



**Proposta Metodológica de Alta Acurácia para Delimitação de Áreas de Inundação Urbana:  
Um Estudo de Caso em Itaqui-RS, Brasil**

High-accuracy Methodological Proposal for Delimitation of Urban Flooding Areas: A Case Study in  
the Itaqui-RS, Brazil

Robert Martins da Silva<sup>1,2</sup>; Virnei Silva Moreira<sup>2</sup>; Alexandre Bernardino Lopes<sup>2</sup> ;  
Paulo Vítor do Nascimento Araújo<sup>3</sup> & Alessandra Ferreira Cortes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pampa, Núcleo de Estudos em Cartografia e Agrimensura, Rua Luiz Joaquim de Sá Britto s/n,  
97650-000, Itaqui, RS, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Av. Beira-mar s/n,  
83255-976, Pontal do Paraná, PR, Brasil

<sup>3</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Campus Macau, Rua das Margaridas 300,  
Conjunto COHAB, 59.500-000, Macau, RN, Brasil

E-mails: robertsilva@unipampa.edu.br; virneimoreira@gmail.com; ablopesrp@yahoo.com.br;  
paulo.araujo@ifrn.edu.br; alessandra\_fnr@hotmail.com

DOI: [http://doi.org/10.11137/2020\\_2\\_263\\_276](http://doi.org/10.11137/2020_2_263_276); Recebido: 01/02/2020 Aceito: 15/05/2020

## Resumo

O conhecimento do relevo terrestre sempre foi de grande importância para a humanidade, e o modo de sua representação é objeto de constante e múltiplos estudos. O objetivo desse trabalho foi desenvolver uma proposta metodológica para elaboração de um Modelo Digital de Elevação, integrando dados geodésicos de alta acurácia e dados hidrológicos para monitoramento das áreas afetadas pelas recorrentes inundações do Rio Uruguai na cidade de Itaqui, Rio Grande do Sul, Brasil. Para tanto foi aplicada uma metodologia baseada na associação de dados provenientes de diferentes fontes, e que juntos retornam um produto final preciso e confiável para mapeamento de inundações urbanas. Para início do trabalho foi realizado a vinculação da série temporal da cota do Rio Uruguai à rede altimétrica nacional, por meio de nivelamento geométrico entre uma Referência de Nível (RN) e a régua linimétrica do rio. Na segunda parte do trabalho foi realizado um levantamento de pontos altimétricos, utilizando o sistema de navegação global por satélites - do inglês *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Além disso, realizou-se a conversão das altitudes geométricas em ortométricas e sua correção com o uso do modelo geoidal oficial brasileiro. A terceira etapa do trabalho consistiu na geração de modelos digitais de elevação e uma análise estatística para validação e classificação dos modelos. Conseguiu-se elaborar um mapa de zoneamento de risco e simular as áreas afetadas pelas inundações históricas ocorridas nos anos de 1983 e 2017, sendo essas simulações validadas através do comparativo entre a resposta do modelo e os registros fotográficos das épocas em questão. O estudo demonstra uma ferramenta para gerenciamento das áreas suscetíveis a inundações adequadas a realidade e a possibilidade de investimentos do município, podendo aplicá-la de forma preventiva no intuito de reduzir as perdas e gastos resultantes dos eventos extremos ocorridos na cidade.

**Palavras-chave:** Modelo Digital de Elevação; padrão de exatidão cartográfica; monitoramento

## Abstract

The knowledge of terrestrial relief has always been of great importance for humanity, and the way of its representation is the object of constant and several studies. The objective of this work was to use geodetic methods for elaborating a Digital Elevation Model (DEM), integrated with hydrological data for monitoring areas affected by the recurrent flooding of the Uruguay River in the city of Itaqui, in the state of Rio Grande do Sul - Brazil. Therefore, a methodology based on data association from different sources is applied to achieve an accurate and reliable final product. First, a connection of the river levels to the national altimetric network was carried out through the geometric leveling between a level reference and the linear river rules. Secondly, a survey of altimetric points was carried out, using the *Global Navigation Satellite System* (GNSS) and the conversion of geometric to orthometric altitudes was carried out, corrected with a geoid model. The final stage of the work consisted in the generation of digital models and statistical analysis to validate and classify them. As a result, it was possible to draw up a risk zoning map and simulate the areas affected by flooding during extreme events that occurred between 1983 and 2017, these simulations were validated by comparing the model results and photographic records. The present study shows that it is possible to obtain a proper and economical tool to manage the local areas susceptible to flooding, allowing to apply preventive measures to reduce losses caused by extreme events that occur in the cities.

**Keywords:** Digital elevation model; cartographic accuracy standard; monitoring

## 1 Introdução

As inundações são eventos que frequentemente vem ocorrendo e resultando diversos prejuízos, seja pelas vidas perdidas, infraestruturas destruídas, atividades econômicas afetadas ou pelas propriedades perdidas (Taubenböck *et al.*, 2011).

O aumento populacional e as ocupações indevidas ocasionam maior urbanização sem uma infraestrutura adequada, uma impermeabilização do solo e um maior pico de cheia e escoamento que resulta em problemas que tem impacto direto sobre a sociedade, e dentre eles, as inundações dentro da área urbana (Tingsanchali, 2012).

As várzeas e as terras baixas são áreas com altos níveis de risco de inundação devido a suas baixas altitudes e sua proximidade com rios, e a ocupação dessas áreas as torna ainda mais propensas as inundações (Elshorbagy *et al.*, 2017). Essas características fazem parte das feições da cidade de Itaqui-RS, assim como várias outras cidades que povoaram a margem do Rio Uruguai. O município de Itaqui-RS, atualmente vivencia a mesma realidade da maioria dos municípios brasileiros de pequeno porte, a falta de recursos e de profissionais especializados para atuarem no planejamento e no desenvolvimento urbano ordenado. Tal fato reflete na carência de estudos e informações que auxiliam a gestão urbana e que visam minimizar os impactos negativos das inundações na sociedade.

Os mapas de risco são importantes ferramentas utilizadas para o planejamento do uso e ocupação do solo nas regiões que são propensas as inundações, e quando desenvolvido com precisão permite observar a feição que representa o contorno da inundação, não só em um único evento como também em eventos passados (Marco, 1994). Sendo assim torna-se base para qualquer medida de controle de inundação.

Na maioria dos trabalhos desenvolvidos no Brasil para realizar os estudos acerca das inundações, não se determinou as altitudes de inundação referenciadas ao sistema de referência nacional e nem se avaliou a qualidade do produto cartográfico resultante da pesquisa, dentro das normas reguladoras da qualidade de produtos cartográficos nacionais, podendo citar os trabalhos de (Da Silva & Afonso, 2007; Saueressig, 2013; Borges *et al.*, 2015; Prina, 2015; Reis, 2015;), por outro lado Araújo *et al.* (2019) realizaram a calibração de um Modelo Digital de Elevação

(MDE) gerado a partir do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) utilizando pontos de controle de terreno (GCP) vinculados ao sistema de referência e obtendo resultados satisfatórios. Já Aguiar *et al.* (2019), utilizaram Aeronave Remotamente Pilotada (RPA - *Remotely Piloted Aircraft*) e pontos de controle de terreno para construção de um MDE em estudo a risco de inundação costeira. E por fim, Lima *et al.* (2019), também utilizando pontos de controle de terreno, calibraram um MDE de um bairro urbano da Cidade de Natal-RN para identificação e avaliação de zonas de alagamento.

Entretanto, apesar dos estudos de casos com eficácia comprovada na literatura, é importante elaborar e aperfeiçoar metodologias para desenvolvimento de Modelos Digitais de elevação (MDE's) que possam ser aplicados localmente para inundações fluviais, como o que acontece na cidade de Itaqui-RS.

Nesse contexto, este trabalho buscou desenvolver uma proposta metodológica para criação de um MDE próprio com alta acurácia a ser aplicado na delimitação de áreas inundáveis na cidade de Itaqui-RS, porção do Rio Uruguai, Brasil.

## 2 Área de estudo

O local para desenvolvimento do presente estudo se encontra na cidade de Itaqui situada na região da fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul e possui o arroio Cambaí, Olaria e o rio Uruguai como principais corpos d'água. Possui uma área territorial de 3.406,606 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 39.049 habitantes segundo o censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2016 (IBGE, 2017). A cidade ainda possui médias anuais de temperatura e pluviosidade de 20,3° e 1438 mm respectivamente, sendo o mês de abril o período com maior valor de precipitação (Climate-Data, 2017). A cidade de Itaqui teve seu povoamento iniciado nas margens do rio Uruguai e atualmente essa porção é ocupada por aqueles que dependem do rio para retirar o seu sustento e também os de classe econômica mais baixa. Esses moradores são frequentemente deslocados para regiões mais altas de forma a se afastarem das constantes inundações que ocorrem na região.

A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) desenvolve um trabalho de

reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massas e enchentes, e no ano de 2013 avaliou que na cidade de Itaqui haviam 800 residências em alto local de risco totalizando 3.200 pessoas vivendo nessas áreas (CPRM, 2018).

### 3 Material e métodos

O trabalho foi desenvolvido por meio da associação dos dados provenientes de levantamentos geodésicos, modelos geoidais, dados da Agência Nacional das Águas (ANA) e da CPRM, em uma área de constante inundação. Esses dados foram relacionadas com as cotas do nível do rio Uruguai para simulação de inundações históricas na área de estudo.

#### 3.1 Coleta de dados

Os dados utilizados foram obtidos do trabalho de Silva *et al.* (2017) que levantaram 836 pontos dentro da área de estudo e nele incluiu-se mais 40 pontos aplicando-se a mesma metodologia para levantamento e processamento dos dados empregada pelo autor que realizou um posicionamento relativo

estático pós-processado com linha base menor que 3 quilômetros, com uso de receptores do modelo Promark 500, cuja precisão nominal horizontal é de  $\pm 5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$  e a vertical é de  $\pm 10 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$ . Para vinculação das cotas do rio ao mesmo sistema de altitudes dos modelos, foi desenvolvida uma linha de nivelamento geométrico partindo da RN situada dentro da área de estudo até a régua linimétrica situada à margem do rio Uruguai. Dessa forma foi possível obter o valor da cota zero da régua linimétrica em altitude ortométrica.

Ao fim das campanhas de campo para essa pesquisa obteve-se um total de 876 pontos distribuídos pela região de estudo delimitado pelo contorno obtido através da limitação da área afetada pela maior altura do rio no ano de 2014. Ressalta-se ainda que o levantamento limitou-se a área urbanizada, pois o intuito do trabalho é ter conhecimento sobre a área da população afetada. A distribuição dos pontos e também dos pontos de controle para avaliação cartográfica são apresentados na Figura 1.

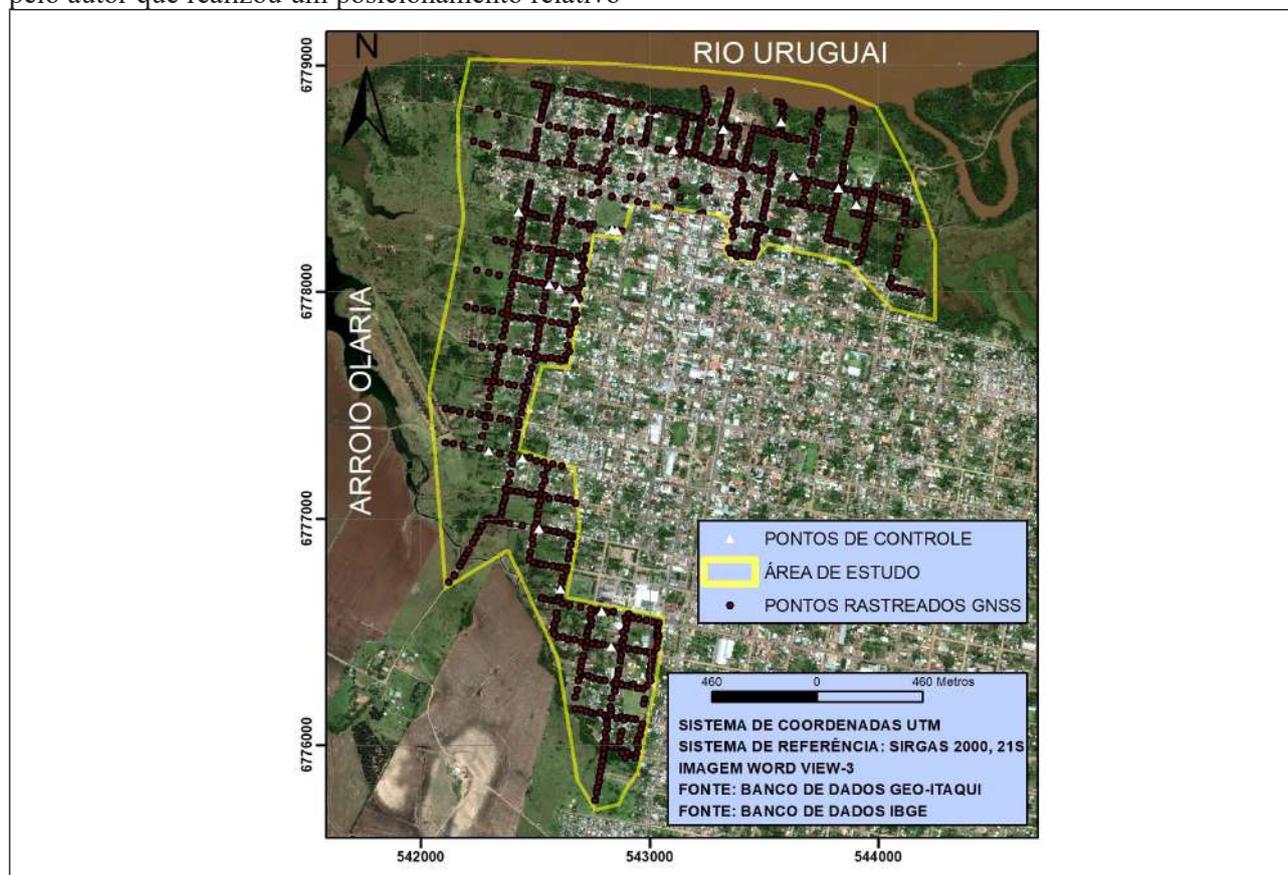


Figura 1 Distribuição de pontos levantados pelo GNSS dentro da área de estudo para geração do MDE e pontos de controle para análise do padrão de exatidão cartográfico.

### 3.1 Interpolação

MDE foi definido por Miller & Laflamme (1958) como sendo a representação estatística contínua do relevo. Sendo assim os métodos de coleta e obtenção de dados para essa representação estão sujeitos a erros e incertezas (Fisher & Tate, 2006).

Para obter o MDE que melhor represente a superfície em estudo foi necessário fazer uma análise de qual interpolador geraria uma superfície mais próxima da realidade. Nesse sentido foi necessário gerar diferentes MDE's aplicando cinco métodos geoestatísticos disponíveis no software ArcGIS 10<sup>®</sup> da ESRI. Os métodos utilizados foram *Topo to Raster*, *Krigagem*, *Inverse Distance Weighted (IDW)*, *Spline*, *Natural Neighbor*.

Para gerar os modelos de elevação optou-se pela utilização de todos os 876 pontos levantados em campo que possuem um erro altimétrico médio de  $0,006 \pm 0,0007$  m.

### 3.2 Controle de qualidade

A qualidade de dados espaciais pode ser avaliado quanto aos critérios de erro, precisão, consistência e confiabilidade e sua análise pode ser realizada através da estatística espacial (Buttenfield & Beard, 1991).

O posicionamento pelo GNSS atualmente permite grande precisão na determinação da posição de pontos sobre ou próximo a superfície terrestre, porém ainda existem erros que são intrínsecos aos equipamentos e métodos de levantamento utilizados (Santos, 2009). O autor explica que o processo de modelagem também apresenta fontes de erros como as aproximações feitas pelos interpoladores e as formas de amostragem e o que se procura determinar não é um modelo isento de erros e sim um modelo em que as fontes de erros sistemáticos são minimizadas.

O controle de qualidade posicional dos MDE's foi realizado utilizando pontos de controle determinados aleatoriamente dentro da área de estudo, e a análise estatística foi realizada sobre os

resíduos das altitudes dos pontos de controle  $Z_i^c$  e as altitudes extraídas dos modelos  $Z_i^m$ , dada pela Equação 1:

$$\Delta x_i = Z_i^c - Z_i^m \quad (1)$$

em amostras com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  pontos de controle.

Com as discrepâncias foram realizados testes de normalidade, tendência, precisão e cálculo dos valores do *Root Mean Square Error (RMSE)* para inferir sobre a acurácia do produto espacial. Dessa forma o valor do RMSE será nosso parâmetro de qualidade e este é obtido pela raiz quadrada da discrepância entre as amostras, dividido pelo número de amostras subtraído de uma unidade, como apresentado na Equação 2:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} \quad (2)$$

Onde  $d_i$  é a discrepância dos dados e  $n$  o número de amostras.

Dessa forma o MDE é avaliado dentro de uma classe inicial que deve atender aos seguintes requisitos: 90% dos pontos quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de exatidão Cartográfica (PEC) e o RMSE deve ser menor ou igual ao Erro Padrão (Tabela 1); caso alguma dessas duas pressuposições falhe o produto é desclassificado para a classe testada e em seguida o produto é disposto a novos testes para classes inferiores. Para mais detalhes sobre as análises estatísticas, ver Santos (2010).

Carta	PEC Altimétrico	Erro padrão
CLASSE A	1/2 da equidistância	1/3 da equidistância
CLASSE B	3/5 da equidistância	2/5 da equidistância
CLASSE C	3/4 da equidistância	1/2 da equidistância

Tabela 1 Critérios para o PEC altimétrico de acordo com Decreto N° 89.817 de 20 de Junho de 1984 (Brasil, 1984).

A determinação da equidistância das curvas de nível nesse caso foi fixada levando em consideração a pouca declividade da área de estudo.

Considerando assim, que uma equidistância vertical de 0,5 metro possibilite uma boa representação do relevo em questão.

### 3.3 Vinculação de cotas fluviais ao sistema

#### altimétrico do MDE

O MDE desenvolvido somente terá boa aplicabilidade quando associado as cotas de cheia do rio Uruguai. Portanto se torna necessário transformar as cotas do rio para altitudes que estejam no mesmo sistema de referência altimétrico dos MDE's gerados. As cotas do rio Uruguai são disponibilizadas e atualizadas de hora em hora pelo Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres do Rio Grande do Sul (SMAD-RS), esse sistema é um projeto de monitoramento e alerta de desastres para defesa civil e órgãos destinados a gestão de riscos quanto a eventos críticos de origem climática e meteorológica.

Para tal vínculo, Silva *et al.* (2017) realizaram um duplo nivelamento geométrico partindo de uma referência de nível (RN 1931A) situada dentro da área de estudo até as réguas linimétricas posicionadas verticalmente às margens do rio Uruguai, sendo possível assim, determinar o valor da cota zero ( $C_0$ ) da régua linimétrica através da Equação 3:

$$C_0 = C_{IBGE} + D_N - h_r + L_r \quad (3)$$

onde  $C_{IBGE}$  é a altitude ortométrica da RN 1931A,  $D_N$  é a diferença de nível entre a RN e a régua linimétrica (foi nivelado o topo da régua),  $h_r$  é a altura da régua e  $L_r$  é a leitura da régua no ato do nivelamento. Obtendo a altitude ortométrica de um valor de 42,6235 metros para a cota zero da régua linimétrica do rio.

### 3.4 Tendência de dados hidrológicos e delimitação de classes de risco a inundação

Os procedimentos de detecção de mudanças determinam se e em que momento uma determinada característica sofre mudanças em um certo período de tempo. Para análise de uma série de dados quanto a sua tendência, utiliza-se o teste de Mann-Kendall que

é um método robusto, não paramétrico e sequencial (Mann, 1945). Por possuir essas características, essa estatística tem sido amplamente utilizada para aplicações hidrológicas e climatológicas. A tendência linear nos índices de elevação da cota do rio foi calculada utilizando o teste de Mann-Kendall a um nível de significância de 95% (p-valor <0.05).

Através dos quartis obtidos foi possível a delimitação de 5 classes de risco sendo os valores limites compostos pelos valores máximos e mínimos das cotas do rio, os valores do 1º e 3º quartil e a mediana dos valores de máximas anuais.

Considerando as máximas anuais de cotas do rio (1942-2017) a estatística nos permite estimar valores máximos de ocorrência de cotas de inundação para um determinado período de recorrência que é definido como o intervalo de tempo em que um valor de referência será igualado ou superado (Smith, 1989). Alguns métodos requerem procedimentos matemáticos de alta complexidade, já outros são simples e retornam bons resultados, a exemplo temos o método de Califórnia (Equação 4) que permitem determinar com que frequência um determinado evento será superado ou igualado.

$$F = \frac{m}{n} \quad (4)$$

Onde F representa a frequência com que determinada cota de inundação ocorre,  $m$  o número da ordem da cota de inundação e  $n$  o número de observações.

## 4 Resultados

O processo de geração de modelos resultou em 5 MDE's gerados a partir dos cinco diferentes interpoladores e são apresentados na Figura 2.

É possível notar que de forma geral os interpoladores representam bem o aumento de altitude do relevo a medida que se distanciam do rio. Pode-se observar que os interpoladores IDW, Topo to Raster, Krigagem e *Natural Neighbor* geraram modelos de amplitude de altitudes muito semelhantes variando de mínimos próximos dos 47

metros e máximos de 60 metros. Já o interpolador *Spline* obteve valores mais discrepantes chegando a determinar locais de altitude mínima próxima de 23 metros e máxima próxima de 70 metros.

Analisando as classes de altitude e o comportamento do relevo segundo a representação

dos MDE's, observa-se que o MDE gerado pelo interpolador IDW é o que mais se diferencia dos demais por apresentar mais pontos de variações de altitude dentro de uma mesma classe, que seriam pequenas depressões no relevo.

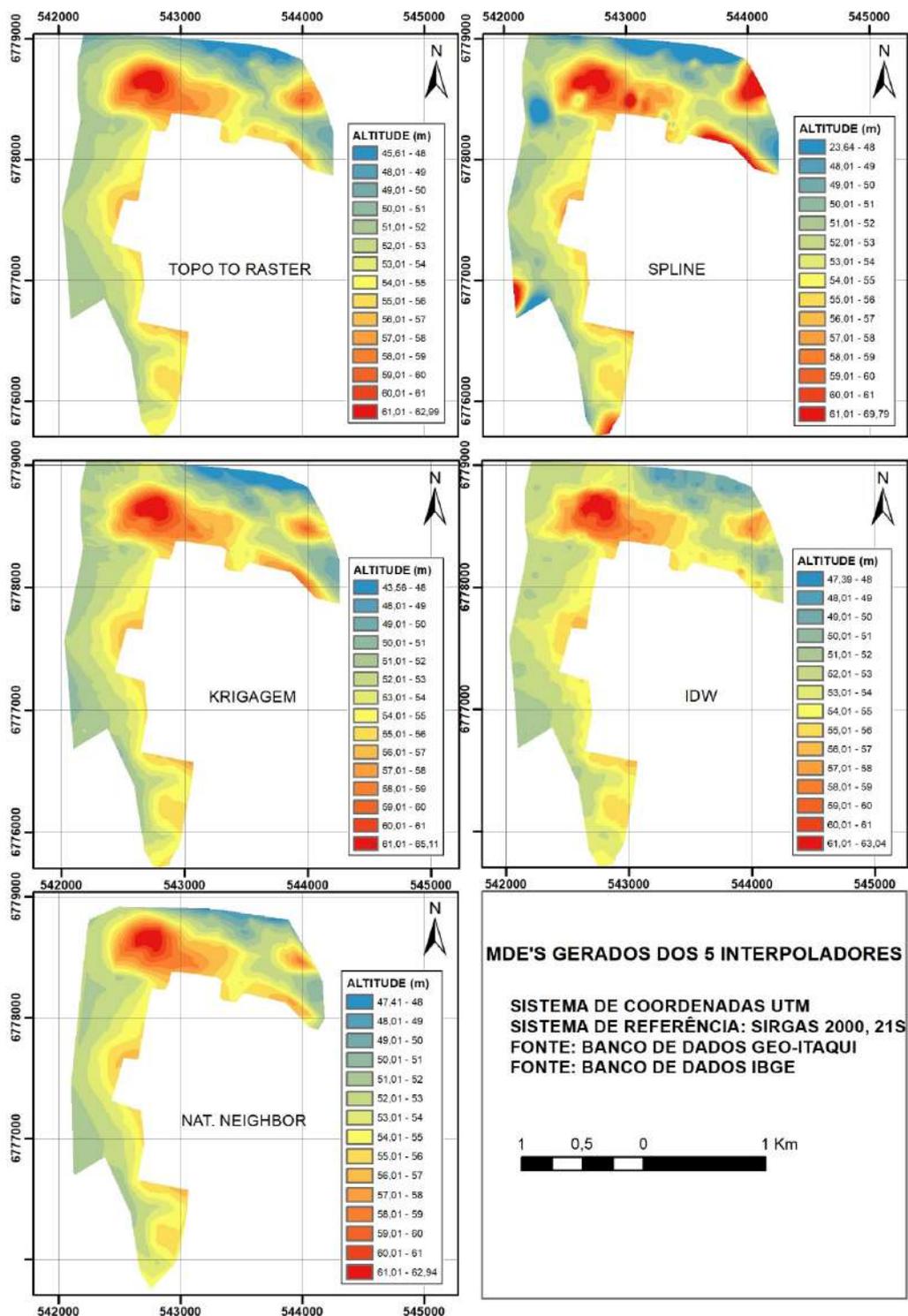


Figura 2 Modelos de elevação resultantes da aplicação de cinco diferentes interpoladores.

Comumente as pesquisas que objetivam, ou envolvem informações sobre a superfície terrestre se utilizam das informações provenientes de levantamentos aerofotogramétricos ou de sensores remotos. Isso se deve ao fato de essas fontes possibilitarem a aquisição de grande quantidade de informação para extensas áreas da superfície da Terra.

Sánchez & de Villarán (2012) que trabalharam na avaliação do MDE de uma extensa área do Peru gerado com dados obtidos do SRTM da NASA, verificaram que em até 56% dos casos avaliados em seu estudo obtiveram como melhor precisão para altitude valores variando entre 20 e 25 metros.

Já Mukherjee *et al.* (2013) que avaliaram o MDE gerado por *Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e o SRTM que são dados disponibilizados gratuitamente, chegaram em uma precisão melhor, obtendo para altitude discrepâncias de 12,62 e 17,76 metros para o ASTER e o SRTM respectivamente em relação ao terreno. A área tomada para esse estudo se localiza na Índia e englobou parte de Dehradun, a capital do estado de Uttarakhand.

Mouratidis *et al.* (2010) também avaliaram o MDE gerado através do SRTM para o norte da Grécia, na Macedônia Central, nas proximidades da cidade de Thessaloniki alcançando valor próximo ao que é estipulado, um erro absoluto na altitude de 16 metros.

Wang *et al.* (2012) que testaram dados ASTER e SRTM também se aproximaram dos valores de referência que são 20 e 16 metros para os dados ASTER e SRTM respectivamente em relação ao terreno.

Araújo *et al.* (2019) realizaram a calibração

de um MDE gerado através de dados SRTM e obteve uma melhora na precisão altimétrica de 68,15% utilizando pontos de controle distribuídos pela área de estudo na Cidade de Itaqui-RS no sul do Brasil.

Diferentemente dos autores citados, nesse trabalho optou-se por desenvolver o MDE utilizando-se da altimetria por GNSS que resulta em valores mais acurados quando seguido corretamente as normativas para posicionamento geodésico quando comparados com altimetria por satélites e aerolevantamentos, assim os estudos citados tomaram como base para avaliação dos MDE's gerados, pontos levantados por posicionamento GNSS. Outro motivo para se tomar a altimetria pelo GNSS como fonte de obtenção de dados, foi o relevo característico da região de estudo que se apresenta com baixa variação de altitudes, necessitando assim de uma fonte de dados com maior confiabilidade. Sendo assim as avaliações desse estudo tem foco especificamente as incertezas provenientes do processo de modelagem.

Algumas informações foram extraídas dos relatórios obtidos através do software GeoPec e compiladas em forma de tabelas para melhor visualização. Como apresentado na Tabela 2 todos os interpoladores geraram modelos acurados e dentro da Classe A para o teste de precisão (Decreto 89.817).

Observa-se também que avaliando o erro quadrático médio das amostras testadas, o interpolador IDW apresentou melhor resultado (RMSE = 0,0105) seguido do interpolador *Spline* (RMSE = 0,0287), e os interpoladores *Kriging*, *Natural Neighbor* e *Topo to Raster* apresentaram valores bem próximos entre eles, 0,0304, 0,0305 e 0,0322 respectivamente.

INTERPOLADOR	IDW	KRIGAGEM	TOPO TO RASTER	SPLINE	NATURAL NEIGHBOR
CLASSE	CLASSE A	CLASSE A	CLASSE A	CLASSE A	CLASSE A
ACURÁCIA	ACURADO	ACURADO	ACURADO	ACURADO	ACURADO
RMSE	0,0105	0,0304	0,0322	0,0287	0,0305

Tabela 2 Classificação e acurácia dos modelos obtidos através dos interpoladores.

É apresentado na Figura 3 o modelo gerado com o interpolador IDW com o apoio da imagem de

satélite Word View-3 da região de estudo. Observa-se que as regiões mais baixas são aquelas próximas ao

rio Uruguai e ao arroio Olaria, essas também são as primeiras áreas a serem afetadas com a subida do nível do rio. Nota-se também que as áreas de maior altitude são aquelas próximas a praça Marechal Deodoro e parte do bairro Cerrinho Dois Umbús, e também uma pequena área do bairro Ponte Seca que

com a subida do nível do rio chega a ficar ilhada em algumas ocasiões, a Figura 3 também permite observar a pouca variação de altitude do relevo na área de estudo que fica em torno de vinte metros. Tais observações permitem inferir que o modelo se aproxima da realidade do terreno da área estudada.

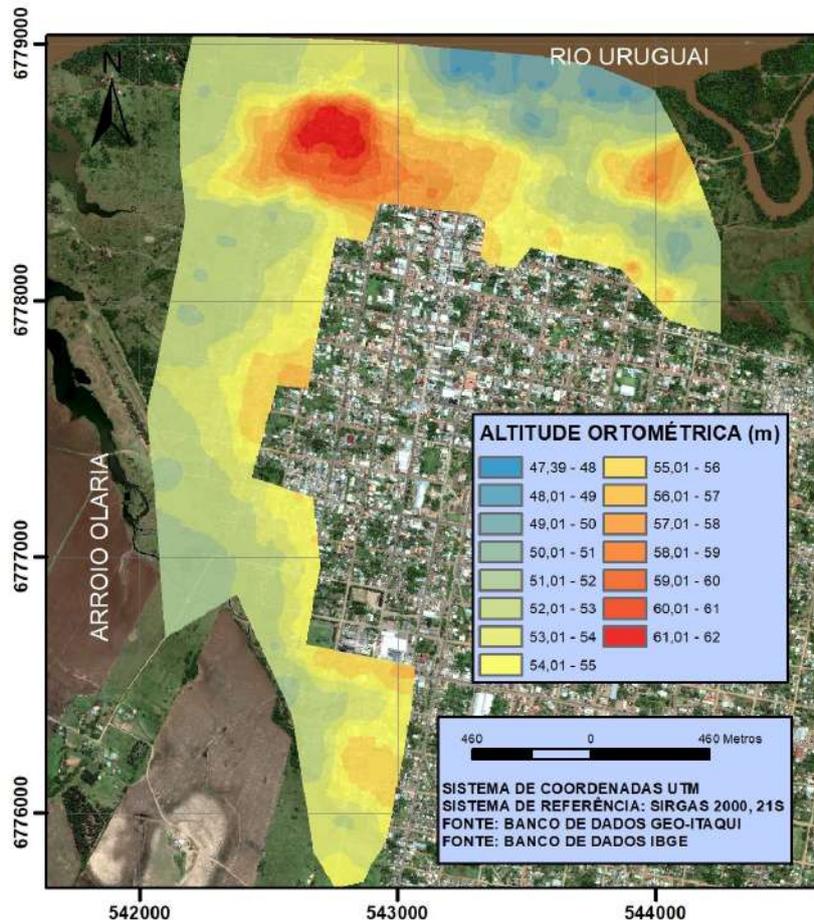


Figura 3 Modelo Digital de Elevação das áreas inundáveis obtido pelo interpolador IDW.

Buscando os dados de cotas máximas do nível do rio Uruguai desde 1942 até o ano de 2018 e vinculando-as ao mesmo sistema altimétrico do MDE, percebemos valores mínimos e máximos de

47,456 m e 57,236 m com uma média dos valores de 51,937 m e uma mediana de 51,631 m, além da determinação do primeiro e terceiro quartil (Figura 4).

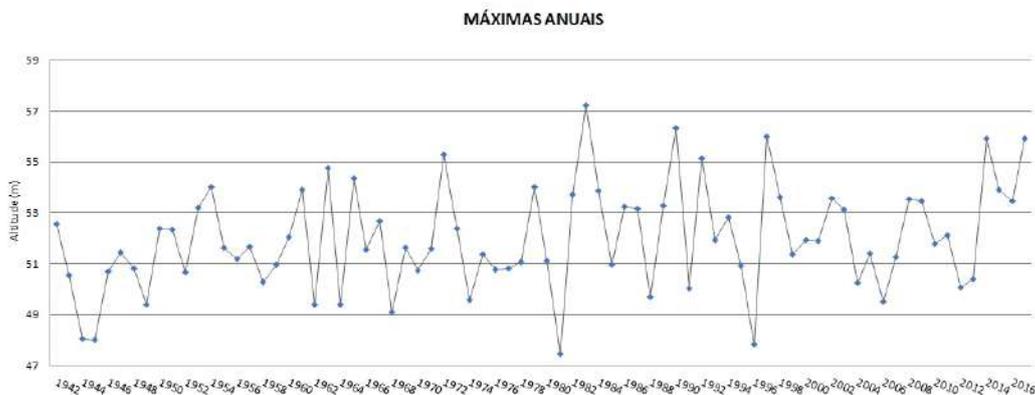


Figura 4 Cotas máximas anuais do rio Uruguai, período de 1942 até 2017.

Em consonância com o trabalho realizado por Araújo *et al.* (2019), aplicando-se o teste de Mann–Kendall à série histórica, obtém-se um valor  $p$  de significância que demonstra que há uma tendência crescente nos valores de máxima anual das cotas do rio Uruguai ( $p = 0,033$  e  $Z = 0,147$ ), o que consequentemente implicará em um maior número de moradias e famílias sendo afetadas no

decorrer do tempo e um maior valor a ser investido pelos gestores públicos para sanar os danos.

A metodologia permite apresentar um mapa de zoneamento das áreas afetadas (Figura 5) de acordo com o nível do rio, categorizando cada uma das zonas de acordo com a Tabela 3 que apresenta as zonas de risco estabelecidas para a área de estudo.

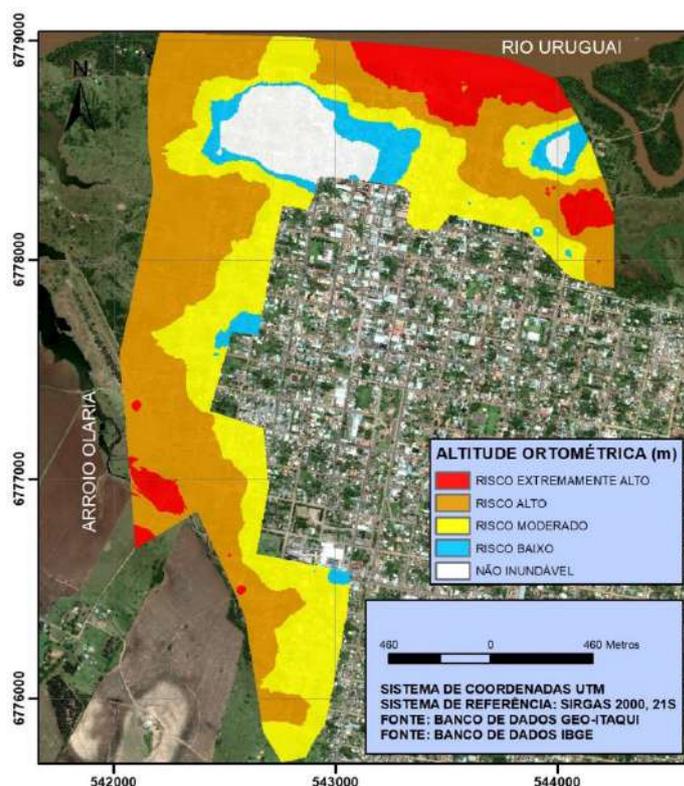


Figura 5 Delimitação das classes de risco segundo a probabilidade das áreas serem afetadas pelas inundações.

Quanto as estimativas para os períodos de recorrência de 2, 5, 20, 50 e 100 anos (Tabela 3), nota-se que nos anos de 2014 e 2017 houve inundações que correspondiam a um período de retorno de 20 anos, ou seja, a cota esperada para ocorrer dentro de um período de até 20 anos ocorreu logo no terceiro ano decorrido da inundação de mesmo valor de cota.

PERÍODO DE RETORNO	COTA ALTIMÉTRICA (m)
2	51,646
5	53,616
20	55,916
50	56,316
100	57,236

Tabela 3 Cotas de inundação correspondentes para os períodos de retorno de 2, 5, 20, 50 e 100 anos.

A área delimitada para a região de inundações recorrentes (Figura 6) se assemelha a área em que é delimitada como zonas especiais no Plano Diretor do Município de Itaqui (Figura 7), onde são definidas como área alagável (Itaqui-RS, 2007). Tal área apesar de ser definida como alagável, não possui nenhuma restrição quanto ao seu uso e ocupação especificados no plano diretor da cidade, possuem moradias e tem tido um aumento significativo da sua ocupação em direção do rio e ao arroio Olaria. Essa região é a mais afetada durante o período das chuvas e muitas vezes o nível do rio sobe tão rapidamente que impossibilita aos moradores a retirada de seus pertences, acarretando um prejuízo ainda maior a essa população e ao município como um todo.

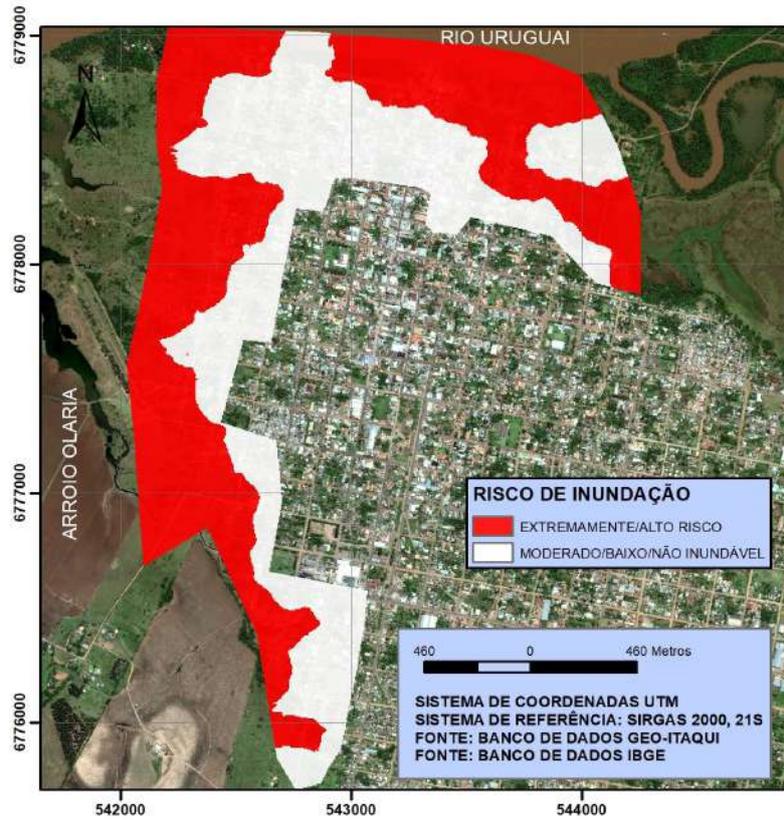


Figura 6 Limite da zona especial segundo o plano diretor de Itaqui-RS, equivalente a área que possui risco extremamente alto a inundação.



Figura 7 Delimitação da zona especial segundo o plano diretor de Itaqui-RS. Principal área afetada durante as inundações.

A inundação do ano de 1983 cuja cota máxima atingiu valor de aproximadamente 14,52 metros (57,1435 metros em altitude ortométrica) foi o maior evento ocorrido, e um detalhe relevante para o evento desse ano é o fato dessa inundação ter alcançado a praça Marechal Deodoro e a quadra onde se encontra o presídio municipal de Itaqui (Figura 8A). Pelo modelo gerado é possível observar que a simulação apresenta o nível da água nos pontos mencionados confirmando que o interpolador respondeu bem a representação do relevo e consequentemente a área inundada. Também são apresentados dois registros históricos demonstrando a quadra onde se localiza o Presídio Municipal e a Praça Marechal Deodoro

durante o período de pico da inundação de 1983.

De modo a verificar a aplicabilidade do MDE gerado, para a data de 15 de junho de 2017 fez-se diversos registros fotográficos de locais atingidos pela inundação para posteriormente compará-los com o que apresenta o MDE. De acordo com os dados disponibilizados pela ANA e pela CPRM o valor de cota atingida na data de 15 de junho de 2017 na cidade de Itaqui foi em torno de 12,40 metros (que corresponde a 55,0235 metros em altitude ortométrica) e a área afetada nessa data é apresentada na Figura 8B (ANA, 2006; SMAD, 2017).

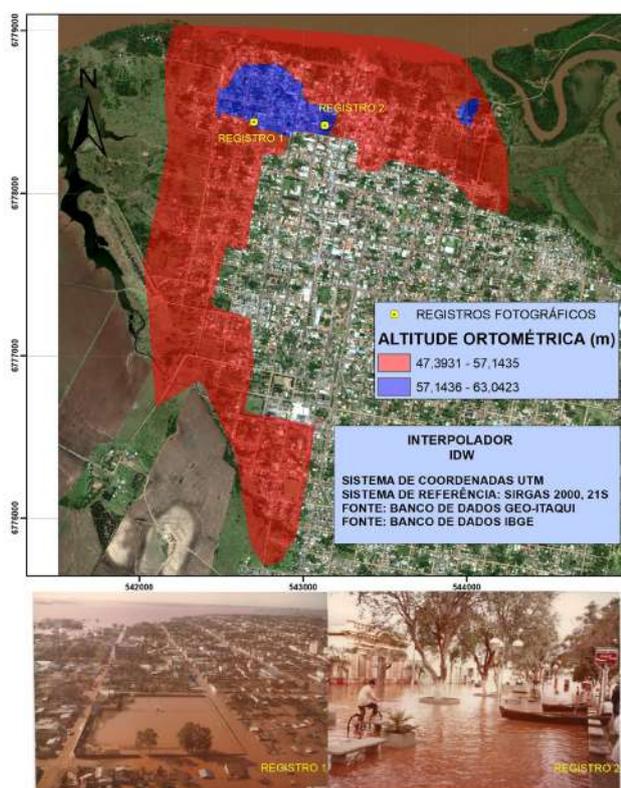


FIGURA 8A

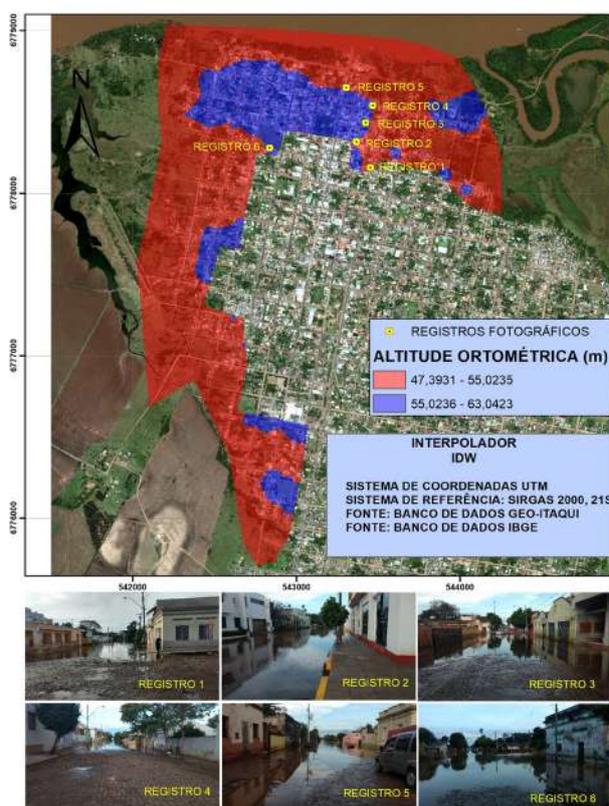


FIGURA 8B

Figura 8. Modelagens de inundações históricas: A) Inundação do ano de 1983, onde maior área urbana foi afetada pelas águas do rio Uruguai; B) inundação do ano 2017 afetando as ruas da região.

Para aplicação do modelo durante as épocas de cheias, é necessário utilizar a previsão de subida do nível do rio Uruguai realizada pela Defesa Civil, o que possibilitará a retirada dos moradores das áreas a serem atingidas. Assim aqueles que residem nas casas volantes terão a possibilidade de serem removidos para locais mais distantes do rio, e aqueles que residem nas casas de alvenaria poderão

retirar seus pertences minimizando suas perdas.

A metodologia empregada permite outras associações ao MDE resultante, assim como Nadal *et al.*, (2012) que em seu trabalho aplicaram o levantamento geodésico e realizou o vínculo das Referências de Nível (RRNN) as régua linimétrica no rio Paraguai para calibração de um modelo hidromorfológico para apontar a vida útil

das dragagens, para combate ao assoreamento, realizadas naquela localidade.

Metodologias baseadas em posicionamento GNSS vem sendo aplicadas de forma a se garantir a acurácia no desenvolvimento de modelos digitais de áreas costeiras e no monitoramento da morfodinâmica.

Rocha (2009) em sua metodologia proposta, utilizou do posicionamento GNSS para geração de um MDE de praia no mesmo nível do referencial de nível das marés e nele identifica a linha de costa, para tanto os referenciais verticais de maré e do GNSS foram correlacionados através de um artifício que necessitava do conhecimento das alturas de maré e do GNSS em um mesmo local. Nesse caso a metodologia resultou em um método adequado para localizar e monitorar linhas de costa, em um modelo que permite a visualização do comportamento da linha d'água, podendo simular o deslocamento do mar sobre o continente. Já Baptista *et al.*, (2008) obtiveram um modelo digital de uma região litorânea com boa precisão aplicando métodos geodésicos e utilizando os interpoladores *Krigagem* e *Triangular Irregular Network* (TIN) que apresentaram melhores repostas dentre os demais interpoladores testados.

Santos *et al.*, (2011) partiram da implantação de uma rede de referência geodésica para levantamentos geodésicos em um trecho do litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte - Brasil, posicionamento sobre RRNN e avaliação do modelo geoidal para utilização na altimetria por GNSS de precisão, desenvolveram uma metodologia para levantamento, representação, integração e análises de linhas de costas e MDE's obtidos por técnicas geodésicas de posicionamento para realizarem o monitoramento sazonal da área de estudo. Como resultado chegaram a um estudo integrado das relações espaciais e temporais das causas e efeitos da erosão costeira nas praias, analisaram a recuperação sedimentar das praias e acreção nos canais de maré e nos estuários.

## 5 Conclusões

O método testado para obtenção de dados GNSS se fez eficiente baseando-se no período de tempo para realização do trabalho e do número de equipamentos disponíveis, levou-se em consideração a declividade do terreno para se obter pontos representativos.

No entanto encontrou-se dificuldade para conhecimento do relevo no interior das quadras nas regiões mais urbanizadas, e nas regiões mais próximas ao rio onde existe maior volume de matas. Essa dificuldade prejudicou especialmente a representação das cotas mais baixas do rio, mesmo que nessa região haja um menor volume de pessoas residindo essas serão as primeiras a serem afetadas pela cheia do rio.

A união das informações provenientes do posicionamento GNSS, do modelo geoidal regional e da rede altimétrica para geração de um MDE, permitiu obter a altitude ortométrica dos pontos levantados na área de estudo. As altitudes aplicadas nesse trabalho eram aquelas referenciadas ao SGB até o ano de 2018 quando houve uma atualização da rede altimétrica através do reajustamento da rede com números geopotenciais (adição de dados gravimétricos terrestres) (IBGE, 2018). Optou-se por manter as altitudes ortométricas por coerência as datas do levantamento geodésico e ainda pelo fato do IBGE não ter disponibilizado um modelo regional de anomalias de altitude que relacionam as altitudes elipsoidais com as atuais altitudes (altitudes normais).

Os 5 modelos gerados e testados segundo o PEC, obtiveram classificação e acurácia dentro do exigido pela normativa nacional usando o software GeoPec. O software permite fazer uma análise mais rigorosa do produto cartográfico diminuindo a equidistância vertical do produto final a ser gerado. A norma também permite que outros métodos estatísticos sejam aplicados visto que esta não especifica os métodos a serem utilizados na análise, somente determina os parâmetros a serem avaliados.

Quando comparado com métodos que comumente são utilizados para de geração de MDE's a metodologia proposta se mostra mais eficiente resultando em dados mais acurados e mais confiáveis, entretanto torna-se moroso quando levado em consideração o tempo de execução do levantamento dos dados de campo.

Com uso de dados históricos e também com auxílio de trabalhos já desenvolvidos na região, foi possível a representação das áreas afetadas durante os eventos extremos e também das áreas que constantemente são afetadas no decorrer dos anos. O MDE da mesma forma permite o conhecimento do relevo na região de estudo e demonstra a importância

do mapeamento sistemático afim de detalhar as informações existentes ou a serem levantadas, com isso o trabalho mostra-se ser uma ferramenta útil para ser tomada como base de estudos para fins de planejamento, uso e ocupação do solo nas áreas afetadas, para estudos acerca das deficiências e de melhorias da rede de drenagem em vista dos problemas frequentes dessa região, para a previsão de cheias e retirada dos ribeirinhos.

## 6 Referências

- Aguiar, L.S.; Amaro, V.E., Araújo; P.V.N. & Santos, A.L.S. 2019. Low Cost Geotechnology Applied to Flood Risk Assessment in Coastal Urban Areas in Climate Change Scenarios. *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ)*, 42: 267-290.
- ANA. 2006. Agência Nacional de Águas. HIDROWEB-Sistemas de Informações Hidrológicas. Disponível em : <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2017.
- Araújo, P.V.N.; Amaro, V.E.; Silva, R.M. & Lopes, A.B. 2019. Delimitation of flood areas based on a calibrated a DEM and geoprocessing: case study on the Uruguay River, Itaqui, southern Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19: 237-250.
- Baptista, P.; Bastos, L.; Bernardes, C.; Cunha, T. & Dias, J. 2008. Monitoring sandy shores morphologies by DGNSS-A practical tool to generate digital elevation models. *Journal of Coastal Research*, 2008(246): 1516-1528.
- Borges, M.P.; Cruvinel, A.S; Flores, W.M.F.; Barbosa, M.G.R. 2015. Utilização de técnicas de geoprocessamento para a elaboração de cotas de inundações: estudo de caso do parque ecológico do rio Paranaíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR, XVII, João Pessoa. Resumos expandidos, p. 5897-5903.
- Brasil. 1984. Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1980-1989/D89817.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm)> . Acesso em: 22 abr. 2020.
- Buttenfield, B.P., & Beard, M.K. 1991. Visualizing the Quality of Spatial Information. In: AUTOCARTO-CONFERENCE- ASPRS- AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. 6. p. 423-427.
- Climate-Data. 2017. Dados climáticos para cidades mundiais. Disponível em: <<https://pt.climatedata.org/>>. Acesso em: 10 jan. 2017.
- CPRM. 2018. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>> . Acesso em: 18 abr. 2018.
- Da Silva, C.S. & Afonso, S. 2007. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas inundáveis em zonas urbanas: estudo de caso da zona urbana de Pelotas/RS. *Paisagem e Ambiente*, 24: 319-326.
- Fisher, P.F. & Tate, N.J. 2006. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in physical Geography*, 30: 467-489.
- Elshorbagy, A.; Bharath, R.; Lakhanpal, A.; Ceola, S.; Montanari, A. & Lindenschmidt, K.E. 2017. Topography-and nightlight-based national flood risk assessment in Canada. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(4): 2219-2232.
- IBGE. 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 22 fev. 2017.
- IBGE. 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Relatório do Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais REALT-2018. Rio de Janeiro. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_altimetrica/\\_relatorio/relatorio\\_REALT\\_2018.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/_relatorio/relatorio_REALT_2018.pdf)>. Acesso em: 03 de abr. 2020.
- Itaqui-RS. 2007. Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado: Lei Nº 3243. 2007. Disponível em: <[http://www.itaqui.rs.gov.br/governo\\_pastas\\_docs\\_download.php?aId=13](http://www.itaqui.rs.gov.br/governo_pastas_docs_download.php?aId=13)> Acesso em: 20 abr. 2017.
- Lima, C.C.; Amaro, V.E.; Araújo, P.V.N.; Santos, A.L.S. 2019. Identification and Evaluation of Urban Flooding Zones with the Support of Geotechnologies, in Natal City, Northeast Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ)*, 42: 378-394.
- Mann, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 13: 245-259.
- Marco, J.B. 1994. Flood risk mapping. In: COPING WITH FLOODS. Springer. p. 353-373.
- Miller, C.L. & Laflamme, R.A. 1958. *The Digital Terrain Model: Theory & Application*. MIT Photogrammetry Laboratory, 34(3), p 433-442.
- Mouratidis, A.; Briole, P. & Katsambalos, K. 2010. SRTM 3 DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GNSS measurements: a case study from North Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 31: 6205-6222.
- Mukherjee, S.; Joshi, P.; Mukherjee, S.; Ghosh, A.; Garg, R. & Mukhopadhyay, A. 2013. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 205-217.

- Nadal, C.A., Ratton, E., de Godoy, P.R.C.; Ratton, P. & Carletto, R.D.B. 2012. Determinação da altitude ortométrica de réguas linimétricas para uso em projetos de engenharia-Estudo de caso do Passo do Jacaré, rio Paraguai. *Revista técnica do Instituto de Engenharia do Paraná*, 6: 39-49.
- Prina, B.Z. 2015. *Geotecnologias aplicadas no mapeamento das áreas de inundação do perímetro urbano de Jaguarí/RS*. Programa de Pós-graduação em Geografia e Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 127p.
- Reis, P.A. 2015. *Identificação de áreas vulneráveis as enchentes e inundações em áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado, 125p.
- Rocha, C.P. 2009. *Proposta de uma metodologia para levantamento da morfologia costeira com aplicação de tecnologia GNSS*. Programa de Pós-graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Tese de Doutorado, 120p.
- Sánchez, E.P. & de Villarán, R.F. 2012. SRTM 3" comparison with local information: Two examples at national level in Peru. *Journal of Applied Geodesy*, 6: 75-81.
- Santos, A.P. 2010. *Avaliação da Acurácia posicional em dados espaciais com o uso da Estatística espacial*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Dissertação de Mestrado, 110p.
- Santos, M.A. 2009. *Metodologia para obtenção de altitudes ortométricas através de interpolação de modelos geoidais locais definidos por GNSS/Nivelamento e gravimetria*. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado, 110p.
- Santos, M.S.T.; Amaro, V.E., & Souto, M.V.S. 2011. Metodologia geodésica para levantamento de linha de costa e modelagem digital de elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. *Revista Brasileira de Cartografia*, 63: 663-681.
- Saueressig, S.R. 2013. *Zoneamento das áreas de risco à inundação da área urbana de Itaqui-RS*. Programa de Pós-graduação em Geografia e Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 101p.
- Silva, R.M.; Moreira, V.S., & Lopes, A.B. 2017. Geodetic method to obtain a digital elevation model associated to the Brazilian Geodetic System. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 7: 14-17.
- SMAD. 2017. Sistema de Monitoramento e Alertas de Desastres-Rio Grande do Sul, Disponível em: < <http://www.smad.rs.gov.br/index.php> >. Acesso em: 21 fev. 2017.
- Smith, J.A. 1989. Regional flood frequency analysis using extreme order statistics of the annual peak record. *Water Resources Research*, 25(2): 311-317.
- Taubenböck, H.; Wurm, M.; Netzband, M.; Zwenzner, H.; Roth, A.; Rahman, A., & Dech, S. 2011. Flood risks in urbanized areas - multisensoral approaches using remotely sensed data for risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 431-444.
- Tingsanchali, T. 2012. Urban flood disaster management. *Procedia engineering*, 32: 25-37.
- Wang, W.; Yang, X. & Yao, T. 2012. Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet, *Hydrological Processes*, 26: 213-225.