.257,50	4.230,36	26,71	0,00	31,13	0,00	38,12	0,00
58.405,25	3.877,25	2.306,36	124,63	0,03	145,26	0,04	177,87	0,05
28.881,50	7.577,50	5.552,95	-	0,00	-	0,00	-	0,00
10.036,75	2.402,75	2.637,24	78,24	0,03	91,19	0,04	111,66	0,05
64.613,00	907,50	421,49	155,03	0,17	180,70	0,20	221,26	0,24
18.781,00	1.340,75	394,09	-	0,00	-	0,00	-	0,00
30.317,75	611,75	399,23	4,18	0,01	4,87	0,01	5,96	0,01
3.544,25	2.794,50	15.978,31	-	0,00	-	0,00	-	0,00
8.941,50	567,50	267,12	-	0,00	-	0,00	-	0,00
6.718,75	2.852,00	1.517,57	-	0,00	-	0,00	-	0,00
122.852,75	10.225,00	5.026,59	42,96	0,00	50,07	0,00	61,31	0,01
8.368,50	1.064,50	424,72	11,90	0,01	13,86	0,01	16,98	0,02
187.079,25	28.521,25	49.843,88	203,79	0,01	237,53	0,01	290,84	0,01
19.877,00	3.877,75	6.777,08	84,07	0,02	97,99	0,03	119,98	0,03
482,50	387,25	286,44	-	0,00	-	0,00	-	0,00
78.322,25	2.677,50	1.552,53	2,32	0,00	2,70	0,00	3,31	0,00
18.683,25	4.289,00	4.610,17	2,89	0,00	3,37	0,00	4,13	0,00
4.451,75	2.942,50	13.480,42	2,62	0,00	3,06	0,00	3,75	0,00
44.229,00	1.716,25	1.065,95	0,53	0,00	0,61	0,00	0,75	0,00

Vs – Volume de contribuição do baixo topográfico

Fonte: autores (2020).

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 o ponto de acumulação dentro da rede de fluxo, criando um arquivo *shapefile* de pontos para, juntamente com o *raster* de direção de fluxo criado com a ferramenta *Flow Direction*, ser usado como entrada na ferramenta no *Watershed* do *Hydrology* no ArcGIS. O processamento gerou um *raster* com as microbacias de cada ponto exutório. O arquivo *raster* foi vetorizado através do *Raster to Polygon* para cálculo das características das microbacia.

3. Resultados e discussões

3.1. MDE Calibrado

A calibração realizada com 20 GCP pelo método proposto por Araújo *et al.* (2018) mostrou-se robusta ao apresentar um $R^2 = 0,999$ e $p < 0,001$ (Figura 8), de onde se conclui que existe uma forte correlação entre os pontos de controle coletados através de GNSS e o MDE. O modelo forneceu uma equação de regressão: $y = 1,0139x - 0,2087$ 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.

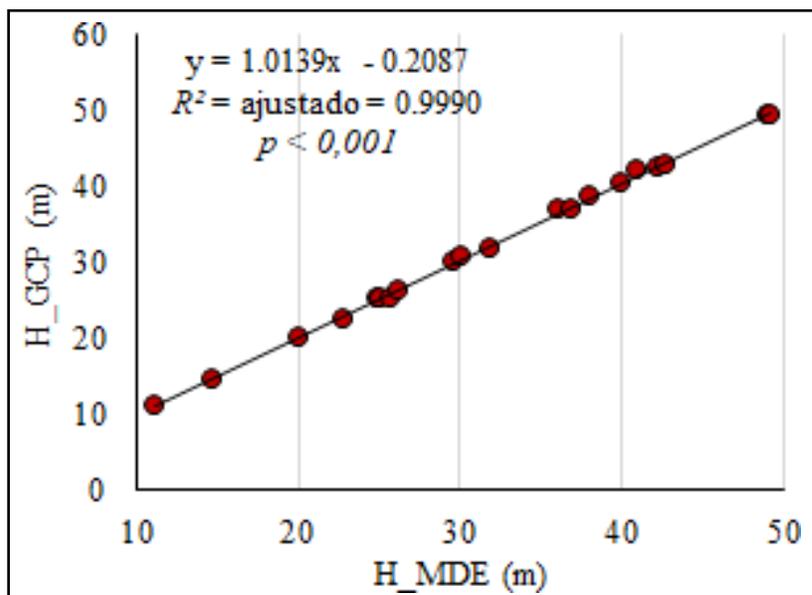


Figura 8 – Comparativo H_{GCP} (Bases de referência) e H_{MDE} por Regressão Linear. Fonte: autores (2020).

Na estatística descritiva dos dados 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 $-0,234m$, que o plano do MDE não calibrado estava acima do nível dos pontos de controle (Tabela 4). A média de variação dos pontos de controle e MDE calibrado apresentaram o valor zero, devido ao ajustamento do plano do MDE ao plano dos pontos de controle.

Observou-se também uma singela 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 por perfilamento a laser acompanhando o aerolevantamento de 2016.

Tabela 4 – Estatística descritiva dos dados altimétricos para área de estudo.

	H - GCP (m)	H - MDE (m)	$\Delta H = H (GCP) - H (MDE)$	H - MDE calibrado	$\Delta H = H (GCP) - H (MDE \text{ calibrado})$
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	

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

Fonte: autores (2020).

3.2. Processo de ocupação urbana na área de estudo

Em 2000 a população residente no bairro Alto do Sumaré era de 3.947 habitantes, enquanto na década seguinte esse número cresceu 64,25% (Tabela 5). Tal crescimento foi maior que o crescimento total da população de Mossoró, aumento populacional que já demonstrava o potencial da área de estudo para expansão urbana.

Tabela 5 – Crescimento da população na área de estudo período 2000 a 2010.

Local	População		Crescimento percentual
	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 no bairro iniciou-se na porção nordeste e parte da porção noroeste, onde se destaca a presença da unidade PETROBRAS UN-RNCE/ATP-MO, que representava 5,62% da área total do bairro (Tabela 6). A partir de 2010 ocorreu a segunda fase de ocupação no bairro Alto Sumaré, com vetores de crescimento da porção nordeste em direção à parte sul do bairro, como também para a parte centro-oeste (Figura 9).

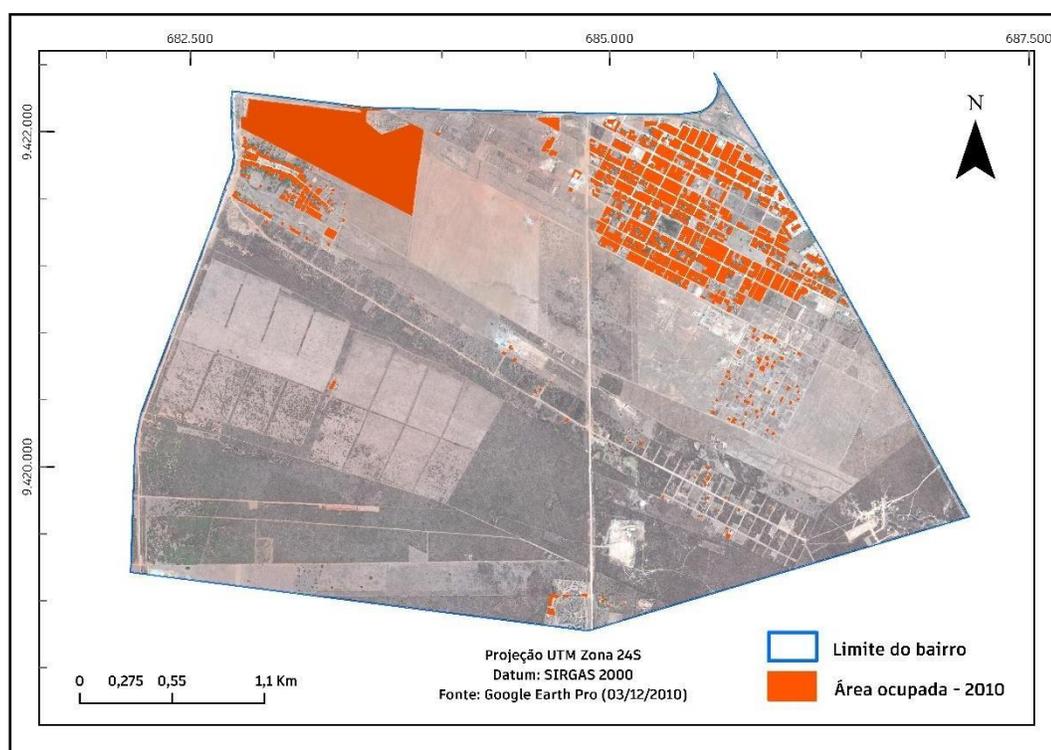


Figura 9 – Ocupação urbana do bairro Alto do Sumaré em 2010.

Fonte: autores (2020).

Em 2017 a porcentagem de área ocupada no bairro era de 10,15%, o que representa 80,75% de taxa de crescimento de ocupação no bairro. A expansão urbana da porção nordeste já havia se consolidando com as construções dos residenciais Bella Residence e Cidade Jardim 1, e havia se iniciado a ocupação da porção centro-oeste no bairro com a construção do residencial Monte Olimpo, Cidade Jardim 3 e Bosque dos Pássaros (Figura 10).

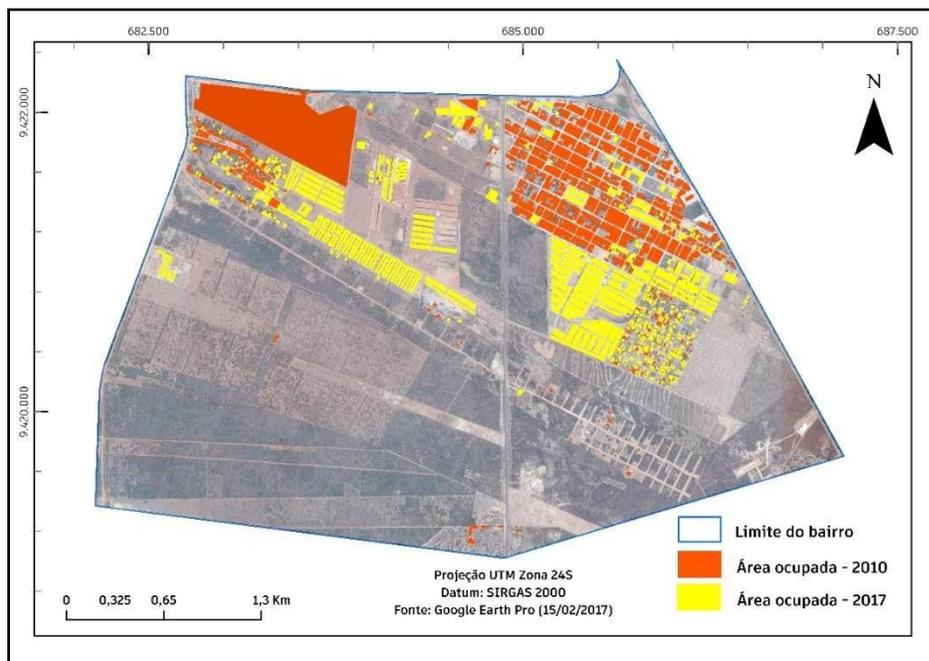


Figura 10 – Ocupação urbana do bairro Alto do Sumaré em 2017.
 Fonte: autores (2020).

No ano de 2019 iniciou-se expansão da parte sudeste do bairro Alto do Sumaré com o início da construção do residencial Cidade Alta e Campo Bello, na porção centro-oeste houve também a conclusão do residencial Bosque dos Pássaro e Village do Oeste (Figura 11). No biênio 2017 – 2019 a taxa de expansão no bairro foi expressiva, da ordem de 12,75% (Tabela 6).

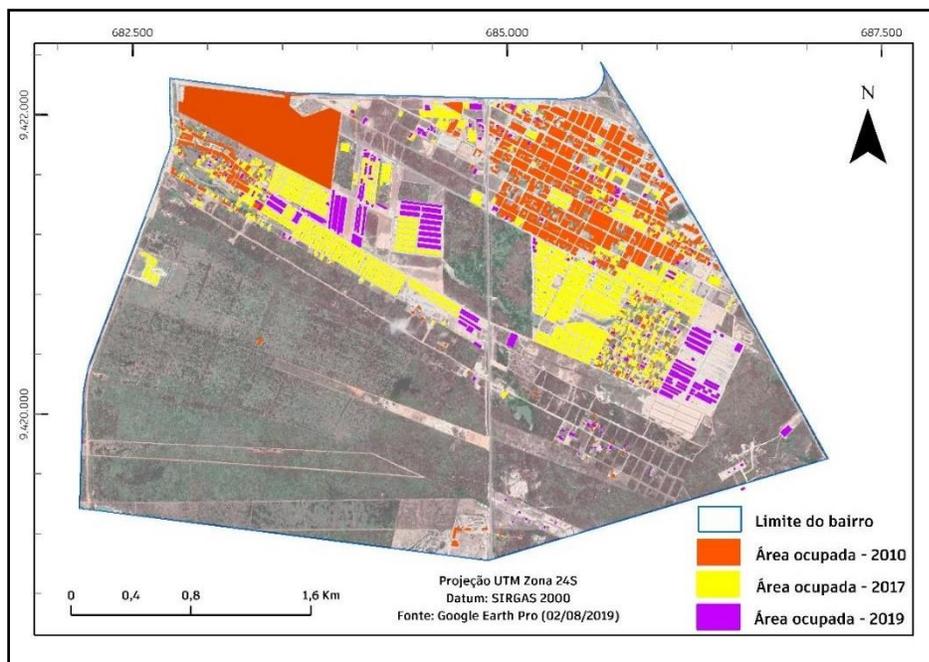


Figura 11 – Ocupação urbana do bairro Alto do Sumaré em 2019.
 Fonte: autores (2020).

Tabela 6 – 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 de Ocupação	Taxa de Crescimento da Ocupação
2010	671.807,17	5,62%	-
2017	1.214.265,28	10,15%	80,75%
2019	1.369.084,55	11,44%	12,75%

Fonte: CENSO 2000, CENSO 2010, IBGE.

3.3. Modelo Digital de Superfície (MDS) simplificado

O MDS simplificado incorporou feições antrópicas ao MDE, elementos essenciais na análise das linhas de fluxo de escoamento. No mapa sombreado da Figura 12 verifica-se, associando-se o histórico da expansão urbana do bairro Alto Sumaré descrito anteriormente, que o crescimento urbano tem ocupado cada vez mais setores de relevo baixo, que são os mais propícios às inundações e alagamentos.

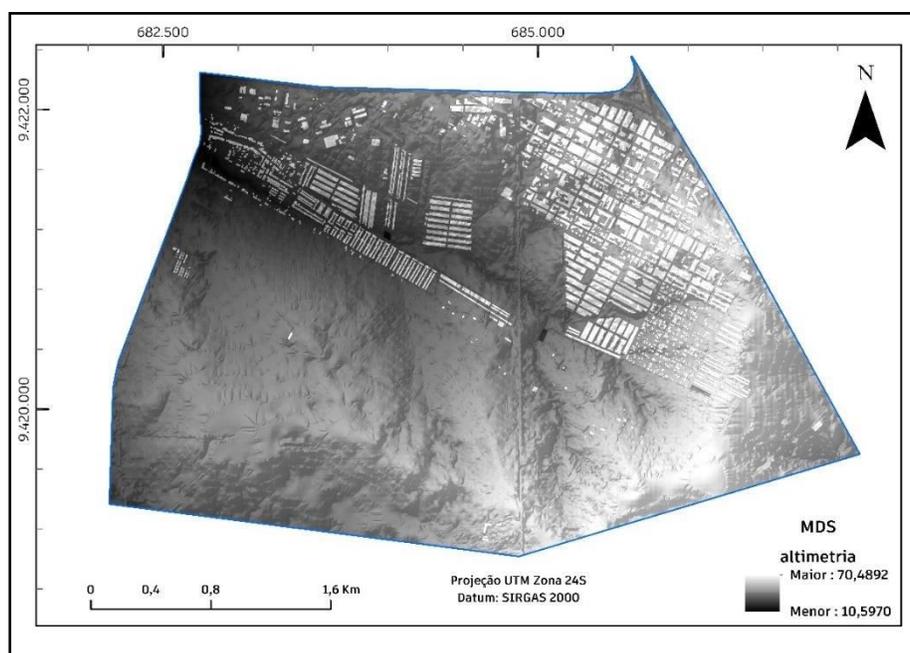


Figura 12 – Modelo Digital de Superfície simplificado do bairro Alto do Sumaré.
Fonte: autores (2020).

3.4. Depressões topográficas e rede de fluxo

A aplicação da rotina de processamento *Depression Evaluation* sobre o MDS resultou na identificação de depressões ou baixos topográficos e suas respectivas áreas de contribuição. O produto resultante exibiu todos os baixos topográficos onde as células do entorno convergem para uma célula de altimetria mais baixa. Assim, o mapa gerado mostrou também áreas cujas depressões possuíam profundidade menores que 1m. No entanto, o MDS simplificado teve origem nos dados de curvas de nível com precisão métrica e, portanto, os baixos topográficos com profundidade menores que 1m foram descartados, restando 31 baixos topográficos significativos (Figura 13).

Os baixos topográficos 530937, 527996, 521741 e 518329 já eram esperados, pois são lagoas artificiais (lagoas Residenciais: Cidade Alta, Cidade Jardim, Monte Belo e Bosque dos Pássaros 1 respectivamente); igualmente, os baixos topográficos 530741, 531038, 531356, 531637, 531315, 531270, 514668 são pequenas barragens construídas ao longo do talvegue principal, além dos baixos topográficos 527748, área a montante de bueiro na BR-110 associada a lagoa artificial, e 523792, a área lindeira ao residencial Bosque dos Pássaros 2, que inunda periodicamente.

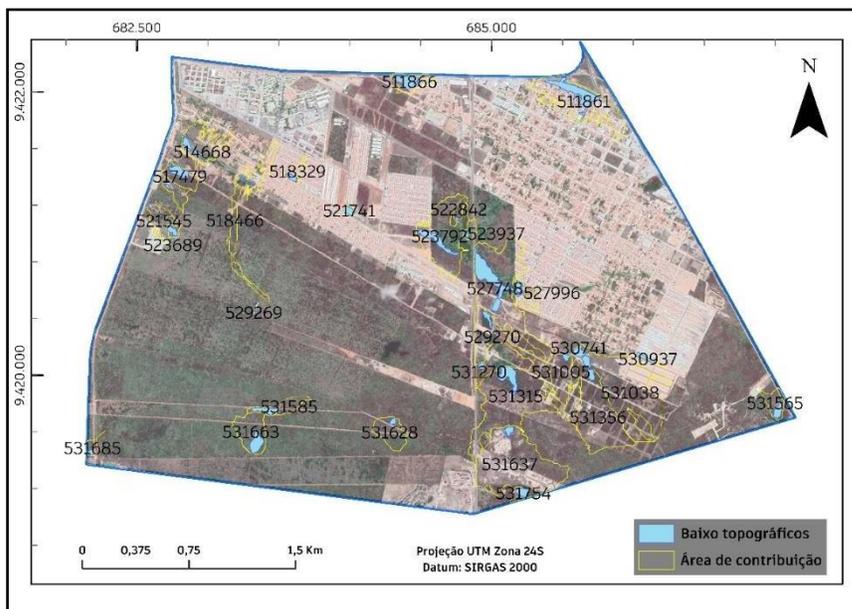


Figura 13 – Depressões topográficas do bairro Alto do Sumaré.
 Fonte: autores (2020).

As redes de fluxo representaram o resultado esperado, tanto para área urbanizada como para as áreas ainda não ocupadas e/ou naturais, demarcando o escoamento superficial (Figura 14). O delineamento na área urbanizada ocorreu predominantemente através do padrão de arruamento, o que demonstra um dos principais efeitos da ação antrópica na urbanização, com a terraplenagem e pavimentação das ruas, em exercerem um caminho preferencial para as linhas do fluxo de escoamento. Ainda, a área livre de ocupação urbana apresentou linhas de fluxo nos pontos mais baixos, onde se formam os caminhos preferenciais de escoamento superficial.

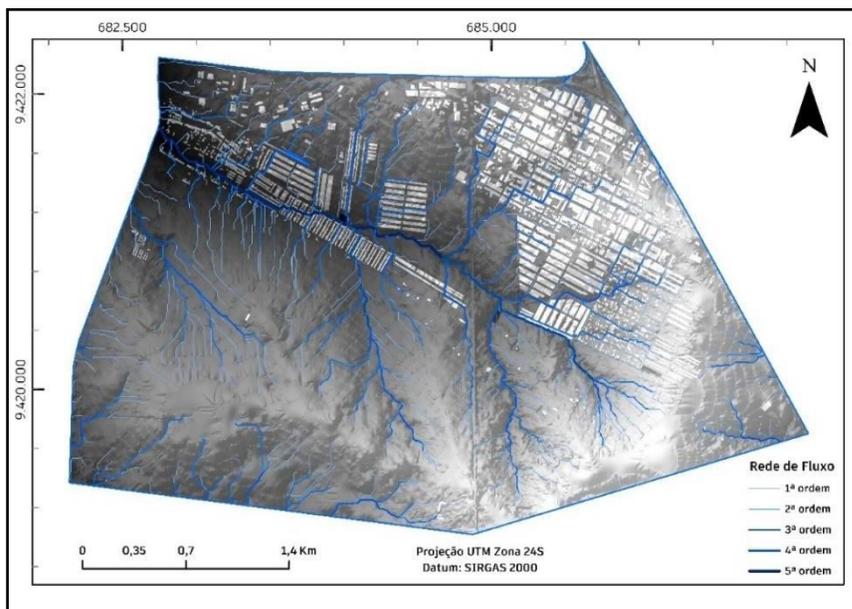


Figura 14 – Rede de fluxo no bairro Alto do Sumaré.
 Fonte: autores (2020).

3.5. Volumes de contribuição nas bacias artificiais construídas

O processo de urbanização, quando precede os empreendimentos residenciais, impõe ao uso e ocupação do solo as interconexões de redes de fluxos. Tal 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 condicionante ao escoamento, quanto pela interconexão das microbacias através de obras hidráulicas, como galerias e canais. Assim, atua o modelo de escoamento superficial adotado disponível no *software* ArcGIS, que elimina as depressões e picos do MDE para formar um sistema de drenagem contínuo.

A definição dos pontos de exutórios a montante das lagoas artificiais das depressões topográfica e da rede de fluxo permitiu a delimitação das microbacias de contribuição de cada lagoa, bem como permitiu conhecer as características das microbacias, tais como: ponto mais extremo, cota altimétrica de início e fim e padrão de urbanização de cada bacia. Com essas características foram realizados os cálculos dos volumes de acumulação de cada microbacia para os TR de 5, 10 e 25 anos (Tabela 7) considerando-se a urbanização de toda a área de contribuição.

Tabela 7 – 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, TR = 10 anos e TR = 25 anos.

Contribuição Depressão (m ²)	Área Urbanizada (m ²)	Vol. Depressões (m ³)	Vs (m ³) TR = 5 anos	Vs (m ³) TR = 10 anos	Vs (m ³) TR = 25 anos	Lagoa de amortecimento
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	8.919,86		-	-	-	
40.409,03	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	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	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	

Fonte: autores (2020).

Os volumes acumulados calculados para uma chuva com TR de 5 anos apresentaram valores maiores que o volume da depressão, ou seja, os volume calculado nas lagoas Cidade Jardim 1 e Residencial Monte Olimpo, com 21.488,11 m³ > 6.777,08 m³ e 49.597,94 m³ > 15.978,31 m³, respectivamente. Além disso, duas das pequenas barragens presentes onde se instalou o 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 de 5 anos foi a lagoa natural existente nas proximidades do Bosque dos Pássaros 2, com volume acumulado de 35.046,16 m³, maior que o volume da depressão de 5.026,59 m³.

O bueiro no extremo jusante da linha de fluxo (talvegue principal), porção final do Residencial Monte Olimpo 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 apresentou um volume acumulado de 11.609,81 m³, 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 hidrográfica. 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 I 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, chuvas com pequenos tempo de recorrência são suficientes para que toda a área a montante contribua com grandes descargas a jusante, gerando assim aumento do escoamento superficial e inundações e alagamentos dos terrenos a jusante.

4. Considerações finais

Neste artigo foram abordados aspectos correlatos entre o crescimento urbano e as inundações e alagamentos. O estudo avaliou o crescimento urbano planejado do bairro Alto Sumaré em Mossoró/RN. No processo de ocupação urbana predominou a instalação de empreendimentos direcionados à moradia, onde foram construídos diversos conjuntos residenciais. A área é predominantemente plana e teve maior crescimento entre os anos de 2017 a 2019, com taxa de crescimento de ocupação do bairro de 12,75%.

Os empreendimentos instalados ocuparam tanto as partes mais altas do relevo como igualmente as áreas baixas, onde concentra-se a linha de fluxo principal de escoamento da microbacia 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 e gradual.

O uso de geotecnologias aplicadas a análise de áreas suscetíveis a alagamentos se mostrou adequada neste estudo de caso, 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 de revisão de metodologia 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. Mais investigações devem ser realizadas para o entendimento e melhor parametrização do processo. A avaliação de áreas de contribuição maiores, que formam as sub-bacias das áreas de contribuição das lagoas e baixos topográficos significativos da área de estudo, apresentaram volumes de acumulação que merecem destaque sob o ponto de vista de alerta aos moradores das áreas de influência. Nesse caso, entende-se que estudos mais detalhados, onde sejam avaliados os aspectos dinâmicos da interrelação do amortecimento das lagoas e pequenas barragens, devem ser realizados para um melhor delineamento dos riscos de inundações e alagamentos. Contudo, a ausência de análise integrada do planejamento de macrodrenagem demonstrou que o sistema oferece risco aos moradores. Em 2017, ainda durante a implantação da Lagoa de Amortecimento do Residencial Monte Olimpo, a ocorrência de alguns eventos de precipitação já provocou inundações e alagamentos no residencial Monte Olimpo.

De modo efetivo, os resultados mostraram o efeito da urbanização e expansão urbana que, quando adicionados aos impactos das mudanças climáticas, sobretudo os eventos extremos de precipitação, sugerem aos gestores do planejamento espacial urbano e do planejamento de emergência, os riscos que oferecem à população.

Portanto, o detalhamento da quantificação dos elementos do meio físico e dos eventos extremos de precipitação mostram-se relevantes, igualmente, na previsão e na gestão de riscos para inundações e alagamentos urbanos. Em termos previsionais são considerados até mais complexos, em comparação às inundações meramente fluviais, pois requerem a medição e previsão precisa das chuvas locais em curtos períodos de tempo. Assim, a elaboração de modelos mais detalhados, baseados em séries contínuas e ininterrupta de dados, são fundamentais na avaliação dos efeitos de inundações em áreas urbanas, onde rios e drenagem urbana interagem fortemente. A previsão de fluxo para uma série de intensidades de precipitação em diferentes tempos de recorrência é basilar na gestão do risco de enchentes, inundações e alagamento, como norteador de estratégias de

adaptação relacionadas à previsão de enchentes, inundação e alagamento, de modo que se evite subestimar o pico de escoamento em áreas já urbanizadas e em terrenos onde se planeja a expansão da urbanização.

Portanto, recomenda-se para trabalhos futuros a avaliação do impacto na dinâmica fluvial do rio Mossoró, pois a área de estudo está a montante do rio, o que permite associar um aumento de contribuição de escoamento superficial e influência direta de risco nas áreas centrais da cidade de Mossoró, instaladas a jusante da área de contribuição do bairro Alto Sumaré.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFRN, ao Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFRN, ao Prof. Dr. Paulo Victor do Nascimento Araújo, ao MSc. Caio Cortez de Lima e a Eduardo Baptista Guadain pelo apoio.

Referências

- ABDELSALHEEN, M.; ELMOUSTAFA, A.; HASSAN, A. Evaluation of Depression Storage Using Grid-Based GIS Model. *International Journal of Science and Research*, v. 7, n. 9, 285-289, 2018.
- AKTER, T.; QUEVAUVILLER, PH.; EISENREICH, S.; VAES, G. Impacts of climate and land use changes on flood risk management for the Schijn River, Belgium. *Environmental Science & Policy*. 89. 2018. 10.1016/j.envsci.2018.07.002.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, 711-728, 2013.
- ALVES, J. E. D., O mundo mais urbanizado e as cidades virando saunas. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2021/01/27/o-mundo-mais-urbanizado-e-as-cidades-virando-saunas/>. Acesso em 05/04/2022.
- 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*, v. 24, n. 41, p.1-16, 2014.
- ARARIPE, P.T.; FEIJÓ, F.J. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 8, n. 1, 127-141, 1994.
- ARAÚJO, P.V.N.; AMARO, V.E.; ALCOFORADO, A.V.C.; SANTOS, A.L.S. Acurácia vertical e calibração de modelos digitais de elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 41, n. 1, 351-364, 2018.
- BANSAL, N.; MUKHERJEE, M.; GAIROLA, A. Causes and impact of urban flooding in Dehradun. *International Journal of Current Research*, v. 7, n. 2, 12615-12627, 2015.
- CEPED/UFSC. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, 2ª edição, Florianópolis, CEPED/UFSC, 2013.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Mineral. Geologia e recursos minerais da Folha Mossoró, estado do Rio Grande do Norte: texto explicativo. Organizadores: Sérgio Willian de Oliveira Rodrigues, Vladimir Cruz de Medeiros Brito. Recife, PE: CPRM, 72p. 2014.
- DANDAPAT, K.; PANDA, G.K. Flood vulnerability analysis and risk assessment using analytical hierarchy process. *Model Earth Syst Environ*, v. 3, 1627-1646, 2017.
- DAS S. Geographic information system and AHP-based flood hazard zonation of Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Arab. Journal of Geosciences*, 11, 2018.

- DOU, X.; SONG, J.; WANG, L.; TANG, B.; XU, S.; KONG, F.; et al. Flood risk assessment and mapping based on a modified multi-parameter flood hazard index model in the Guanzhong Urban Area, China. *Stoch Environ Res Risk Assess*, v. 32, 1131–1146, 2018.
- 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). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, 2016
- GUO E, ZHANG J, REN X, ZHANG Q, SUN Z. Integrated risk assessment of flood disaster based on improved set pair analysis and the variable fuzzy set theory in central Liaoning Province, China. *Natural Hazards*, v. 74, 947-965, 2014.
- HONG, H.; PANAH, M.; SHIRZADI, A.; MA, T.; LIU, J.; ZHU, A.X. et al. Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neuro-fuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. *Science of Total Environment*, v. 621, 1124–1141, 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2001. Resultados da Amostra do Censo Demográfico 2000 - Malha municipal digital do Brasil: situação em 2001. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Fonte: IBGE, Resultados da Amostra do Censo Demográfico 2000 NOTA : Informações de acordo com a Divisão Territorial vigente em 01.01.2001. 2001
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA . Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- 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
- JHA, A.; LAMOND, J.; BLOCH, R.; *et al.* Five Feet High and Rising – Cities and Flooding in the 21st Century, Policy Research Working Paper 5648. The World Bank, Washington, 2011.
- KIA, M.B.; PIRASTEH, S.; PRADHAN, B.; MAHMUD, A.R.; SULAIMAN, W.N.A.; MORADI, A. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environment Earth Science*, v. 67, 251-264, 2012.
- KURZBACH, S.; HAMMOND, M.; MARK, O.; SLOBODAN DJORDJEVIC, S.; et al. The development of socio-economic scenarios for urban flood risk management. NOVATECH, 1-10, 2013.
- LEE, S.; NAKAGAWA, H.; KAWAIKE, K.; ZHANG, H. Urban inundation simulation considering road network and building configurations. *Flood Risk Management*, v. 9, 224-233, 2016.
- LIMA, C.C.; AMARO, V.E.; ARAÚJO, P.V.N.; SANTOS, A.L.S. Identificação e avaliação de zonas de alagamentos urbanos, com suporte de geotecnologias, na cidade de Natal, Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, n. 2, 378-394, 2019
- LIMA, F.G.F.; AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T.; SANTOS, A.L.S. 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*, v. 68, n. 3, 527-538, 2016.
- MARENGO, J.; RAMÍREZ, V.; OBREGÓN, G. Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. *Climate Research* 57. 61-72, 2013.

- MERZ, B.; HALL, J.; DISSE, M.; SCHUMANN, A. Fluvial flood risk management in a changing world. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 509–527, 2010.
- MUNICH RE. Annual Review: Natural Catastrophes 2005, Munich: *Munich Reinsurance Company*, 2005.
- NAULIN, J.P.; PAYRASTRE, O.; GAUME, E. Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. *Journal of Hydrology*, v. 486, 88–99, 2013.
- 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*, 14, p. 795-802, 2009.
- ROCHA, A. B. Proposta metodológica de gestão dos espaços-riscos de inundações urbana em Mossoró-RN. 2015. 172f. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.
- SANTOS, W.O. Máximas intensidade e índices de Erosividade de chuvas para o Rio Grande do Norte. 2015. 142f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água). Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 2015.
- SATO, T. Fundamental characteristics of flood risk in Japan's Urban Areas. Society to Emerging Disaster Risks in Mega-Cities. Terra, p. 23-40, 2006. Disponível em: <http://www.terrapub.co.jp/e-library/nied/pdf/023.pdf>. 2006. Acesso em: 23/09/2020.
- 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). Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2015.
- STERN, N. H. The economics of climate change: The Stern review. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- TEHRANY, M.S.; PRADHAN, B.; JEBUR, M.N. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, v. 504, 69-79, 2013.
- TELLMAN, B., SULLIVAN, J. A., KUHN, C., KETTNER, A. J., DOYLE, C. S., BRAKENRIDGE, G. R., Slayback, D. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596(7870), 80–86, 2021.
- TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (org.). *Drenagem urbana*. Porto Alegre, ABRH, 1995. 384p.
- UNDESA - UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS/POPULATION DIVISION. *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. United Nations, New York. 2012
- ZHANG J, CHEN Y. Risk assessment of flood disaster induced by typhoon rainstorms in Guangdong province, China. *Sustain*, v. 11, 2019.