



**Identificação e Avaliação de Zonas de Alagamentos Urbanos,
com o Suporte de Geotecnologias, na Cidade de Natal, Nordeste do Brasil**
Identification and Evaluation of Urban Flooding Zones
with the Support of Geotechnologies, in Natal City, Northeast Brazil

Caio Cortez de Lima¹; Venerando Eustáquio Amaro^{1,3};
Paulo Victor do Nascimento Araújo^{2,3} & André Luis Silva dos Santos⁴

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
Complexo Tecnológico de Engenharia, Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica,
Campus Universitário Lagoa Nova, 59078-970, Natal-RN, Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte,
Campus Macaú. Pça das Margaridas, 300, Conjunto COHAB, 59500-000, Macaú-RN, Brasil

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica,
Laboratório de Geoprocessamento, Caixa Postal 1524, Campus Universitário Lagoa Nova, 59078-970, Natal-RN, Brasil

⁴Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus São Luís Monte Castelo,
Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, 65030-005, São Luís-MA, Brasil

E-mail: caioc.lima@hotmail.com.br; venerandoamaro@gmail.com; paulo.araujo@ifrn.edu.br; andresantos@ifma.edu.br

Recebido em 15/04/2019 Aprovado em 21/05/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_378_394

Resumo

Alagamentos urbanos provocados por chuvas intensas têm causado significativa perda de vidas e danos econômicos em diversas áreas urbanas do mundo. Esse tipo de alagamento vem se tornando frequente em muitas cidades brasileiras. Na cidade de Natal, capital do Estado do Rio Grande do Norte (RN), região Nordeste do Brasil, o processo de urbanização ocorrido nas últimas quatro décadas promoveu significativa impermeabilização do solo, que tem se refletido em inúmeros alagamentos urbanos por ano. Este estudo objetiva identificar e avaliar áreas suscetíveis a alagamentos em Natal, especificamente no Bairro do Turói, considerando a integração de variáveis como Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS) de precisão, sistema de drenagem pluvial, registros históricos de alagamentos e precipitações horárias, além de considerar o tipo de ocupação dos lotes urbanos no bairro. As abordagens metodológicas foram conduzidas e integradas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), com o apoio de base de dados acurada obtida in loco com Global Navigation Satellite System (GNSS) para as análises de alagamento urbano. Os resultados mostraram que na área de estudo duas depressões topográficas em locais de intensa atividade comercial e social se destacam por apresentarem características geomorfológicas e antrópicas altamente favoráveis aos alagamentos em eventos de precipitação intensa. Além disso, os resultados permitiram a geração de modelos de fluxo superficial com parâmetros de alta aplicabilidade para o aprimoramento de projetos de sistemas de drenagem urbana e da gestão urbana. Este estudo demonstrou ainda que as abordagens metodológicas baseadas no uso de Geotecnologias podem subsidiar planos de gestão de riscos, reduzindo gastos públicos com obras e ações emergenciais mais eficazes.

Palavras-chaves: Georisco, Modelo Digital de Terreno, Sistema de Informação Geográfica

Abstract

Urban floods motivated by heavy rains have caused significant loss of life and economic damage in several urban areas of the world. This flooding type have become frequent in many Brazilian cities. In Natal City, Rio Grande do Norte (RN) State Capital, Northeast Brazil, the urbanization process over the last four decades promoted significant soil sealing, which has reflected in numerous urban floods per year. This study aims to identify and evaluate areas susceptible to flooding in Natal, specifically in the region of Turói, considering Digital Terrain Model (DTM), Digital Surface Model (DSM) of precision, pluvial drainage system, historical records of flooding and hourly precipitations, in addition to reflecting the type of occupation of urban lots in the neighborhood. Methodological approaches were conducted and integrated into the Geographic Information System (GIS) environment, with the support of in loco accurate database of Global Navigation Satellite System (GNSS) for urban flooding analyses. The results showed that in the study area two topographic depressions in sectors of intense commercial and social activities stand out because they present geomorphological and anthropic characteristics highly favorable to flooding in events of intense precipitation. Furthermore, the results allowed the generation of a superficial flow models with parameters of high applicability for the improvement of projects of urban drainage systems and urban management. This study also demonstrated that methodological approaches based on the use of Geotechnologies can subsidize risk management plans and reduce public expenditures with more effective works and emergency actions.

Keywords: Geohazard, Digital Terrain Model, Geographic Information System



1 Introdução

A urbanização crescente e desordenada, aliada ao crescimento populacional desregrado, tem acarretado a expressiva impermeabilização dos solos urbanos em cidades brasileiras (Targa *et al.*, 2012; Santos Jr. & Santos, 2014; Santos *et al.*, 2017). Outro fator relevante é que a impermeabilização dos solos urbanos, por reduzir a infiltração natural e, consequentemente, aumentar o escoamento superficial quando sob as condições de precipitações elevadas, decorrente de alterações climáticas, são responsáveis por constantes alagamentos e inundações, igualmente em várias cidades do mundo, com expressivas perdas socioeconômicas e de vidas humanas (Correia *et al.*, 2015; Smith *et al.*, 2016; Recanatesi *et al.*, 2017; Pilla *et al.*, 2019). Zonas urbanas são particularmente vulneráveis a estes fenômenos em virtude do elevado número de pessoas e grandes áreas construídas, o que torna recorrente as perdas de vida e danos econômicos durante eventos extremos de precipitação (Santos Jr. *et al.*, 2016; Barros & Conde, 2017; Silva *et al.*, 2018). A frequência e a magnitude destes eventos dependem de vários parâmetros como topografia, escoamento superficial, arranjo urbano e ocupação do solo (Ribeiro *et al.*, 2013), os quais devem ser analisados de maneira integrada para a elaboração de um sistema de drenagem pluvial eficaz ou outras soluções e planos de mitigação adequados aos problemas decorrentes.

Na última década, os estudos sobre modelagens computacionais aplicados às enchentes e alagamentos urbanos com uso de ferramentas de Geoprocessamento têm crescido significativamente (Santos *et al.*, 2017; Kourgialas & Karatzas, 2017; Beskow *et al.*, 2018; Araújo *et al.*, 2019; Aguiar *et al.*, 2019). Um dos parâmetros primordiais em modelagens hidrológicas são Modelos Digitais de Elevação (MDE), que permitem a determinação de características morfométricas das bacias hidrográficas e influenciam diretamente no entendimento sobre o escoamento superficial e, igualmente, em parte do seu ciclo hidrológico (Campos *et al.*, 2015, Omran *et al.*, 2016). Além disso, o uso de Geotecnologias, entre as quais o Sensoriamento Remoto, a Geodésia e o Sistema de Informação Geográfica (SIG), potencializam a compreensão de riscos complexos através da

sua capacidade em integrar informações multifontes e associar ferramentas de modelagens e gestão de recursos hídricos (Franci *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2018; Guerra & Abebe, 2019).

O desenvolvimento de mapas de risco ou perigo aplicados aos fenômenos de inundações, enchentes ou alagamentos é uma ferramenta importante para evitar e reduzir a ocorrência destes eventos ao fornecer informações seguras aos gestores responsáveis pelas ações emergenciais e ao público em geral (Demir & Kisi, 2016; Araújo *et al.*, 2019). Informações contidas em mapas sobre a extensão dos alagamentos urbanos são cruciais na avaliação de risco em áreas populosas e propensas a estes fenômenos, pois auxiliam as decisões nas operações de resgate e ações emergenciais durante os eventos de alagamentos (Cook & Merwade, 2009). Portanto, mapas de risco ou perigo a alagamentos urbanos são fundamentais como ferramenta de planejamento urbano e mitigação das consequências de chuvas intensas, embora a maioria dos municípios brasileiros não possuam este tipo de informação.

Neste contexto, a cidade de Natal, capital do Estado do Rio Grande do Norte (RN), sofre frequentemente com alagamentos durante os fenômenos de chuvas intensas, que provocam obstruções de ruas, perdas de bens materiais, além de paralisar atividades comerciais e a circulação da população nos bairros afetados. Dentre esses bairros, o Tirol se destaca por possuir 96 % de infraestrutura de drenagem já instalada (Natal, 2015) e ser uma das áreas com preços mais altos no mercado imobiliário da cidade (Araújo, 2015). Entretanto, há anos o Bairro do Tirol enfrenta problemas com alagamentos frequentes, como indicam os constantes relatos nos noticiários. Portanto, este estudo apresenta procedimentos com uso de Geotecnologias para identificar e avaliar áreas susceptíveis aos alagamentos no Bairro do Tirol, a partir de Modelo Digital do Terreno (MDT), Modelo Digital de Superfície (MDS), arranjo do sistema de drenagens pluviais, registros históricos de alagamentos e de precipitações horárias. Os dados foram integrados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Além disso, considerou-se o arranjo e o tipo ocupacional de lotes urbanos na área de interesse.

2 Área de Estudo

A cidade de Natal (RN) representa um importante polo econômico, educacional e tecnológico para toda a região Nordeste do Brasil com população estimada em 877.640 habitantes e densidade demográfica de 4.805 habitantes/km² (BRASIL, 2019). O Bairro do Tirol ocupa área de 3,6 km² na Zona Leste de Natal (Figura 1) e possui população de 17.011 habitantes e densidade demográfica de 4.725 habitantes/km² (Natal, 2016). O bairro está inserido no domínio da Bacia de Drenagem Riacho do Baldo (IX), conforme o estabelecido pelo Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Natal (PDDMA) (Natal, 2009). A Bacia Riacho do Baldo tem área aproximada de 8,8 km², sendo o seu principal exutório o Rio Potengi, e abrange outros bairros importantes de Natal: Petrópolis, Cidade Alta, Alecrim, Lagoa Seca e Barro Vermelho, além

de compreender na porção leste uma parte do Parque das Dunas.

Portanto, em decorrência da influência da Bacia Riacho do Baldo, a área de estudo compreendeu, além do Bairro do Tirol, os terrenos imediatamente circunvizinhos. De acordo com o PDDMA, a Bacia Riacho do Baldo foi subdividida na sub-bacia Riacho do Baldo IX.1 no setor nordeste do Bairro do Tirol, e sub-bacia Riacho do Baldo IX.2 que ocupa o setor sul e noroeste do bairro (Natal, 2009), como mostra a Figura 1. A sub-bacia Riacho do Baldo IX.2 abriga os corpos hídricos Canal do Baldo e a Lagoa Manoel Felipe, por onde escoam boa parte do fluxo superficial da bacia de drenagem. Um fato de destaque é que o Riacho do Baldo foi convertido em canal retificado onde se vertem tanto a água pluvial, quanto efluentes clandestinos domésticos e comerciais não tratados.

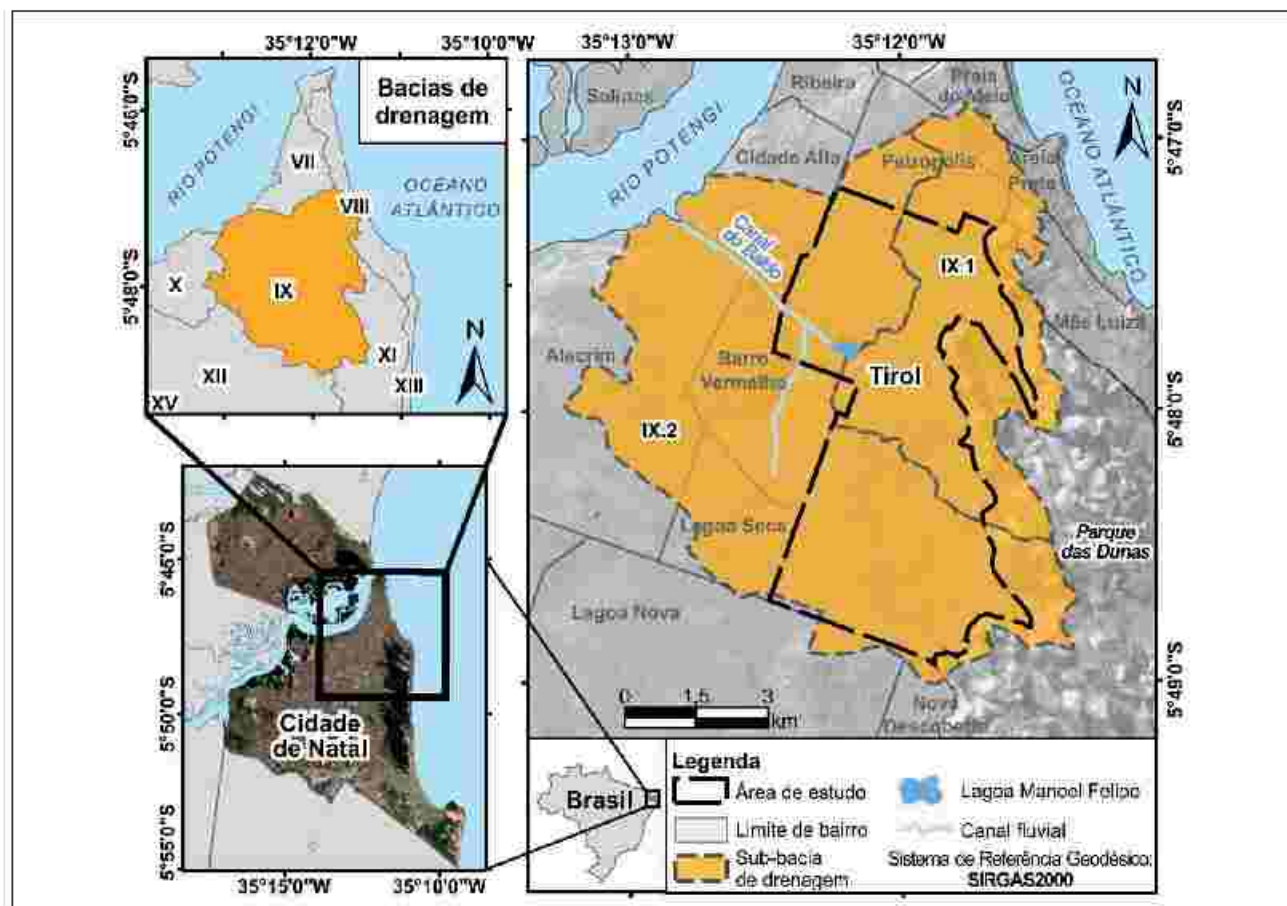


Figura 1 Localização geográfica da área de estudo no Bairro do Tirol da cidade de Natal/RN, com destaque para as sub-bacias de drenagem Riacho do Baldo IX.1, IX.2 e bairros circunvizinhos, na Zona Leste de Natal. Os principais corpos d'água são o Rio Potengi e o Canal do Baldo, que é interligado à Lagoa Manoel Felipe

Entre as décadas de 1980 e 2010, a cidade de Natal cresceu expressivamente em locais de baixos topográficos e regiões de entorno de lagoas naturais (Costa, 2015), desenvolvidas em terrenos interdunares, no contexto geomorfológico, que são áreas naturalmente alagáveis. Desta maneira, com a urbanização favorecendo a intensa impermeabilização do solo, em períodos de intensas precipitações, as lagoas naturais transbordam e os entornos dessas depressões são alagadas, fazendo com que as águas ultrapassem os limites impostos pela urbanização e alcancem as edificações. Dentre os vários tipos de ocupação no Bairro do Tirol, destacam-se nos setores afetados pelos alagamentos: hospitais, escolas, empreendimentos comerciais e áreas residenciais. Apesar da ampla infraestrutura de drenagem instalada, o Bairro do Tirol tem sido, corriqueiramente, apontado nos noticiários por padecer com alagamentos em diversos setores, sobretudo, em cruzamentos de ruas com alto volume de tráfego de veículos (Figura 2).



Figura 2 Consequências de alagamentos nas depressões topográficas identificadas na área de estudo: A. Alagamento em área com hospitais, clínicas médicas e lojas comerciais na Rua Mossoró, B. Problema de subsidência da pavimentação exatamente em local de alagamento no cruzamento da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena, C. Submersão de cômodos de residência no cruzamento da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena, D. Submersão de veículo na Rua Mipibu, E. Grandes trechos de vias obstruídas pelas águas pluviais nas proximidades da Rua Mipibu (Soares, 2017).

No contexto climatológico, que corresponde à faixa costeira oriental do RN, o clima predominante na região de Natal é o Tropical com Verão Seco, que

se caracteriza por concentrar as chuvas entre os meses de maio a julho, com uma estação intensamente seca no período de setembro a dezembro (Alvares *et al.*, 2013). Os registros de precipitações com 253 e 222 mm/dia nos anos de 1998 e 2014 (BRASIL, 2018) mostram que fenômenos dessa intensidade são recorrentes. Cenários futuros preocupantes são factíveis, posto que chuvas intensas de pelo menos 20 mm/hora são capazes de provocar alagamentos em diversas áreas de Natal. As intensas precipitações tornam-se um elemento crítico quando combinados aos solos urbanos impermeabilizados, devido à urbanização conspícua, e dos baixos topográficos característicos de campos dunares, lagoas interdunares e vales fluviais, como ocorre no Bairro do Tirol (BRASIL, 2012).

3 Materiais e Métodos

Os procedimentos metodológicos empregados consideraram a interferência das construções antrópicas no fluxo superficial de água no Bairro do Tirol e adjacências, por meio de abordagens operacionais em Geoprocessamento, para manipulação de dados multifontes com as ferramentas disponíveis em ambiente SIG. A abordagem metodológica estabeleceu um conjunto de análises e interações relacionadas para a identificação e avaliação de depressões topográficas susceptíveis aos alagamentos, definição do fluxo de escoamento superficial de águas pluviais, episódios de alagamentos com registros horários de precipitação frente às infraestruturas urbanas (Figura 3).

3.1 Modelo Digital de Elevação

Os dados topográficos com curvas de nível equidistantes de 1 m, provenientes de levantamentos aerofotogramétricos e disponibilizados pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB), foram interpolados com a técnica *Triangular Irregular Network* (TIN) para confecção de Modelo Digital de Terreno (MDT), com malha de dados a cada 0,5 m. Em seguida, o MDT foi submetido a uma calibração vertical, para ajustamento do plano modelado ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), com 15 pontos de controles no terreno. Os pontos de controle foram coletados por meio de re-

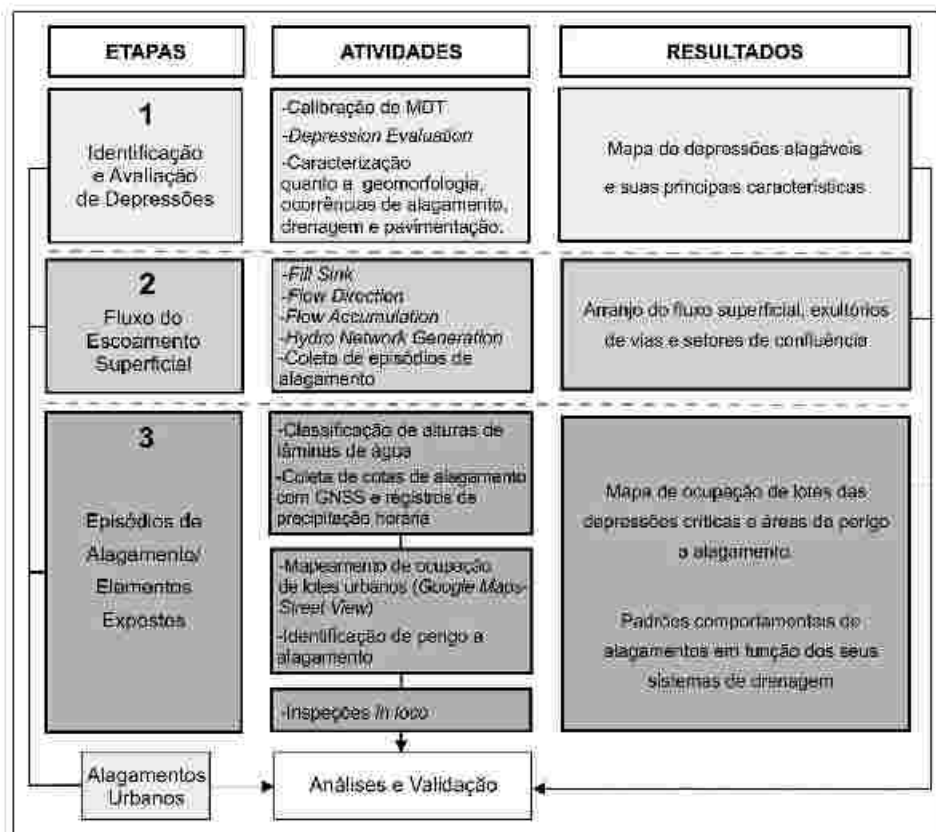


Figura 3 Fluxo metodológico aplicado a identificação e avaliação de zonas de alagamentos no Bairro do Tirol, Natal-RN

ceptores *Global Navigation Satellite System (GNSS)* e, juntamente ao MDT, submetidos ao procedimento de calibração proposta por Araújo *et al.* (2018). Os receptores utilizados foram do modelo Trimble 5700 com precisão horizontal de 3 mm + 0,5 ppm e de 5 mm + 0,5 ppm na vertical e modelo Trimble R3 com precisão horizontal de 5 mm + 1 ppm e vertical de 5 mm + 2 ppm. A média da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error, RMSE*) foram utilizadas como indicadores de acurácia do MDT calibrado.

Considerando-se que as simulações hidrológicas e as informações do sistema de arnuamentos e construções se aproximam da realidade, as informações espaciais sobre as calçadas, canteiros centrais e lotes edificados foram vetorizadas. Foram atribuídos valores altimétricos de 0,2 m para calçadas e canteiro centrais, e 20 m para os lotes urbanos, os quais foram somados ao MDT calibrado para obtenção de um Modelo Digital de Superfície (MDS) simplificado, conforme proposta de Lee *et al.* (2016).

O valor representativo das calçadas e canteiro centrais corresponde ao valor médio aproxima-

do destes elementos na área de estudo. A altura dos lotes urbanos foi atribuída segundo mesmo valor aplicado por Lee *et al.* (2016) a fim de preservar sua proporção altimétrica em relação as calçada e canteiros centrais, sem se basear em alturas reais de edificações no bairro. Apesar disso, o objetivo desse procedimento foi representar apenas os contrastes topográficos do ambiente urbano e sua influência no escoamento superficial ao longo do sistema de arnuamentos por meio do MDS. Assim, os processamentos seguintes foram realizados a partir das informações topográficas desse MDS simplificado, que serviu como base para as simulações sobre os alagamentos e os fluxos de escoamento superficial, integrando esses elementos da infraestrutura urbana. Neste trabalho a nomenclatura MDE é utilizada como termo genérico que contempla tanto MDT quanto MDS.

3.2 Registros Pluviométricos

Dados sobre volume de chuva foram obtidos através de duas estações pluviométricas. Uma das estações era localizada na Escola Estadual Desem-

bargador Floriano Cavalcante (FLOCA) no Bairro de Capim Macio, a aproximadamente 3 km ao sul do Bairro do Tirol. A segunda estação estava sob supervisão do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e se localizava no Bairro de Cidade Alta, área vizinha a oeste do Bairro do Tirol. O conjunto de dados analisados correspondeu ao período de maio de 2014 a maio de 2018, com valores de precipitação horária, o que favoreceu a análise dos alagamentos provocados por chuvas intensas.

3.3 Registros de Alagamentos

Um levantamento histórico de registros de alagamentos ocorridos em Natal, especificamente no Bairro do Tirol, foi realizado entre os anos de 2013 a 2018, através de notícias em jornais locais, publicações em redes sociais e inspeções *in loco*. Tais informações serviram de base para a validação dos processamentos realizados em ambiente SIG, uma vez que a maioria dos episódios dispunha de registros fotográficos onde foi possível estabelecer marcadores (pontos de referência) da cota máxima de alcance do alagamento, definido através do limite de borda da lâmina de água. Com essa estratégia foi possível a espacialização da extensão do espelho d'água e da frequência dos episódios em pontos críticos de alagamento no Bairro do Tirol.

3.4 Identificação das Depressões no Terreno

A identificação das depressões ao longo dos arruamentos é uma etapa essencial para a modelagem do fluxo superficial, sobretudo para setores onde o fluxo concentra-se em áreas urbanas suscetíveis aos alagamentos. Para a identificação dos baixos topográficos foi aplicada sobre o MDS a função *Depression Evaluation* do software ArcGis 10.2, na extensão ArcHydro 2.0 (ESRI, 2011). Com a finalidade de eliminar depressões falsas e/ou insignificantes, apenas os baixos topográficos que apresentaram pelo menos 1 m de profundidade entre a menor cota no interior da depressão e a menor cota em relação a sua borda foram considerados.

Os locais mais propícios para ocorrência de alagamentos foram ratificados com a análise inte-

grada entre os registros prévios de alagamento, o arranjo do sistema de drenagem pluvial, a extensão da depressão ao longo das ruas e avenidas, a correlação com o contexto geomorfológico do Bairro do Tirol e o nível de impermeabilização do solo, com pavimentos e construções. Quanto ao sistema de drenagem pluvial, a sua ausência nos baixos topográficos favorece a ocorrência de alagamentos, mas a sua presença não indica, fundamentalmente, que o sistema instalado comporte todo o volume de água acumulado durante chuvas intensas, nem que o mesmo esteja em perfeitas condições de desobstrução e escoamento.

3.5 Fluxo Superficial

Ainda no MDS, e suas depressões predeterminadas em etapa anterior, foi utilizada a função *Fill Sinks* também na extensão ArcHydro do ArcGis 10.2 para a geração de linhas de fluxos superficiais contínuas, que fornecem modelos de escoamentos superficiais mais precisos (Dindaroglu *et al.*, 2015). O MDS foi submetido às rotinas de geoprocessamentos em ambiente SIG (ArcGis 10.2) para os cálculos da direção e acúmulo do fluxo superficial e geração da rede de drenagem (funções de *Flow Direction*, *Flow Accumulation* e *Hydro Network Generation*, todas encontradas na extensão no ArcHydro) o que possibilitou a localização de pontos críticos de acúmulo de água no interior das depressões urbanas (Recanatesi *et al.*, 2017). Tais rotinas avaliaram o MDS na dimensão do pixel, comparando as diferenças altimétricas entre eles e gerando, como resultante, o sentido do fluxo para cada pixel, na disposição da rede de canais preferenciais para o escoamento superficial. Além disso, permitiu evidenciar os setores onde ocorreu confluência de canais e pontos de descarga final de volume d'água sobre a superfície no arranjo estrutural do sistema de arruamento. A acomodação das linhas de fluxos superficiais foi calculada para áreas de influência com dimensão média de 7.500 m², em função da escala espacial de 1:16.000 empregada nas análises para a dimensão total do Bairro do Tirol e adjacências.

3.6 Extensão dos Alagamentos e Exposição de Elementos Urbanos

Nos locais definidos como críticos aos alagamentos foi realizada a análise em escala espacial de 1:5.000 com a finalidade de avaliar a extensão da

lâmina d'água em função da sua altura, tomando-se como cota de referência o ponto mais profundo no interior da depressão.

A extensão dos alagamentos foi analisada para 5 classes de alturas de lâminas de água: 0,15 m; 0,5 m; 1,5 m; 2,5 m; e, superior a 2,5 ($> 2,5$ m). Apesar disso, nem todas as depressões avaliadas apresentaram todas as classes, visto que a cota máxima de alagamento e transbordamento para bacias vizinhas não ultrapassa a altura da lâmina de água de 1,5 m em algumas depressões. A extensão dos alagamentos sobre o MDS também foi analisada segundo a presença de bocas de lobo, denominação local dada à estrutura de captação de águas pluviais. Tais estruturas, por vezes, não foram posicionadas nos locais mais baixos da depressão, o que torna imperativo uma altura mínima de lâmina de água para que o volume possa ser escoado pelo sistema de drenagem subterrâneo.

Igualmente, a escala 1:5.000 foi empregada no mapeamento de tipos de ocupação dos lotes nas áreas de abrangências das depressões, seguindo as seguintes classes: área comercial; área médica e de estética; área residencial; escola; igreja; posto de combustível; e prédio público. A classe área comercial engloba diversos empreendimentos comerciais como restaurantes, lojas de vestimenta, óticas, farmácias, centros comerciais. A classe área médica e estética corresponde aos lotes com a presença de hospitais, clínicas médicas, salões de beleza e estética. O levantamento dessas informações baseou-se em dados de localização cadastrados por empreendedores no aplicativo *Google Maps*, com imagens de satélites do período de janeiro de 2013, assim como nos dados fotográficos do modo *Google Street View* para o período de 2017 a 2018. Também foram realizadas inspeções *in loco* para complementar e validar as informações provenientes desses aplicativos gratuitos.

Por fim, cinco classes de perigo a alagamento foram atribuídas aos lotes, conforme a influência dos alagamentos: perigo muito alto; perigo alto; perigo moderado; perigo baixo; e perigo muito baixo. Os setores mais baixos nas depressões, com influência direta de lâmina d'água com 0,15 m, foram considerados de mais alto perigo, uma vez que são regiões com alagamentos mais recorrentes. Por consequen-

te, os setores mais elevados, afetados apenas por episódios extremos de menor frequência, são os de perigo muito baixo. Nos casos em que o lote estava submetido a mais de uma classe de altura de lâminas de água foi atribuído ao mesmo a classe de maior perigo.

3.7 Relação entre Precipitação Horária e Cota de Alagamentos

Dentre os registros fotográficos do apanhado histórico de alagamentos, pontos de referência da cota máxima de alagamento foram identificados em campo. Em seguida, dados altimétricos com acurácia geodésica dos limites de bordas das lâminas de água (representando o nível máximo da cota do fenômeno por cada episódio de alagamento) foram coletados nas regiões críticas através de receptores *GNSS* dos mesmos modelos e precisões explicitados na seção 3.1. Esses dados coletados em campo foram pós-processados em laboratório e vinculados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Para avaliar o comportamento das depressões e seus sistemas de drenagem nos setores com alagamentos mais frequentes foi construída uma matriz com valores das cotas das bordas dos alagamentos e das precipitações acumuladas durante a última hora antes do registro fotográfico, nas respectivas datas e horários dos registros fotográficos. Por fim, esse conjunto de dados foi submetido a uma análise de regressão linear, com os valores de precipitação como variável independente e os valores das cotas de alagamento como variável dependente. Os valores de coeficiente de determinação (R^2) e de probabilidade de significância (p) foram utilizados como parâmetro para avaliar os modelos de regressão linear.

Partindo do pressuposto que as depressões identificadas possuem aproximadamente 100 % de impermeabilidade, a extensão dos alagamentos no Bairro do Tirol e adjacências está intrinsecamente relacionada com a intensidade das chuvas e seu volume de precipitação horária. Entretanto, a presença de outros fatores inerentes do meio urbano, como a quantidade e o posicionamento de bocas de lobo por área de abrangência de depressão e a admissível obstrução do sistema de drenagem pluvial por dejetos sólidos descartados ao longo das vias públicas,

pode impedir uma real relação linear entre o volume precipitado e a extensão dos alagamentos, sobretudo quando se analisa vários eventos no decorrer do tempo. Portanto, considerando-se esses aspectos, neste estudo foram definidos 3 tipos de possíveis situações para os alagamentos urbanos, com base na magnitude do Coeficiente de Determinação (R^2) da Regressão Linear (entre Pluviosidade x Cota de Alagamento), segundo os parâmetros definidos por Seber (1977), como mostra a Figura 4: (i) Situação do Tipo I, determinação forte ou perfeita: $0,7 \leq R^2 \leq 1,0$; (ii) Situação do Tipo II, determinação moderada: $0,4 \leq R^2 < 0,7$; e (iii) Situação do Tipo III, determinação fraca ou nula: $0 \leq R^2 < 0,4$. Os diferentes tipos de situações representam análises hipotéticas do ajustamento de modelos estatísticos lineares generalizados, em relação aos valores observados.

4 Resultados e Discussões

Os resultados alcançados neste estudo, sistematizados a seguir, permitiram definir e avaliar uma metodologia baseada em geotecnologias de obtenção e análise de dados com acurácia para identificar áreas susceptíveis a alagamentos e, desse modo, aprimorar a compreensão dos processos responsáveis pelos alagamentos, além de fornecer informações detalhadas sobre os setores mais críticos.

4.1 Acurácia do Modelo Digital de Terreno

O método de calibração proposto por Araújo *et al.* (2018) permitiu a elaboração de um MDT calibrado, por meio da análise de Regressão Linear ($R^2 = 0,997$; $p < 0,001$; $y = 0,9990x - 1,6806$), que correlacionou os pontos de controle no terreno com acurácia vertical e as respectivas altitudes no MDT original (Figura 5).

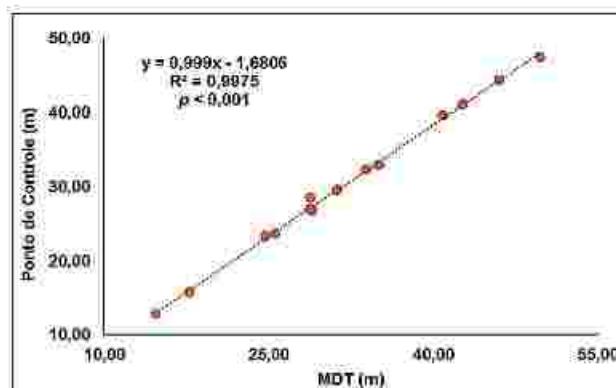


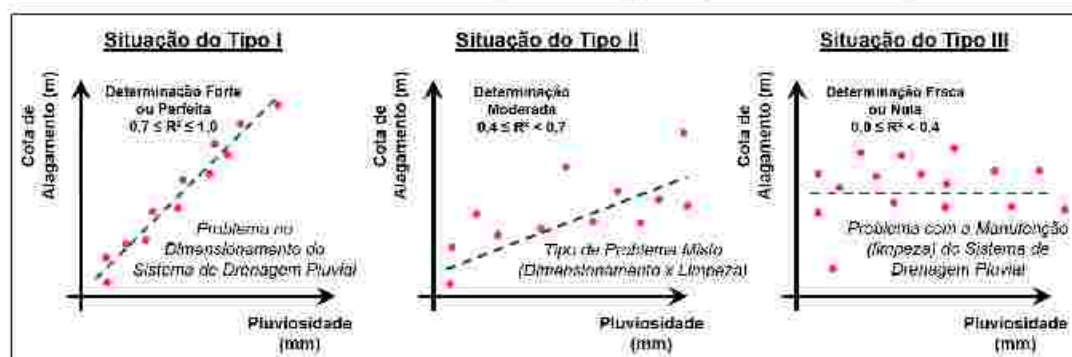
Figura 5 Resultado da análise de Regressão Linear entre Modelo Digital de Terreno (MDT) e Pontos de Controle no Terreno.

Na análise da média de ΔH , oriundo da diferença entre as alturas do MDT original e as alturas ortométricas dos pontos de controle no terreno, observou-se o valor de $-1,71$, indicando que o MDT original estava acima do nível de referência dos pontos de controle, e com RMSE igual a $1,78$ m. Após o ajuste, o MDT calibrado apresentou média de ΔH igual a zero e RMSE igual a $0,47$ m, ou seja, houve uma melhoria de 74% na precisão quando comparado ao MDT original, com aumento de quase quatro vezes na precisão altimétrica. Com isso, ocorreu um ajustamento do plano do MDT ao plano do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

4.2 Depressões no Terreno

Na Sub-bacia de Drenagem IX.1 identificou-se quatro baixos topográficos, denominados de depressões A, B, C e D (Figura 6A). A depressão A localizada no setor norte do Bairro do Tirol, é a feição geomorfológica de maior expressão e influencia algumas das principais vias de tráfego de veículos,

Figura 4 Principais tipos de situações para alagamentos urbanos identificados no Bairro do Tirol e adjacências



como as avenidas Afonso Pena e Hermes da Fonseca. No contexto geomorfológico, a região *B* está diretamente relacionada à depressão *A* e ambas são definidas como depressões interdunares, entre os altos topográficos alinhados na direção NW que definem o prolongamento das dunas vegetadas presentes no Parque das Dunas, como indica o mapeamento geológico realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (BRASIL, 2012).

A depressão *C* localizada a montante da Lagoa Manoel Felipe está sob a influência do Canal do Baldo e possui pequena área de abrangência, quando comparada às demais depressões, pelo fato da cota mínima para escoamento da água nesta depressão corresponder à altura da calçada que separa a Av. Rodrigues Alves da área da Lagoa Manoel Felipe. Além disso, trata-se de uma região de maior declividade, diferentemente da depressão *A* que possui terrenos mais planos.

No setor sul da Sub-bacia de Drenagem IX.1 está localizada a depressão *D* que, como a maior parte dos baixos topográficos na área de estudo, estão relacionados ao contexto geomorfológico de depressões interdunares em meio aos campos de dunas.

Na Sub-bacia de Drenagem IX.2 identificou-se cinco baixos topográficos, denominados de depressões *E*, *F*, *G*, *H* e *I* (Figura 6B). O baixo topográfico *E* corresponde ao trecho da Av. Hermes da Fonseca que foi construída obliquamente sobre terrenos de dunas parabólicas (Figura 6B), ocasionando um vale entre dois cordões arenosos. Os baixos topográficos *F* e *G*, no extremo sul da Sub-bacia IX.2, também estão inseridos no contexto das depressões interdunares entre altos topográficos de cordões arenosos e as dunas vegetadas do Parque das Dunas (Figura 6B). As depressões *H* e *I* possuem influência direta de um canal afluente do Canal do Baldo, pois tratam-se de ruas construídas perpendicularmente ao vale definido por este canal.

Além disso, verificou-se que todas as depressões, exceto os baixos topográficos *A* e *G*, são controladas por edificações que barraram o escoamento superficial natural da água pluvial. As depressões *A* e *G* mostram morfologia que sugere que tenham sido lagoas interdunares naturais, no passado (Medeiros, 2001), enquanto as demais concavidades conduziriam a água para exutórios das sub-bacias

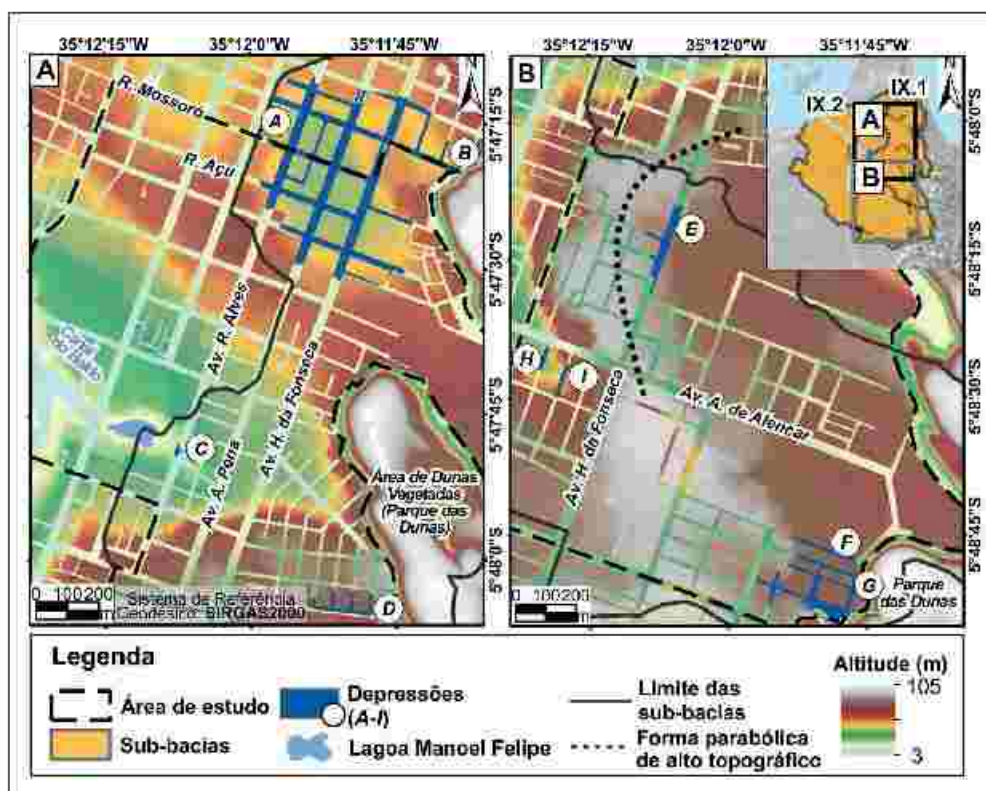


Figura 6 Localização das depressões topográficas identificadas ao longo do sistema de arruamentos, intrinsecamente relacionadas ao contexto geomorfológico local e à disposição espacial das construções urbanas: A, B, C e D presentes na Sub-bacia de Drenagem Riacho do Baldo IX.1, setor nordeste do Bairro do Tirol; B, Depressões E, F, G, H e I, localizadas na Sub-bacia de Drenagem Riacho do Baldo IX.2, setor sul do Bairro do Tirol

Dentre todas as depressões identificadas que são susceptíveis aos alagamentos, seis regiões puderam ser validadas por registros fotográficos de alagamentos ou através da lista de pontos críticos de drenagem descrita no Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Natal/RN (Natal, 2014). A Tabela 1 apresenta informações específicas sobre cada uma dessas depressões, as quais auxiliam na compreensão do processo de alagamentos frente a eventos de precipitações intensas.

Depressão	Contexto Geomorfológico	Registro Prévio de Pontos Críticos	Tipo de Pavimentação (%)		Bocas de Lixo	Área (ha)
			Asfáltica	Paralelepípedo		
A	Zona interdunar	Sim	83,8	16,2	23	8,04
B	Zona interdunar	Sim	19,5	80,5	9	0,65
C	Sistema fluvial	Não	100,0	0	10	0,05
D	Zona interdunar	Sim	0	100,0	5	0,25
E	Zona interdunar	Sim	97,4	2,6	8	0,83
F	Zona interdunar	Não	0	100,0	0	0,11
G	Zona interdunar	Sim	0	67,7*	2	1,78
H	Sistema fluvial	Não	100	0	5	0,08
I	Sistema fluvial	Sim	0	100	6	0,12

Tabela 1 Informações para as depressões quanto ao contexto geomorfológico envolvido, presença de registro prévio de alagamentos, tipo de pavimentação, quantidade de bocas de lixo e sua área de abrangência. *32,3% correspondem à via carroçável com material areno-argiloso

4.3 Fluxo Superficial

O método aplicado para identificação do fluxo superficial revelou aspectos sobre a dinâmica de escoamento da água pluvial no Bairro do Tirol e adjacências, tratando-se de análise crucial ao estudo de alagamentos urbanos diante de eventos de precipitação intensa. Trata-se das condições resultantes da interação entre os diferentes comportamentos assumidos pelos diferentes elementos da organização urbana durante eventos de intensas precipitações e mesmo tempestades (Oliveira & Ramos, 2002; Boonya-Aroonnet *et al.*, 2007; Kaspersen *et al.*, 2017). A Figura 7 mostra a influência de elementos do arranjo urbano sobre o fluxo superficial no Bairro do Tirol e adjacências, os sentidos de escoamentos, os locais de confluência e exutórios, com identificação dos pontos críticos que apresentaram maior número de episódios de alagamentos registrados entre os anos de 2013 e 2018, todas informações obtidas a partir do MDS simplificado e de observações *in loco*.

As depressões A e B são os locais de maior concentração do fluxo superficial e, em virtude de suas formas circulares com fluxo concêntrico, um maior número de ruas atuam como exutórios, canalizando a água para o interior das depressões. Os alagamentos nesses locais são agravados pelo excesso de escoamento superficial, conjuntamente com o sistema de drenagem pluvial subterrâneo em funcionamento ineficiente, seja devido à ausência de manutenção/limpeza e/ou por ter sido subdimensionado (Marafuz, 2015).

Quando um sistema de drenagem pluvial perde a capacidade de escoar o volume de água que deveria fluir por seu intermédio, a água retorna a superfície, agravando os alagamentos. Fato local, que é agravado pelas frequentes ligações clandestinas de sistemas de esgoto residencial e comercial ao sistema de drenagem. Entretanto, igualmente, o mau funcionamento por ausência de limpeza periódica ou subdimensionamento dos sistemas de esgotos também pode gerar transbordamentos de água servida para a superfície do terreno em dias de precipitações intensas, como ocorre por vezes em setor onde está localizada a Rua Açú (Figura 8).

Outros setores na área de estudo que se destacam por apresentarem relevante convergência do fluxo superficial estão localizados (Figura 7): na região sul, onde o fluxo culmina para as depressões F e G; na região sudeste, próximo à entrada do Parque das Dumas pelo acesso da Av. Alexandrino de Alencar; e, na região central, a montante da Lagoa Manoel Felipe. Esta última região, no cruzamento entre a Av. Hermes da Fonseca e a Rua Ângelo Varela, apresenta grande convergência do fluxo superficial provenientes destas vias e, apesar de não ser considerada uma depressão no MDS, o fluxo intenso causa transtornos ao trânsito em dias de precipitação intensa.

De acordo com as Tabelas 1 e 2 nota-se que o modelo de fluxo superficial para depressão A apresenta 12 exutórios, quantidade três vezes maior que em qualquer outra depressão no Bairro do Tirol, 2 trechos de confluência de fluxo superficial, além de apresentar cerca de 83,4% de área impermeável devido ao tipo de pavimentação. Tais aspectos corro-

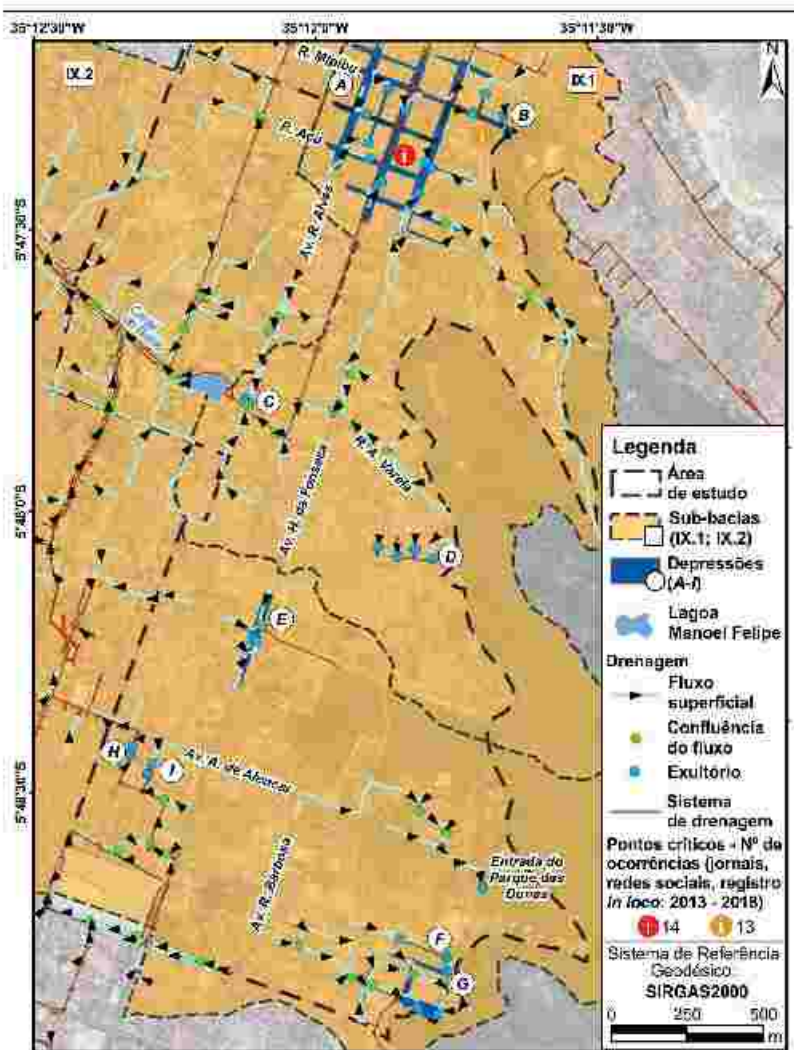


Figura 7 Arranjo do fluxo superficial de águas pluviais, setores de confluência e exutórios, diante da localização das depressões e sistema de drenagem no Bairro do Tirol e adjacências. Destaque para os pontos críticos com maior número de episódios de alagamentos registrados entre os anos de 2013 e 2018.



Figura 8 Transbordamento de poço de visita do sistema de esgoto durante alagamento na Rua Agui após evento de precipitação intensa

boram para que a depressão *A* se destaque como uma das mais críticas, por açambarcar grande volume de água superficial, provavelmente com capacidade reduzida ou subdimensionada do sistema de drenagem pluvial para efetivamente atuar no escoamento do volume de água presente, sobretudo em situações de chuvas intensas.

Depressão	Número de Confluências de Fluxos	Número de Exutórios
A	2	12
B	0	4
C	2	3
D	0	4
E	1	4
F	0	2
G	4	3
H	0	2
I	0	2

Tabela 2 Número de confluências de fluxo superficial e exutórios relativos a cada depressão identificada no Bairro do Tirol e adjacências

Ademais, verifica-se que o padrão das linhas de fluxo superficial é ortogonal nos pontos de confluência, semelhante ao arranjo estabelecido para o sistema de arruamentos do Bairro do Tirol, com ruas ortogonais entre si, elucidando a forte influência dos elementos do arranjo urbano no escoamento de águas superficiais.

As áreas de saída de água do Bairro do Tirol concentram-se para as regiões de campo de dunas vegetadas no setor sul e sudeste, e a noroeste seguem para o Canal do Baldo, e seu afluente, e para regiões baixas como os bairros de Cidade Alta e Ribeira. Os exutórios na área de estudo convergem-se aos baixos topográficos, validando os procedimentos metodológicos empregados para a identificação e avaliação do comportamento dinâmico das depressões diante de eventos de precipitação intensa.

4.4 Áreas de Perigo a Alagamento

As investigações *in loco* permitiram a junção de evidências que foram úteis na compreensão das principais situações ocorrentes do Bairro do Tirol relacionadas à distribuição e abrangência dos rápidos episódios de alagamentos, frequentemente alardeados em dias de precipitação intensa.

Por meio dos dados coletados nos episódios de alagamentos e do tipo de ocupação em cada lote

urbano nos setores de influência dos baixos topográficos, foram identificadas as depressões *A* e *B* como aquelas que oferecem o maior perigo entre os alagamentos identificados (Figura 9A). Os locais frequentemente alagados são os cruzamentos da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena (Figura 9B), da Rua Açú com a Av. Afonso Pena, os quais muitas vezes tomam-se um único e extenso alagamento, além da Rua Mipibu no setor entre as ruas Dom José Pereira e Dr. Renato Dantas (Figura 9C).

O Bairro do Tirol, predominantemente de classe média a alta, possui grande quantidade de empreendimentos comerciais, de saúde e estética e edifícios residenciais. Estes setores com alta concentração de empreendimentos têm sido corriqueiramente prejudicados com alagamentos durante os episódios de precipitação intensa. Um desses setores é a Rua Mossoró, no cruzamento com a Av. Afonso Pena, onde há aglomerados de empreendimentos comerciais (lojas de roupas, calçados e óticas), clínicas médicas e hospitais (Figura 9A). De modo semelhante, nas cercanias do cruzamento da Rua Açú com a Av. Afonso Pena, farmácias, pontos comerciais, residências e igrejas são afetados com os alagamentos causados pelas precipitações intensas. A depressão *A* apresenta declives suaves, no entanto possui ampla área de influência com nove vias canalizando o fluxo superficial para esses 2 cruzamentos supracitados, o que favorece intensamente aos rápidos alagamentos nesses setores.

No setor crítico de alagamento da Rua Mipibu são os moradores locais os principais afetados, visto que a área é ocupada, na maior parte, por condomínios residenciais e casas, e nos períodos letivos os estudantes e funcionários de escola que está situada no ponto mais baixo da depressão *B* (Figura 9C). Este baixo topográfico apresenta declividades maiores que a depressão *A*, de modo a permitir alagamentos com profundidades de até 1,5 m, com pequena extensão do espelho d'água. A depressão *A*, por sua vez, ao ser alagada até a profundidade de 1,5 m teria espelho d'água com extensão maior quando comparada à depressão *B* e, conseqüentemente, dispõe de treze bocas de lobo para drenagem da água superficial, enquanto a depressão *B* possui apenas nove (Figura 9A). Todos estes fatores implicam em comportamentos diferentes das ocorrências de alagamento nas depressões *A* e *B*.

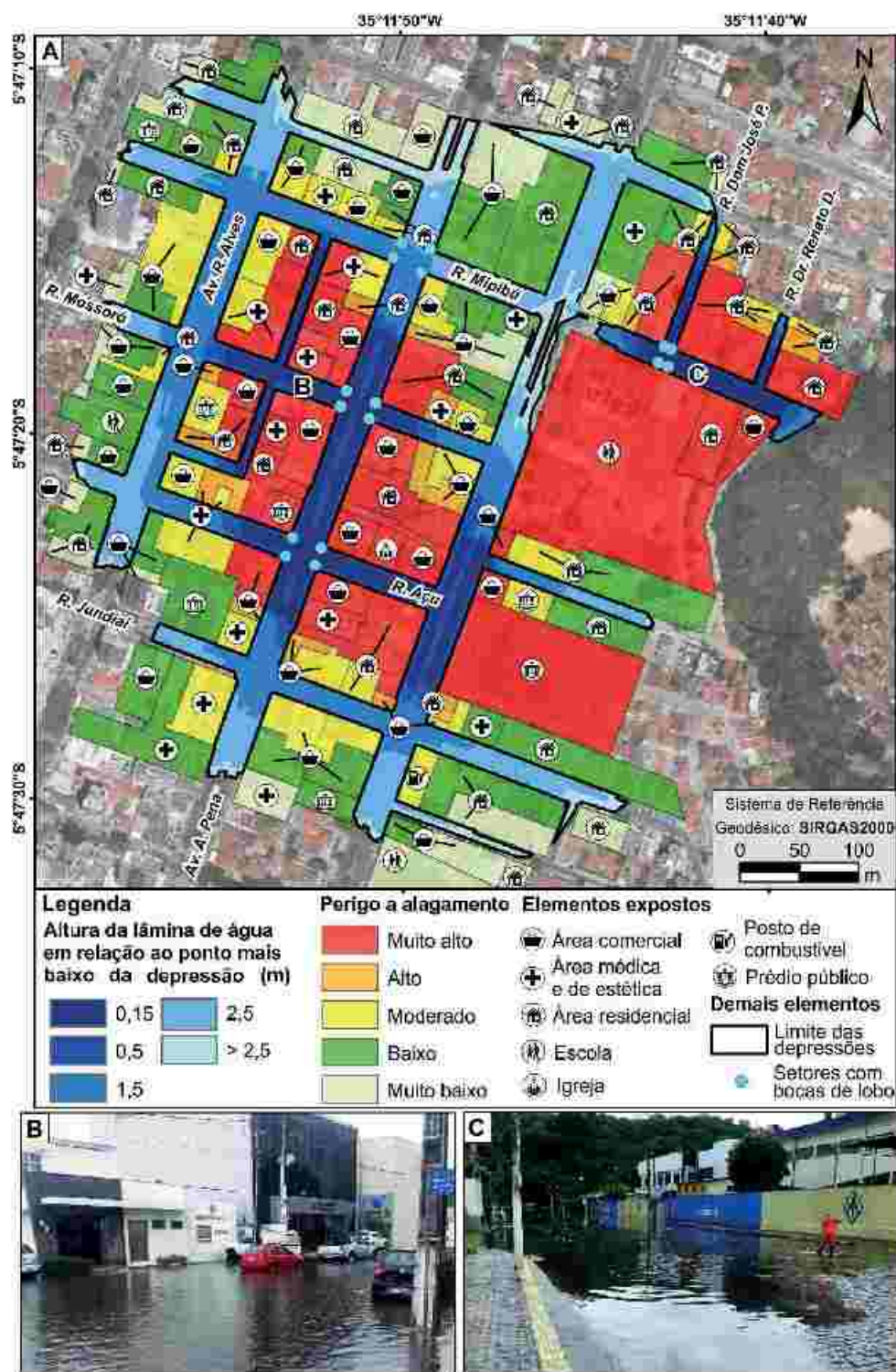


Figura 9 Detalhe sobre a ocupação urbana e mapeamento dos perigos a alagamento nas depressões A e B. A: Mapa de ocupação urbana e perigo a alagamento, em função das alturas das lâminas de água, as diferentes quantidades de bocas de lobo em ambas as depressões afetam diretamente o comportamento dos alagamentos, B: Alagamento na Rua Mossoró prejudicando clínica médica, hospital e áreas comerciais, C: Agente público de limpeza tentando desobstruir boca de lobo diante de alagamento em frente a escola e residências na Rua Mipiba

4.5 Relação entre Precipitação Horária e Cota de Alagamentos

A partir de dados coletados com metodologia baseada em levantamento estático com receptores GNSS para estabelecimento das cotas máximas de alagamentos, e de registros pluviométricos horários em diferentes eventos de precipitação, foram identificados e avaliados os padrões comportamentais de alagamentos nas depressões A e B.

A Regressão Linear realizada com os dados de precipitação (variável independente) e das cotas da borda do espelho d'água do alagamento (variável dependente) mostrou que na depressão A o aumento das cotas máximas de alagamento é linearmente proporcional à intensidade das chuvas ($R^2 = 0,754$; $p = 0,002$; $N = 9$), como indica a Figura 10, representando um modelo robusto. Logo, observa-se que o problema de alagamento na depressão A está intrinsecamente relacionado ao subdimensionamento do sistema de drenagem pluvial, diante de chuvas intensas e com tempo de duração inferior ou igual a uma hora.

Por sua vez a depressão B mostrou um modelo menos consistente de Regressão Linear, sobretudo, em virtude do valor p ter ultrapassado o nível de significância estabelecido em 5 % ($R^2 = 0,621$; $p = 0,113$; $N = 5$). Para o período temporal em estudo, só foi possível obter 5 fotografias históricas com marcadores de boa identificação *in loco* das cotas de alagamento.

Provavelmente, com a adoção de número maior de amostras (N), acredita-se que o modelo se tornaria estatisticamente significativo. Entretanto, o modelo apresentou ainda um moderado coeficiente de determinação (R^2), fator este que aponta que as causas de alagamento nessa região sejam não somente o subdimensionamento do sistema de drenagem pluvial, mas que estejam também relacionadas às obstruções frequentes por dejetos sólidos em alguns momentos de chuvas intensas. As obstruções no sistema de drenagem pluvial indicam negligência na manutenção periódica realizada pelos órgãos responsáveis, permitindo a permanência excessiva e/ou o acúmulo de lixo nas bocas de lobo. Os acúmulos de diferentes quantidades de lixo no sistema de dre-

nagem pluvial, em vários episódios de alagamentos registrados, certamente causaram variações na eficiência de todo o sistema de drenagem e, consequentemente, impediram elevadas correlações lineares entre as variáveis aplicadas.

Ademais, o modelo das diferentes extensões de alagamento (Figura 9A) mostra que a depressão B em todas as diferentes alturas de lâminas de água possui quantidade sempre inferior de bocas de lobo disponíveis em relação à depressão A, embora sejam comparadas colunas de água com alturas similares.

Dessa maneira, há maior tendência de obstrução no sistema de drenagem pluvial na depressão B e, consequentemente, maior interferência no conjunto do sistema de drenagem desse setor. Portanto, levando em consideração as causas para alagamentos urbanos com base na magnitude dos Coeficientes de Determinação, a depressão A se caracteriza como Situação do Tipo I e a depressão B como Situação do Tipo II (Figura 10), conforme a proposição metodológica. A Situação do Tipo III, relacionado apenas a falta de manutenção periódica do sistema de drenagem e das bocas de lobo, não foi diretamente identificado nesse setor da área de estudo.

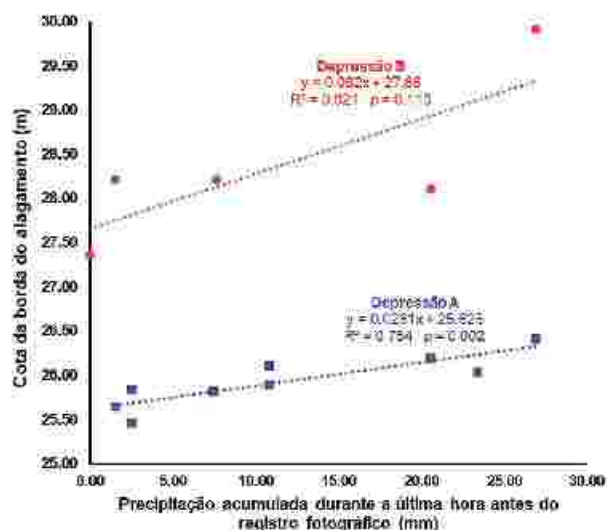


Figura 10 Modelos de Regressão Linear entre a Precipitação Acumulada e Cota de Alagamento, para as depressões A e B. Na depressão A verifica-se uma forte relação linear entre o volume de precipitação e a variação da cota do espelho d'água (Situação do Tipo I), enquanto na regressão aplicada à depressão B mostra relação linear moderada entre os dois parâmetros aplicados (Situação do Tipo II), seguido valores de R^2 e p

5 Conclusões

As etapas de Geoprocessamento, análise estatística e levantamentos *in loco*, sequencialmente aplicadas neste estudo, consistiram em procedimentos metodológicos eficazes para identificar e avaliar as situações de alagamentos em meio urbano, em escala de detalhe, conforme o nível de acurácia e precisão das informações nos modelos altimétricos obtidos com levantamento GNSS estático. Esta abordagem metodológica se mostrou de alto desempenho, pois requer pouco tempo para execução e permite realizar análises robustas a partir da integração de dados altimétricos com acurácia e precisão, dados de precipitação horária, características do fluxo superficial, informações de uso e ocupação de lotes urbanos, além de registros de episódios de alagamento provenientes de várias fontes.

A partir de dados disponíveis em órgãos públicos municipais e levantamentos de campo, a estratégia metodológica aplicada, baseada em técnicas de Geoprocessamento, possibilitou a construção do MDS do Bairro do Tirol para identificação de ruas e avenidas favoráveis ao acúmulo de água, em caso de necessidade de escoamento superficial no sistema de drenagem pluvial. Assim, 9 depressões foram identificadas e correlacionadas ao contexto geomorfológico de terrenos interdunares planos e baixos e de vales fluviais, os últimos relacionados aos afluentes, hoje em ambiente urbano, do Rio Potengi. Dentre os baixos topográficos identificados destacaram-se as depressões *A* e *B* por apresentarem maior número de episódios de alagamentos registrados no período entre 2013 a 2018, além de despontarem com características como a elevada impermeabilização do solo e a grande concentração de águas pluviais - 12 e 4 exutórios, nas depressões *A* e *B*, respectivamente - fatos que ratificaram os registros históricos.

O modelo de fluxo superficial das águas pluviais mostrou forte correlação com as infraestruturas instaladas no meio urbano atual, uma vez que as linhas de fluxo possuem padrões de confluência ortogonais entre si, semelhante ao traçado do sistema de arruamentos do Bairro do Tirol também predominantemente ortogonal. Este fato elucidou a importância de se considerar no planejamento urbano

o arranjo dos elementos urbanos em modelagens de fluxos superficiais e igualmente comprova que os MDE, vinculados ao SGB conforme a metodologia empregada, proporcionam resultados confiáveis para a gestão urbana.

Tais abordagens possuem acurácia adequada à escala de trabalho proposta e aplicabilidade na elaboração de projetos de sistemas de drenagem pluvial urbana, visto que fornecem parâmetros relevantes para definição de alta eficiência para essas estruturas de engenharia, como na identificação de trechos de vias públicas propensas a maior concentração de água, o percurso do fluxo superficial e a extensão de possíveis alagamentos, em função do alcance e altura da lâmina d'água, sob as condições de precipitações intensas.

As áreas de maior perigo a alagamentos, identificadas por meio de análises na escala de detalhe nas depressões *A* e *B*, correspondem a setores do Bairro do Tirol com inúmeros empreendimentos comerciais, hospitais, clínicas médicas e áreas residenciais. Os resultados deste estudo podem corroborar no suporte à implementação de planos de gestão de risco a alagamentos e também para estudos futuros de avaliação do mercado imobiliário sobre a vulnerabilidade dos lotes urbanos aos alagamentos, uma vez que os alagamentos afetam diretamente áreas de importância econômica em Natal/RN, além da exposição de vidas humanas ao risco e à perda financeira.

O modelo de ajustamento, oriundo da Regressão Linear entre a precipitação horária e a cota de alagamento, revelou que os alagamentos ocorrentes na depressão *A* estão, sobretudo, relacionados ao subdimensionamento do sistema de drenagem, enquanto a depressão *B*, além do subdimensionamento, também está submetido aos problemas de entupimento e/ou obstruções das bocas de lobo instaladas no setor de abrangência da depressão.

Como a análise do comportamento dos alagamentos requer dados de cotas máximas do espelho d'água e seus respectivos registros pluviométricos horários torna, portanto, esta abordagem metodológica aplicável para outras áreas urbanas que detenham tipos semelhantes de informações. Além disso, se a quantidade desses dados representa uma série

histórica, a mesma abordagem poderá ser aplicada para elaboração de prognósticos de alagamentos em função de previsões de eventos pluviométricos servindo, assim, para a previsão (variáveis Precipitação x Cota de Alagamento) e, conseqüentemente, de grande auxílio em futuras ações emergenciais e de Defesa Civil. Entretanto, vale lembrar que a análise proposta pressupõe total impermeabilidade para as depressões na área de estudo, situação comum em grandes áreas urbanas.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) por concessão de bolsa de pesquisa ao primeiro autor, proveniente da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Além desses, reconhecem o Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO), ao Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica (GNOMO) e as Secretarias Municipais de Meio Ambiente (SEMURB) e de Obras Públicas e Infraestrutura (SEMOPI) do Município de Natal como apoiadores da pesquisa e por fornecerem equipamentos e dados.

7 Referências

Aguar, L.S., Amaro, V.E., Araújo, P.V.N. & Santos, A.L.S. 2019. Geotecnologias de baixo custo aplicadas à avaliação de risco por inundação em áreas urbanas costeiras em cenários de Mudanças climáticas. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 42(1): 267-290

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.D.M. & Sparovek, G. 2013. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6): 711-728

Alves, P.B.R., Melo Filho, H., Tsuyuguchi, B.B., Rufino, I.A.A. & Festosa, P.H.C. 2018. Mapping of flood susceptibility in Campina Grande County - PB: A spatial multicriteria approach. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 24(1): 28-43

Araújo, F.F. 2015. Empresários urbanos e produção do espaço residencial condomínios-clubes na Zona Sul de Natal (RN). *URBE - Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 7(1): 106-121

Araújo, P.V.N., Amaro, V.E., Alcoforado, A.V.C. & Santos, A.L.S. 2018. Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açu, Rio Grande do Norte, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 41(1): 351-364

Araújo, P.V.N., Amaro, V.E., Silva, R.M. & Lopes, A.B. 2019. Delineation of Flood Areas Based on Calibrated DEM and Geoprocessing: Case Study on Uruguay River, Itaquí City, Southern Brazil. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 19(1): 237-250

Barros, M.T.L. & Conde, F. 2017. Urban Flood Warning System Social Benefits. *World Environmental and Water Resources Congress*, California, 2017. Selected Papers from the Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress, Sacramento, California, p. 642-653

Beskow, S., Nunes, G.S., Mello, C.R., Caldera, T.L., Norton, L.D., Steinmetz, A.A., Vargas, M.M. & Ávila, L.F. 2018. Geomorphology-based unit hydrograph models for flood risk management: Case study in Brazilian watersheds with contrasting physiographic characteristics. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2): 1873-1890

Boonya-Aroonnet, S., Maksimovic, Č., Prodanovic, D. & Djordjevic, S. 2007. Urban Pluvial Flooding: Development of GIS Based Pathway Model for Surface Flooding and Interface with Surcharged Sewer Model. *INOVATECH CONFERENCE OF SUSTAINABLE TECHNIQUES AND STRATEGIES IN URBAN WATER MANAGEMENT*, 6, França, 2007. Workshop 1, Lyon, França, p. 481-488

BRASIL. CPRM Serviço Geológico do Brasil. 2012. Carta Geológica. Folha Natal SB-25-V-C-V. 1 mapa: 92 cm x 73 cm Escala 1:100.000

BRASIL. 2018. Instituto Nacional de Meteorologia - Dados Históricos Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdnep/bdmap>>. Acesso em: 12 jan 2018

BRASIL. 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Panorama Brasil - Rio Grande do Norte - Natal. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/natal/panorama>>. Acesso em: 05 fev. 2019

Campos, S., Felipe, A.C., Campos, M. & Rocha, A.M. 2015. Geoprocessamento aplicado na caracterização morfológica da Microbacia do Ribeirão Descalvado - Botucatu, SP. *Revista Irriga*, 1(1): 52-65

Cook, A. & Merwade, V. 2009. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2): 131-142

Carreira, E.F.G., Ribeiro, G.P. & Baptista, A.C. 2015. Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco à inundação. *Revista Brasileira de Cartografia*, 67(6): 1183-1202

Costa, J.D. 2015. *Evolução espaço-temporal da ocupação urbana sobre áreas naturais no município de Natal-RN*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação de Mestrado, 95p

Demir, V. & Kisi, O. 2016. Flood hazard mapping by using geographic information system and hydraulic model: Mert River, Samsun, Turkey. *Advances in Meteorology*, 2016: 1-9

Dindaroglu, T., Reis, M., Akay, A.E. & Tonguc, F. 2015. Hydroecological approach for determining the width of riparian buffer zones for providing soil conservation and

- water quality. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(1): 275-284
- ESRI 2011. *Arc Hydro Tools – Tutorial: Version 2.0*. New York, ESRI, 184p
- Franci, F, Bitelli, G, Mandanici, E, Hadjimitsis, D & Agapiou, A. 2016. Satellite remote sensing and GIS-based multi-criteria analysis for flood hazard mapping. *Natural Hazards*, 83(1): 31-51
- Guerra, M. & Abebe, Y. 2019. Pairwise Elicitation for a Decision Support Framework to Develop a Flood Risk Response Plan. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 5(1): 1-7
- Medeiros, THL. 2001. *Evolução Geomorfológica, (Des)Caracterização e formas de uso das lagoas da Cidade do Natal-RN*. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação de Mestrado, 100p
- Natal 2009. *Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade de Natal: Manual de Drenagem*. Natal, SEMOP, 254p
- Natal 2014. *Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Natal/RN: Situação dos serviços de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas*. Natal, Start, 142p
- Natal 2015. *Anuário Natal 2015*. Natal, SEMURB, 246p
- Natal 2016. *Anuário Natal 2016*. Natal, SEMURB, 292p
- Kaspersen, P.S., Ravn, N.H., Arnbjerg-Nielsen, K., Madsen, H. & Drews, M. 2017. Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8): 4131-4147
- Kourgiailas, N.N. & Karatzas, G.P. 2017. A national scale flood hazard mapping methodology: The case of Greece – Protection and adaptation policy approaches. *Science of the Total Environment*, 601-602: 441-452
- Lee, S., Nakagawa, H., Kawaike, K. & Zhang, H. 2016. Urban inundation simulation considering road network and building configurations. *Flood Risk Management*, 9: 224-233
- Marafuz, I., Rodrigues, C. & Gomes, A. 2015. Analysis and assessment of urban flash floods on areas with limited available altimetry data (Arouca, NW Portugal): a methodological approach. *Environmental Earth Science*, 73(6): 2937-2949
- Oliveira, PE. & Ramos, C. 2002. Inundações na cidade de Lisboa durante o século XX e seus factores agravantes. *Environista*, 37(74): 33-54
- Omran, A., Dietrich, S., Abouelmagd, A. & Michael, M. 2016. New ArcGIS tools developed for stream network extrac-
 tion and basin delineations using Python and java script. *Computers and Geosciences*, 94: 140-149
- Pilla, F., Gharbis, S.S. & Lyons, R. 2019. How do households perceive flood-risk? The impact of flooding on the cost of accommodation in Dublin, Ireland. *Science of The Total Environment*, 650: 144-154
- Recanatani, F., Petroselli, A., Nicolina, M. & Leone, A. 2017. Assessment of stormwater runoff management practices and BMPs under soil sealing: A study case in a peri-urban watershed of the metropolitan area of Rome (Italy). *Journal of Environmental Management*, 201: 6-18
- Ribeiro, M.F., Costa, V.C., Magalhães Neto, N. & Freitas, M.A.V. 2013. An analysis of monthly rainfall and its relationship to the occurrence of mass movement and flooding in Pedra Branca Massif in the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Geographical Research*, 51(4): 398-411
- Santos Jr, O.F., Severo, R. N.F. & Freitas, N.O. 2016. Movimentos de massas em encostas na cidade de Natal/RN. In LACERDA, W. (ed.) *Doitar no saber e na arte de viver*. Editora Coppe UFRJ, p. 468-478
- Santos Jr, V.J. & Santos, C.O. 2014. Aplicação de indicadores de fragilidade do sistema de natureza ambiental na bacia hidrográfica do rio Cintra-MG. *Revista Monografias Ambientais - REMOA*, 13(5): 3872-3880
- Santos, K.A., Rufino, I.A.A. & Barros Filho, M.N.M. 2017. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande - PB. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(5): 943-952
- Seber, G. A. F. 1977. *Linear Regression Analysis*. New York, John Wiley & Sons, 465p
- Silva, C.V.F., Scharding, A., Garcia, J.I.B. & Oliveira, CPM. 2018. Climate change impacts and flood control measures for highly developed urban watersheds. *Water*, 10(7): 1-18
- Smith, A., Martin, D. & Cockings, S. 2016. Spatio-Temporal Population Modelling for Enhanced Assessment of Urban Exposure to Flood Risk. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 9(2): 145-163
- Souza, C. 2017. Chuvas deste sábado alagam ruas de um dos bairros mais chiques de Natal - Fotojornalismo Disponível em <<http://canundesouza.com/chuvas-alagam-ruas-de-um-dos-bairros-mais-chiques-de-natal>>. Acesso em 15 dez. 2018.
- Targa, M.S., Getulio, T.B., Diniz, H.N., Dias, N.W. & Matos, F.C. 2012. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, 7(2): 120-142