



Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Centro de Ciências Exatas e da Terra

Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica

TESE DE DOUTORADO

**GEOTECNOLOGIAS DE ALTA PRECISÃO NO MAPEAMENTO DE GEORISCO A
INUNDAÇÕES FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Autor:

PAULO VICTOR DO NASCIMENTO ARAÚJO

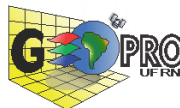
Orientador:

Dr. VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO

Tese n.º 60/PPGG

Natal-RN, fevereiro de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA



TESE DE DOUTORADO

**GEOTECNOLOGIAS DE ALTA PRECISÃO NO MAPEAMENTO DE GEORISCO A
INUNDAÇÕES FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Autor:

Paulo Victor do Nascimento Araújo

Tese de Doutorado apresentada no dia 20 de fevereiro de 2020, ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - PPGG, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, como requisito à obtenção do Título de Doutor em Geodinâmica e Geofísica, com área de concentração em Geodinâmica.

Comissão Examinadora:

Dr. Venerando Eustáquio Amaro (DEC/UFRN) – Orientador

Dr. Alexandre Bernardino Lopes (UFPR) – Examinador Externo

Dr. Paulo Cesar Moura da Silva (UFERSA) – Examinador Externo

Dra. Ada Cristina Scudelari (DEC/UFRN) – Examinadora Interna

Dr. Ricardo Farias do Amaral (DG/UFRN) – Examinador Interno

Natal-RN, fevereiro de 2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Araújo, Paulo Victor do Nascimento.

Geotecnologias de alta precisão no mapeamento de georisco a inundações frente às mudanças climáticas / Paulo Victor do Nascimento Araújo. - 2020.

158f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, 2020.

Orientador: Venerando Eustáquio Amaro.

1. Geodinâmica - Tese. 2. Desastre natural - Tese. 3. Inundação fluvial - Tese. 4. Inundação por maré - Tese. 5. Geoprocessamento - Tese. 6. MDE - Tese. I. Amaro, Venerando Eustáquio. II. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.2/.3

RESUMO

A inundação é o tipo de desastre natural mais comum em todo o mundo e pode ter devastadoras consequências que afetam a economia, o meio ambiente e a dinâmica de vida de milhares de pessoas. Além disso, as alterações climáticas e a elevação do nível do mar vêm acelerando e potencializando os eventos de inundação, principalmente nas regiões costeiras e ribeirinhas. Entretanto, são carentes os estudos de projeções de inundações para os próximos anos, principalmente em escala local, com referenciais geodésicos fidedignos e que possam nortear ações mitigadoras. Nesse sentido, a presente tese de doutorado objetivou desenvolver e aplicar metodologia com base em geotecnologia de alta precisão vertical no mapeamento de geoperigo a inundações frente às mudanças climáticas. Esse trabalho foi desenvolvido em duas áreas de estudo no Brasil: (1) Um recorte no estuário Piranhas-Açú (área de estudo 1), Rio Grande do Norte; e (2) um recorte na Bacia do Rio Uruguai (área de estudo 2), Rio Grande do Sul. A escolha das duas áreas se deu pelo fato das regiões possuírem tipos de inundações diferentes (inundação por maré x inundação fluvial) e com forte apelo científico (socioeconômico-ambiental). Inicialmente, foi desenvolvida uma metodologia de avaliação e calibração de Modelo Digital de Elevação (MDE) para utilização em modelagens de inundações. A metodologia teve por premissa a utilização de pontos de controle de terreno de alta acurácia vertical, vinculados ao Sistema Geodésico Brasileiro e analisada em uma robusta estatística para avaliação e calibração de MDE, desenvolvida e aplicada para a área de estudo 1. Em seguida, a metodologia foi empregada para o mapeamento do geoperigo a inundação na área de estudo 2, uma região sob influência de inundação fluvial e que vem com tendências de aumento das ocorrências dos eventos de inundações. Por fim, aplicou-se a metodologia na região 1 (região sob influência de inundação por maré). Nessa última etapa, os atuais indicadores do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística sobre as mudanças climáticas e elevação do nível do mar para o ano de 2100 foram tomados como referências. Os resultados demonstram elevada eficácia para a metodologia de avaliação e calibração de MDE, obtendo evoluções na diminuição do erro do MDE original em até aproximadamente 70%, como no caso da região 2. Além disso, os mapeamentos das inundações, nas duas áreas, demonstram grande robustez, validadas com fotos aéreas e registro em campo. Os resultados dos mapeamentos de perigo e risco a inundações são alarmantes. O trabalho comprova que o máximo anual do nível do Rio Uruguai está em uma tendência positiva e que os eventos de inundações fluviais só irão aumentar. Foi constatado também que, aproximadamente 118,26 km² do estuário Piranhas-Açú está em área de alto risco e risco extremamente alto a inundação por maré, e necessitando urgentemente de medidas de mitigação. Esta tese, demonstra que técnicas bem aplicadas baseadas em geotecnologias, como sensoriamento remoto, SIG e geodésia de alta precisão, proporcionam resultados que podem ser muito eficazes para a gestão ambiental. A avaliação das áreas potencialmente inundáveis pode ajudar a reduzir o impacto negativo dos eventos de inundação, apoiando o processo de planejamento do uso da terra em áreas expostas ao geoperigo em foco.

Palavras-chaves: geodinâmica; desastre natural; inundação fluvial; inundação por maré; geoprocessamento; MDE.

ABSTRACT

Flooding is the most common type of natural disaster worldwide and can have devastating consequences that affect the economy, environment and life dynamics of thousands of people. In addition, climate change and sea level rise have been accelerating and potentiating flood events, especially in coastal and riverine regions. However, are needy more studies of flood projections for the coming years, especially in local scale, with reliable geodetic references and which can guide mitigating actions. In this sense, the present doctoral thesis aimed to develop and apply methodology based on high vertical precision geotechnology in mapping flood geohazard in the front of climate change. This work was developed in two study areas in Brazil: (1) A cutout in the Piranhas-Açu estuary (study area 1), Rio Grande do Norte; and (2) a cut in the Uruguay River Basin (study area 2), Rio Grande do Sul. The choice of the two areas was because the regions has different types of floods (river flood x tidal flood) and with strong appeal scientific (social-economic-environmental). The methodology had as premise the use of high accuracy vertical ground control points, linked to the Brazilian Geodetic System and analyzed in a robust statistic for DEMs evaluation and calibration, developed and applied to the study area 1. Next, the methodology was employed for mapping the flooding geohazard in study area 2, a region under the influence of river flooding that comes with increasing trends of flood events. Finally, the methodology was applied to region 1 (region under the influence of tidal flooding). In this last stage, the current Intergovernmental Panel on Climate Change and Brazilian Institute of Geography and Statistics indicators on climate change and sea level rise for the year 2100 were taken as references. The results demonstrate high efficacy for the methodology of evaluation and calibration of DEM, obtaining evolutions in the reduction of the original DEM error by approximately 70%, as in the case of region 2. In addition, the mapping of floods, in both areas, demonstrate great robustness, validated with aerial photos and field records. The results of the flood hazard and risk mapping are alarming. The work proves that the annual fluviometric maximum level Uruguay River are in a positive trend and that the events of river floods will only increase. It was also found that approximately 118.26 km² of the Piranhas-Açu estuary is in an area of high risk and extremely high risk tidal flood, and in urgent need of mitigation measures. This thesis demonstrates that well applied techniques based on geotechnologies, such as remote sensing, GIS and high-precision geodesy, provide results that can be very effective for environmental management. The assessment of potentially floodable areas can help to reduce the negative impact of flooding events, supporting the land use planning process in areas exposed to the geo-hazard in focus.

Keywords: geodynamic; natural disaster; river flood; tidal flood; geoprocessing; DEM.

RESUMEN

Las inundaciones son el tipo de desastre natural más común en todo el mundo y pueden tener consecuencias devastadoras que afectan la economía, el medio ambiente y la dinámica de la vida de miles de personas. Además, el cambio climático y el aumento del nivel del mar han acelerando y potenciando los eventos de inundación, especialmente en las regiones costeras y fluviales. Sin embargo, faltan estudios de proyecciones de inundaciones para los próximos años, especialmente a escala local, con referencias geodésicas confiables y que puedan guiar las acciones de mitigación. En este sentido, la presente tesis doctoral tuvo como objetivo desarrollar y aplicar una metodología basada en la geotecnología de alta precisión vertical en el mapeo de geoperigo de inundaciones frente al cambio climático. Este trabajo se desarrolló en dos áreas de estudio en Brasil: (1) Un recorte en el estuario Piranhas-Açú (área de estudio 1), Rio Grande do Norte; y (2) un corte en la cuenca del río Uruguay (área de estudio 2), Rio Grande do Sul. La elección de las dos áreas se debió a que las regiones tuvieron diferentes tipos de inundaciones (inundación de marea x inundación del río) y con un fuerte atractivo científico (social-económico-ambiental). Inicialmente, se desarrolló una metodología de evaluación y calibración del Modelo Digital de Elevación (MDE) para su uso en el modelado de inundaciones. La metodología se basó en el uso de puntos de control de tierra de alta precisión vertical, vinculados al Sistema Geodésico Brasileño y analizados en una estadística robusta para la evaluación y calibración de MDE, desarrollada y aplicada al área de estudio 1. Luego, se empleó la metodología para mapear el geoperigo a las inundaciones en el área de estudio 2, una región bajo la influencia de las inundaciones fluviales que viene con las tendencias crecientes de eventos de inundación. Finalmente, la metodología se aplicó a la región 1 (región bajo la influencia de las inundaciones de las mareas). En esta última etapa, se tomaron como referencia los actuales indicadores del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático e Instituto Brasileño de Geografía y Estadística sobre el cambio climático y el aumento del nivel del mar para el año 2100. Los resultados demuestran una alta eficiencia para la metodología de evaluación y calibración de MDE, obteniendo evoluciones en la reducción del error del MDE original en aproximadamente un 70%, como en el caso de la región 2. Además, el modelado de inundaciones en ambas áreas muestra una gran robustez, validado con fotos aéreas y registros de campo. Los resultados del mapeo de peligro de inundación y riesgo son alarmantes. El trabajo demuestra que nivel máximo anual del río Uruguay están en una tendencia positiva y que los eventos de inundaciones fluviales solo aumentarán. También se descubrió que aproximadamente 118.26 km² del estuario de Piranhas-Açú se encuentran en una zona de alto riesgo y riesgo extremadamente alto de inundación por marea, y que necesitan medidas de mitigación urgentes. Esta tesis demuestra que las técnicas bien aplicadas basadas en geotecnologías, como la teledetección, los SIG y la geodesia de alta precisión, proporcionan resultados que pueden ser muy efectivos para la gestión ambiental. La evaluación de áreas potencialmente inundables puede ayudar a reducir el impacto negativo de las inundaciones, apoyando el proceso de planificación del uso de la tierra en áreas expuestas al geopeligro en foco.

Palabras clave: geodinámica; desastre natural; inundación de ríos; inundación de mareas; geoprocusamiento; MDE.

*“Macau também será tragada pelo mar e a igreja matriz em
cama de baleia será transformada.”*

Lenda urbana macauense sobre o futuro da Cidade de Macau-RN

*A Deus; aos meus pais, João Batista e Maria Margarete;
a minha esposa, Emanuela; ao nosso filho, João Victor;
e ao nosso bebê, que nascerá em breve.*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, arquiteto de todo o universo (a soma do espaço e do tempo e as mais variadas formas de matéria) por proporcionar todas as oportunidades possíveis para o meu desenvolvimento profissional e espiritual, desenvolvimento deste trabalho e obtenção do título de doutor. Prometo que nada disso será em vão e todo o conhecimento construído em minha trajetória acadêmica será aplicado para o desenvolvimento da humanidade e acima de tudo, para o bem.

Aos meus pais, João Batista e Maria Margarete, pelo apoio familiar durante toda a minha jornada acadêmica. Sem eles eu não existiria e conseqüentemente não estaria deixando esta contribuição científica. Agradeço por tudo, de coração!

À minha esposa Emanuela Araújo, por estar ao meu lado em todos os momentos fáceis e difíceis. Te amo!

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), pela liberação total no afastamento de minhas atividades docentes para realização deste trabalho. Serei eternamente grato. Grandes frutos irão surgir como contrapartida!

Ao Professor Dr. Venerando Amaro, pela orientação e confiança na realização deste trabalho, além de ser um grande amigo. Foi um grande desafio e uma experiência fantástica pesquisar o tema proposto. Agradeço por tudo!

Ao Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG). Proporcionou-me uma oportunidade ímpar para eu construir uma base de conhecimento, a partir de uma gama de disciplinas ofertadas pelo programa. As informações obtidas, levarei em toda minha vida profissional. Muito obrigado!

Ao Professor Dr. Ricardo Amaral, pela amizade e pelo convite inicial de ser seu aluno no mestrado do PPGG em 2012, aquele gesto foi o primeiro e importantíssimo passo na minha vida de pós-graduando. Acredito que sem esse gesto eu poderia não estar aqui. Além de toda excelente orientação durante o meu período de mestrado. Nunca esquecerei!

Ao Professor Dr. Paulo César (UFERSA), pela amizade e orientação na minha graduação de Engenharia. Foi o primeiro a me apresentar o geoprocessamento e a me estimular a imergir no mundo das geotecnologias. Agradeço demais! O Professor Paulo César, juntamente com os professores Venerando Amaro e Ricardo Amaral, formam a tríplice de orientações que tive em toda minha jornada acadêmica (Bacharelado-Mestrado-Doutorado). Espero que estejam

satisfeitos e felizes com os resultados das orientações. Espero não ter decepcionado-os. Obrigado Mestres!

Aos membros da comissão examinadora, Professores Doutores: Venerando Eustáquio Amaro, Alexandre Bernardino Lopes, Paulo Cesar Moura da Silva, Ada Cristina Scudelari e Ricardo Farias do Amaral. Todos foram fundamentais para o engrandecimento e conclusão deste trabalho e formação deste pesquisador. Muito obrigado!

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG). Obrigado pelas aulas e conversas, muito ensinamento passado por vocês foi utilizado na construção desta Tese!

A todas as instituições parceiras: Petrobras; Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul; Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA); Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GEOPRO/UFRN); Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GNOMO/UFRN); Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). Pela liberação de uso de alguns dados que foram utilizados durante este trabalho. O esforço da aquisição do dado público ainda gera frutos!

Ao amigo Jeferson Campos (contato: 84 98166-9961 / @jefferson.campos.xg), pela confecção das exclusivas xilogravuras. Sua arte abrilhantou as ideias propostas! Perfeito!

A todos os amigos que fiz no Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO) e no Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica (GNOMO): Anna Pauletti, Leonlene Aguiar (“Leon”), Vitor Peixoto (“Peixe”), João Victor (“JV”), Caio Cortez, Carlos Grilo, Bruno Cesar, Daniel Weiner, Iago Carvalho, Theodoro Fernandes, Matheus Amorim (“Macaxeira”), Tenório Brito, Marceonila Cunha, Maria de Fátima (“Fatinha”), Lívian Rafaely e Débora Busman. E a todos os amigos que fiz no PPGG: Jean, Tiago, David, Juliana, Narelle, Ricardo, André Giskard, Canindé, Francisco Junior. Contem comigo sempre!

A todos os parceiros científicos, Professores Doutores: Venerando Amaro (UFRN), Ricardo Amaral (UFRN), Fúlvio Freire (UFRN), Carlos Eduardo (“Cadu”) (UERN), José Garcia (IFRN), Guelson Batista (UFERSA), Marcelo Augusto (“Tubarão”) (UFERSA), Alexandre Lopes (UFPR) e André Santos (IFMA). Muitas ideias estão surgindo. Vamos produzir!

E a todos os amigos que não citei, mas que fazem parte da minha jornada acadêmica, profissional, social e familiar, que contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização deste trabalho. Obrigado a todos!

SUMÁRIO DA TESE

RESUMO.....	I
ABSTRACT	II
RESUMEN	III
AGRADECIMENTOS	VI
SUMÁRIO DE FIGURAS	XII
SUMÁRIO DE TABELAS	XIV
SUMÁRIO DE XILOGRAVURAS	XV
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XVI
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	2
1.1 Apresentação	2
1.2 Estrutura da Tese	2
1.3 Justificativa.....	4
1.4 Objetivos.....	10
1.4.1 Objetivo geral	10
1.4.2 Objetivos Específicos	11
1.5 Áreas de Estudo.....	11
1.4.2 Bacia Piancó-Piranhas-Açú	12
1.4.2 Bacia Uruguai	19
CAPÍTULO 2 – ESTRUTURA METODOLÓGICA.....	25
2.1 Levantamento Bibliográfico e Cartográfico	26
2.2 Compilação e Organização dos Dados	26
2.2.1 Pontos de Controles de Terreno (GCP)	27

	ix
2.2.2 Modelos Digitais de Elevação (MDE).....	28
2.2.3 Séries temporais das cotas dos níveis em estudo.....	29
2.3 Processamento e Análises.....	30
2.3.1 Análises Estatísticas	30
2.3.2 Aplicação de Técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI).....	30
2.3.3 Análise em Sistema de Informação Geográfica (SIG)	30
2.4 Resultados.....	30
CAPÍTULO 3 – ACURÁCIA VERTICAL E CALIBRAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVÇÃO (MDES) PARA A BACIA HIDROGRÁFICA PIRANHAS-AÇÚ, RIO GRANDE DO NORTE, BRASIL (1º ARTIGO).....	
3.1 Introdução.....	34
3.2 Área de Estudo.....	36
3.3 Metodologia.....	38
3.3.1 Base de Dados	38
3.3.2 Análise dos Dados	41
3.4 Resultados e Discussão.....	45
3.4.1 Avaliação e calibração do MDE SRTM para a área regional.....	45
3.4.2 Avaliação e calibração do MDE SRTM e LiDAR para a área local	51
3.5 Conclusões.....	53
3.6 Agradecimentos.....	54
3.7 Referências	54
CAPÍTULO 4 – DELIMITAÇÃO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO COM BASE EM UM MDE CALIBRADO E GEOPROCESSAMENTO: ESTUDO DE CASO NO RIO URUGUAI, ITAQUI, SUL DO BRASIL (2º ARTIGO).....	
4.1 Introduction	62
4.2 Study area	63
4.3 Previous studies of flooding in Itaqui.....	69
4.4 Material and methods	69
4.4.1 Statistical analysis of Uruguay River fluviometric level records	70

	x
4.4.2 Delimitation of flood hazards areas.....	71
4.5 Results and discussion	74
4.5.1 Analysis of maximum annual fluviometric level of the Uruguay River	75
4.5.2 Delimitation of flood hazards areas.....	76
4.6 Conclusions	82
4.7 Acknowledgments	83
4.8 References	83
 CAPÍTULO 5 – MAPEAMENTO DE ÁREA DE INUNDAÇÃO POR MARÉS, FRENTES AOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: ESTUDO DE CASO EM UM ESTUÁRIO TROPICAL DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (3º ARTIGO)	 91
5.1 Introduction	92
5.2 Study area	93
5.3 Material and methods	97
5.3.1 Tide database	97
5.3.2 Adjustment of Reduction Level to the Brazilian Geodetic System.....	99
5.3.3 LiDAR Digital Elevation Model	100
5.4 Results and discussion	103
5.4.1 Tidal behavior and return period	103
5.4.2 Tidal flood hazard and vulnerability maps	105
5.4.3 Tidal flood risk map	111
5.5 Conclusions	112
5.6 Acknowledgments	113
5.7 References	113
 CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	 121
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 128
 APÊNDICE A - SOBRE O DISCENTE (MAR/2020)	 136
 APÊNDICE B - SOBRE O ORIENTADOR (MAR/2020).....	 136

APÊNDICE C - PUBLICAÇÕES DO DISCENTE DURANTE O DOUTORAMENTO (MAR/2016 A FEV/2020).....	137
---	-----

SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa da distribuição dos desastres naturais no mundo.....	5
Figura 1.2 Mapa da distribuição dos eventos de inundações no mundo.....	6
Figura 1.3 Evolução dos registros anuais de ocorrências de inundação.....	7
Figura 1.4 Mapa de localização das áreas de estudo.....	12
Figura 1.5 Área de Estudo I.....	14
Figura 1.6 Eventos de inundações fluviais na UPH Bacias Difusas do Baixo Açu.....	17
Figura 1.7 Eventos de inundações por marés no litoral norte do estado do Rio Grande do Norte.....	18
Figura 1.8 Recortes de publicações históricas sobre a antiga Ilha de Manoel Gonçalves.....	19
Figura 1.9 Localização da Área de Estudo II.....	21
Figura 1.10 Eventos de inundações fluviais na Cidade de Itaquí-RS.....	23
Figura 2.1 Fluxograma metodológico.....	25
Figura 2.2 Obtenção da altitude ortométrica.....	26
Figura 3.1 Área de estudo e distribuição dos pontos de controles.....	37
Figura 3.2 Resultado gráfico da análise de regressão linear.....	45
Figura 3.3 Comportamento da Média da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) em relação as classes de Altura Ortométrica (H) para o “SRTM _{Calibrado} ” e “SRTM _{Não Calibrado} ”.....	47
Figura 3.4 Curvas suavizadas da variação da altura ortométrica em função do aspecto da declividade.....	49
Figura 3.5 Gráficos: (A) Comportamento da RMSE nas classes de altura ortométrica (H); (B) Comportamento da RMSE nas classes de declividade; e (C) Comportamento da RMSE nas classes de aspecto.....	50
Figura 3.6 Resultado gráfico da análise de regressão linear.....	51
Figure 4.1 Location of the study area.....	65
Figure 4.2 “Volants houses” being transferred in periods of flooding in Itaquí.....	67
Figure 4.3 The Brazilian Army helping local residents during flooding events in Itaquí.....	68
Figure 4.4 Flowchart of the proposed approach for the delimitation of flood hazard mapping..	70
Figure 4.5 Annual fluviometric maximum level records of the Uruguay River in Itaquí.....	76
Figura 4.6 Linear regression analysis of SRTM image vs ground control points (GCPs).....	77
Figure 4.7 Digital elevation model (DEM).....	77
Figure 4.8 Flood hazard map of Itaquí, Rio Grande do Sul, southern Brazil.....	79

Figure 4.9 The worst historical flooding of the Uruguay River basin (July 1983) has been used here as a base for a simulated flood event in Itaqui.....	80
Figure 4.10 The 2017 historical flooding of the Uruguay River basin.....	81
Figure 5.1 Location of the study area.....	95
Figure 5.2 Tidal flooding events in north coastal of Rio Grande do Norte State.....	96
Figure 5.3. Scheme illustrating the differences in quotas between the references adopted by the Brazilian Navy.....	100
Figure 5.4 Annual tide maximum level temporal serie.....	104
Figure 5.5 Return period graph of tide data.....	105
Figure 5.6 Tidal flood hazard map.....	107
Figure 5.7 Tidal flood through the rain drainage system.....	108
Figure 5.8 Tidal flooding events in north coastal of Rio Grande do Norte State.....	109
Figure 5.9 Land cover and land use map for study area.....	110
Figure 5.10 Tidal flood vulnerability map.....	110
Figure 5.11 Tidal flood risk map for Piranhas Açú Estuary.....	111
Figura 6.1 Informações sobre a estação maregráfica da Cidade de Palermo (Argentina), desembocadura da Bacia do Rio Uruguai.....	122
Figura 6.2 Investigação visual com imagens históricas Google Earth, sobre a região da praia de Camapum, Macau-RN.....	124
Figura 6.3 Recorte do Mapa do Macrozonamento do atual Plano Diretor Participativo do Município de Macau-RN.....	125
Figura 6.4 Portal Eletrônico do Projeto REDEGEO.....	126
Figura 6.5 Print da Descrição/Localização da Estação IFRN0001 cadastrada no REDEGEO, implantada no Campus do IFRN, Campus Macau.....	127

SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 3.1 Estatística descritiva dos dados altimétricos para a área regional.....	46
Tabela 3.2 Resultado da Matrix de Correlação e resumo do Modelo Aditivo Generalizado.....	49
Tabela 3.3 Estatística descritiva dos dados altimétricos para o recorte do estuário.....	52
Tabela 3.4 Teste de Friedman e teste <i>post-hoc</i> para os dados altimétricos no recorte do Estuário Piranhas-Açú.....	53
Table 4.1 Classes of flood hazard for mapping.....	73
Table 4.2 Results of Mann Kendall test.....	76
Table 4.3 Probability of the fluviometric level being matched or exceeded.....	76
Table 4.4 Indicators of DEM errors in relation to GCPs.....	78
Table 4.5 Classes of flood hazard mapping in the Itaqui, southern Brazil.....	78
Table 5.1. Attributed value to hazard map.....	102
Table 5.2. Attributed value to vulnerability map.....	102
Table 5.3. Risk map value range.....	103
Table 5.4. Tidal flood quotas in the scenarios under study.....	106
Table 5.5. Area of land cover and land use categories.....	106

SUMÁRIO DE XILOGRAVURAS

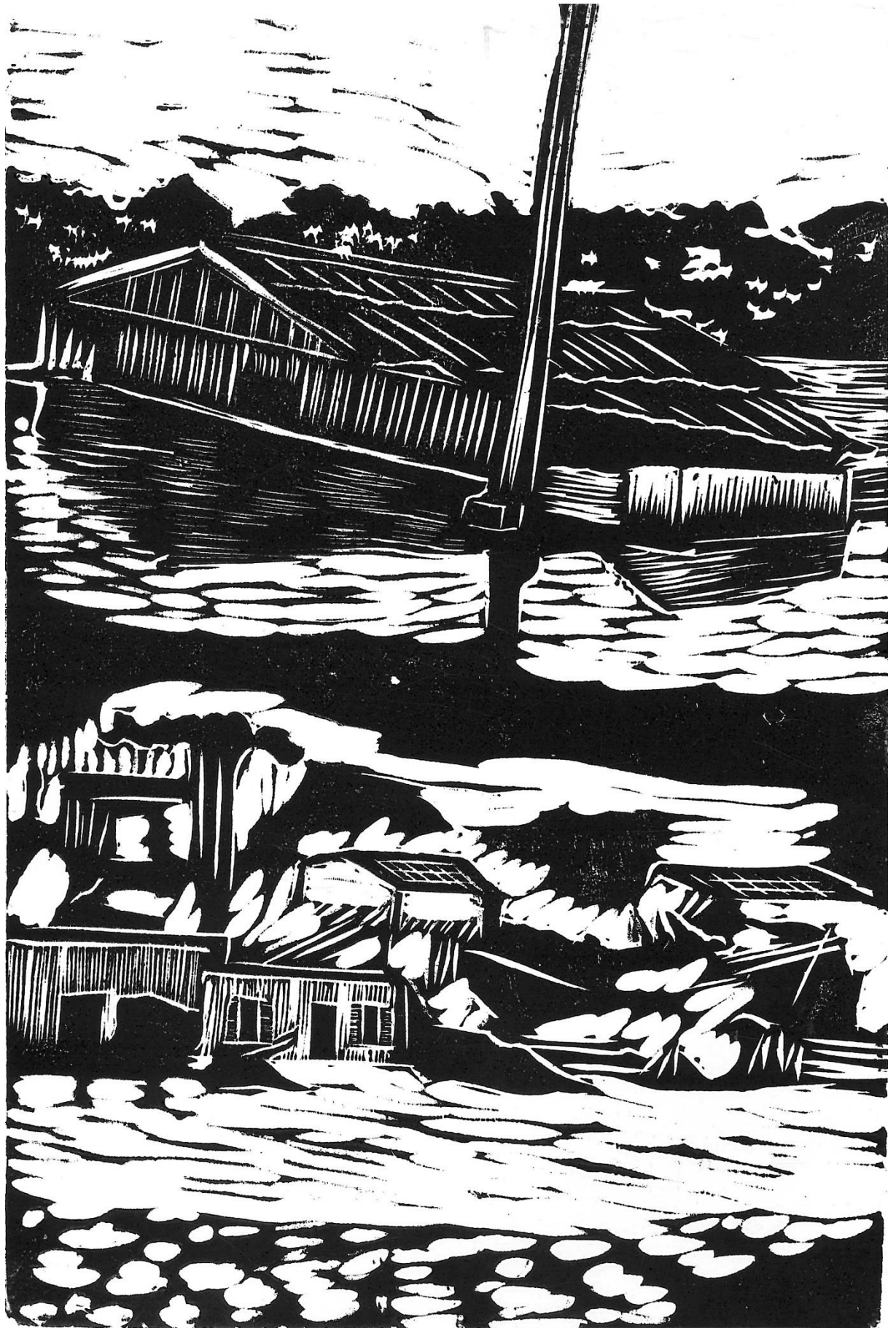
Xilogravura 1 “Tormenta”	1
Xilogravura 2 “Estudos”	24
Xilogravura 3 “Observatório”	32
Xilogravura 4 “Êxodo”	60
Xilogravura 5 “Cama de Baleia”	90
Xilogravura 6 “Conclusão”	120

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ΔH	Variação da Altitude Ortométrica.
ANA	Agência Nacional de Águas.
APADR	<i>Rosado Dunes Environmental Protection Area</i> / Área de Proteção Ambiental Dunas do Rosado.
AT	<i>Astronomical Tide</i> / Maré Astronômica.
BDG	Banco de Dados Geodésicos.
CBERS	<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i> .
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> .
DHN	<i>Hydrography and Navigation Directorate</i> / Diretoria de Hidrografia e Navegação.
DIP	<i>Digital Image Processing</i> .
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas.
GCP	<i>Ground Control Points</i> .
GEOPRO	Laboratório de Geoprocessamento.
GIS	<i>Geographic Information System</i> .
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> .
GOS	<i>Global Ocean Surge</i> .
H	Altitude Ortométrica.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change / Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i> .
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i> .
MAG	Modelo Aditivo Generalizado.
MB	<i>Brazilian Navy</i> / Marinha do Brasil.
MDE	Modelo Digital de Elevação.
MSL	<i>Mean sea level</i> / Nível Médio do Mar.
MT	<i>Meteorological tide</i> / Maré Meteorológica.
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i> .
NHESS	<i>Natural Hazards and Earth System Sciences</i> .

NIR	<i>Near-infrared.</i>
NMM	Nível Médio do Mar.
PBDA	Portal Brasileiro de Dados Abertos.
PBMC	<i>Brazilian Panel on Climate Change</i> / Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.
PDI	Processamento Digital de Imagem.
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional.
PPGG	Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica.
PPK	<i>Post-processed kinematic.</i>
R ²	Coeficiente de determinação.
RAAP	Rede Altimétrica de Alta Precisão.
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo.
RDSEPT	<i>Ponta do Tubarão State Sustainable Development Reserve</i> / Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão.
RCP	<i>Representative Concentration Pathway.</i>
RDSPT	Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão.
RGBI	<i>Red-Greeb-Blue-Intensity.</i>
RGLS	Rede GNSS do Litoral Setentrional.
RL	<i>Reduction Level</i> / Nível de Redução.
RMSE	<i>Root mean square error</i> / Raiz do Erro Médio Quadrático.
RRNN	Referências de Nível.
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro.
SIG	Sistema de Informação Geográfica.
SLR	<i>Sea Level Rise.</i>
SMAD	Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres.
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission.</i>
Sub-FT	<i>The non-astronomical sea level signal.</i>
T _r	<i>Return period</i> / Período de Retorno.
T _{r20}	Período de retorno de 20 anos.
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa.
UPH	Unidade de Planejamento Hidrológico.

USGS	<i>United States Geological Survey</i> / Serviço Geológico dos Estados
Unidos.	
UTM	Universal Transversa de Mercator.



Capítulo 1 – Considerações Iniciais

1.1 Apresentação

A presente Tese de Doutorado é parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Doutor em Geodinâmica e Geofísica, com área de concentração em Geodinâmica, pelo Programa de Pósgraduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) (Conceito CAPES 5) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A Tese, fruto de uma parceria entre pesquisadores da UFRN, Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), pretendeu desenvolver e aplicar metodologia com base em geotecnologia de alta precisão vertical no mapeamento de georisco a inundações frente às mudanças climáticas.

O PPGG caracteriza a linha de pesquisa “Geologia Ambiental”, como sendo a linha que possui envolvimento de trabalhos voltados principalmente nas temáticas da cartografia geoambiental, mapas de uso do solo e de sensibilidade, e gerenciamento do meio ambiente. O autor conseguiu enquadrar a Tese em sintonia com o perfil característico da área e linha de pesquisa proposta pelo PPGG.

Durante o período de elaboração dessa tese, o autor (APÊNDICE A) que também é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), ficou afastado de suas atividades docentes para dedicação exclusiva e realização desta capacitação (doutoramento). Durante os 4 anos de doutoramento, sob a orientação do Professor Dr. Venerando Eustáquio Amaro (UFRN) (APÊNDICE B), o autor participou de 10 publicações científicas, em paralelo a esta pesquisa (APÊNDICE C), tendo 5 publicações ligadas diretamente a temática em foco (inundações e mudanças climáticas). Por fim, se faz necessário relatar que a pesquisa desenvolvida com alto rigor científico é fruto de uma construção de conhecimentos ao longo de toda trajetória acadêmica do autor, aliada aos ensinamentos obtidos durante as aulas do PPGG, do excelente guiamento de seu orientador e da execução e acompanhamento de projetos paralelos desenvolvidos antes e durante o doutoramento.

1.2 Estrutura da Tese

Atualmente, vários programas de pós-graduação no Brasil, têm encorajado seus discentes a desenvolverem dissertações ou teses em forma de artigos submetidos e/ou publicados em periódicos científicos. E isto vem se tornando uma grande tendência (com por

exemplo: Arthaud, 2007; Ganade de Araújo, 2014; Lima, 2016, Vasconcelos, 2018). Essa recomendação por parte dos programas de pós-graduação, de fato traz alguns benefícios, tendo como principal, o aumento dos indicadores dos programas perante a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Além disso, o modelo em crescente atribui um caráter mais objetivo as teses, entretanto por vez, podem apresentar capítulos desagregados e com itens repetitivos (Vasconcelos, 2018). Apesar disso, essa tese foi estruturada em seis capítulos, onde o autor conseguiu realizar uma adaptação entre a “forma tradicional” (Tese em forma de livro) e a “forma moderna” (Tese em forma de artigos científicos). Todos os resultados, são apresentados em forma de capítulos separados (artigos publicados e/ou submetidos em periódicos de alto impacto científico), mas com capítulos introdutórios de ligação e capítulo de fechamento. Adotou-se esse modelo de tese, pois foi observado que dessa maneira a tese fica mais direcionada e desfoque em relação ao tema principal da pesquisa.

Assim, o **Capítulo 1 (Considerações Iniciais)** tem como finalidade apresentar a Tese, descrever as justificativas e os objetivos da pesquisa, e situar o leitor na localização das áreas de estudos.

No **Capítulo 2 (Estrutura Metodológica)**, é apresentado o organograma metodológico e uma breve descrição de todas as etapas metodológicas para o desenvolvimento da tese. No entanto, por uma questão de objetividade e não repetitividade, a descrição metodológica minuciosa dos capítulos 3, 4 e 5, são abordados nos respectivos capítulos.

O **Capítulo 3, Acurácia vertical e calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil (Araújo et al., 2018)**, partiu da necessidade de desenvolver uma metodologia para conhecer e aprimorar o erro vertical associado aos Modelos Digitais de Elevação, a nível regional e local, visto a elevada importância de um MDE na construção de modelos para estudos em inundações. Neste capítulo, objetivou-se avaliar a qualidade vertical, fatores geomorfológicos influenciadores no erro vertical e calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) obtidos a partir do SRTM e do LiDAR aerotransportado na Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, porção norte do Estado do Rio Grande do Norte. Trata-se de um artigo que foi publicado no periódico “*Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ)*” (ISSN 0101-9759), volume 41(1), no ano de 2018. Apesar de ser uma recete publicação, o artigo já conta com diversas citações em periódicos nacionais e internacionais, teses e dissertações (por exemplo: Aguiar, 2018; Medeiros, 2018; Aguiar et al., 2019; Almeida, 2019; Araújo et al., 2019; Dias et al., 2019; Lima 2019; Lima et al., 2019; Medeiros & Zanella, 2019).

No **Capítulo 4, Delimitação de áreas de inundação com base em um MDE calibrado e geoprocessamento: estudo de caso no Rio Uruguai, Itaqui, Sul do Brasil (Araújo et al., 2019)**, teve-se o intuito de aplicar a metodologia de avaliação e calibração de MDE, elaborada no Capítulo 3, em uma região sob influência de inundação do tipo fluvial. Nele, objetivou-se mapear as áreas de perigo a inundação sob influência do Rio Uruguai na Cidade de Itaqui-RS, usando MDE gratuito calibrado, dados históricos de nível do rio e sensoriamento remoto. Neste capítulo, trata-se de um artigo que foi publicado no periódico internacional “*Natural Hazards and Earth System Sciences*” (ISSN 1684-9981), volume 19(1), no ano de 2019. Este artigo já conta com citações em trabalhos importantes sobre inundações e alagamentos (Aguilar, 2018; Aguilar et al., 2019; Lima, 2019; Lima et al., 2019; Azizian & Brocca, 2020).

No **Capítulo 5 (Mapeamento de área de inundação por marés, frentes aos cenários de mudanças climáticas: estudo de caso em um estuário tropical do semiárido brasileiro)**, teve-se o intuito de aplicar a metodologia de avaliação e calibração de MDE, elaborada no Capítulo 3, em uma região sob influência de inundação por maré, e aliada as tendências de subida do nível de mar. Nele objetivou-se, realizar um mapeamento do risco de inundação por marés, considerando os cenários atuais de tendências do aumento do nível do mar, adotando como estudo de caso o estuário Piranhas-Açú, porção norte do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Trata-se de um artigo que será submetido em breve ao periódico internacional “*Natural Hazards and Earth System Sciences*” (ISSN 1684-9981).

E por fim, no **Capítulo 6 (Considerações Finais)**, é apresentado a ligação dos resultados de ambos os artigos e considerações finais de fechamento da Tese. Nele, também é apresentado algumas recomendações a serem aplicados para o monitoramento e mitigação dos cenários apresentados.

1.3 Justificativa

Desastres naturais, como terremotos, furacões, enchentes, erupções vulcânicas e deslizamentos de terra sempre constituem um grande problema em muitos países desenvolvidos e em desenvolvimento e tem ocorrido em todo o planeta terra (Figura 1.1). Os desastres naturais matam milhares de pessoas e destroem bilhões de dólares em habitats e propriedades a cada ano. O rápido crescimento da população mundial aumentou tanto quanto a frequência e gravidade dos desastres naturais nos últimos anos. Os eventos de desastres naturais estão intrinsicamente associados a geodinâmica da terra. Nisso, geocientistas realizam pesquisas para entender melhor a geodinâmica, esses perigos e contribuir para as políticas de gerenciamento de riscos relacionadas as questões sociais e técnicas associadas a riscos geológicos, bem como

à mitigação dos desastres naturais (UNESCO, 2018). Logo, a temática de pesquisas científicas em **Georisco** (do inglês *Geohazards*) vem nos últimos anos, tomando destaque na comunidade científica.

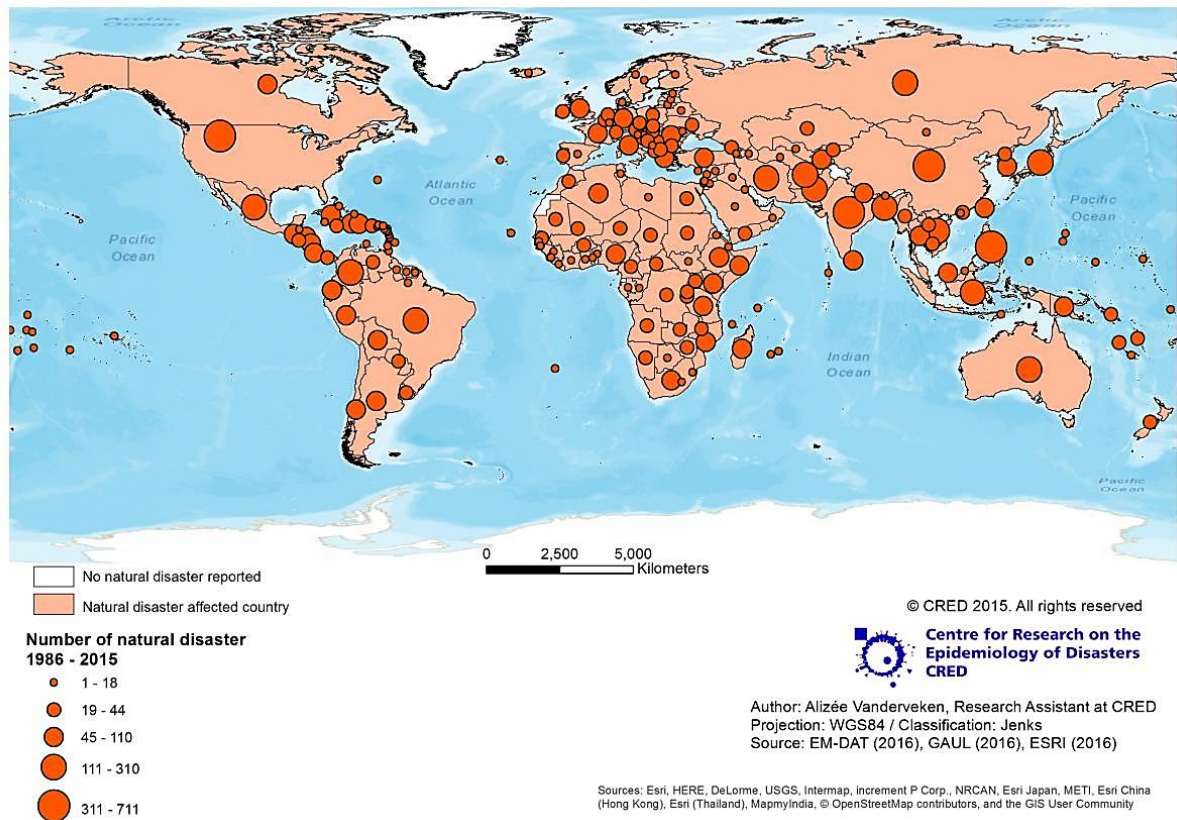


Figura 1.1 Mapa da distribuição dos desastres naturais no mundo, durante o período de 1986 a 2015. Fonte: Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres - CRED (CRED, 2015).

É importar frisar que, a palavra *geohazard* vem de duas palavras: *Geo* - da palavra "geológico", que significa da terra; e *hazard* (em português "perigo") - é uma situação que representa um risco ou perigo para a propriedade, meio ambiente e/ou vida. Portanto, "*geohazards*" significa o risco ou perigo de danos causados por um processo geológico.

Todos os perigos geológicos (*geohazards*) podem ser considerados inativos até serem deflagrados. Quando o perigo ocorre, ele pode ser chamado de evento, acidente, emergência, incidente ou desastre. Os estudos geodinâmicos e o monitoramento de perigos e riscos geológicos nos ajudam a nos preparar melhor e a reagir a esses eventos geológicos quando eles ocorrem. Os *geohazards* podem ter características pequenas que têm impacto apenas em sua área local, como um pequeno deslizamento de terra que bloqueia parcialmente uma estrada ou

trilha até grandes terremotos que afetam cidades inteiras. Eles também podem ser eventos muito grandes que têm um impacto generalizado, como um grande tsunami.

O desastre por inundação tem um lugar especial em *geohazards*. Ela tem uma distribuição de cobertura global (Figura 1.2) e causam mais de US \$ 40 bilhões em danos em todo o mundo anualmente, de acordo com a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2016). Nos EUA, as perdas ficam em média perto de US \$ 8 bilhões por ano. O número de mortos aumentou nas últimas décadas para mais de 100 pessoas por ano. No Vale do Rio Amarelo, na China, algumas das piores inundações do mundo mataram milhões de pessoas (*The Editors of Encyclopaedia Britannica*, 2016).

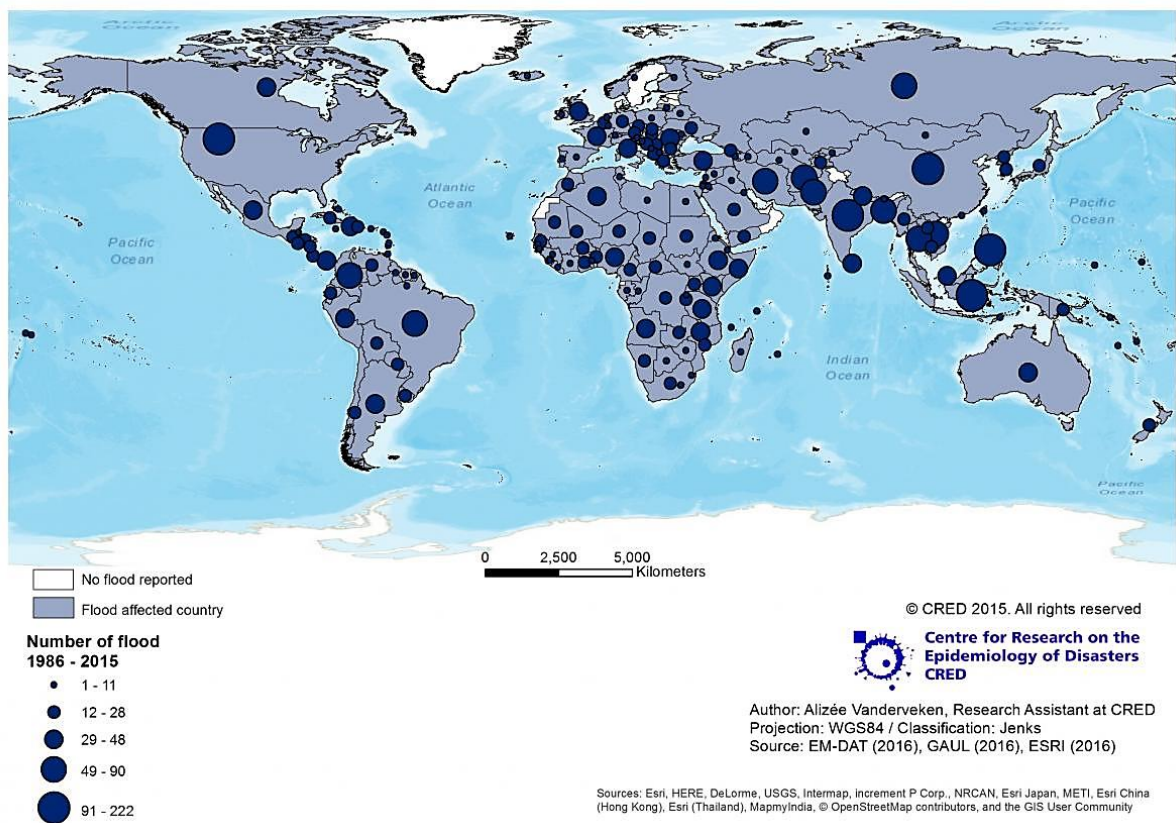


Figura 1.2 Mapa da distribuição dos eventos de inundações no mundo, durante o período de 1986 a 2015. Fonte: Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres - CRED (CRED, 2015).

Além dos problemas diretos ocasionados pela “chegada” da inundação, outros problemas podem surgir com o “retrocesso” da inundação. Quando as águas da enchente retrocedem, as áreas afetadas geralmente ficam cobertas por lama. A água e a paisagem podem estar contaminadas com materiais perigosos, como detritos pontiagudos, pesticidas, combustível e esgoto não tratado. Os moradores de áreas inundadas podem ficar sem energia

elétrica e água potável, levando a surtos de doenças transmitidas pela água como a febre tifoide, hepatite A e cólera (Nunez, 2019).

Avaliando os dados do Banco de Dados de Eventos de Emergência do Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres – CRED (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*), órgão internacional de pesquisa da Universidade de Louvain (UCLouvain), Bruxelas (Bélgica), é perceptível um aumento significativo dos registros de ocorrências dos eventos de inundações mundiais nos últimos anos, com uma tendência positiva (Figura 1.3). Ou seja, os registros dos eventos de inundações estão em um crescente.

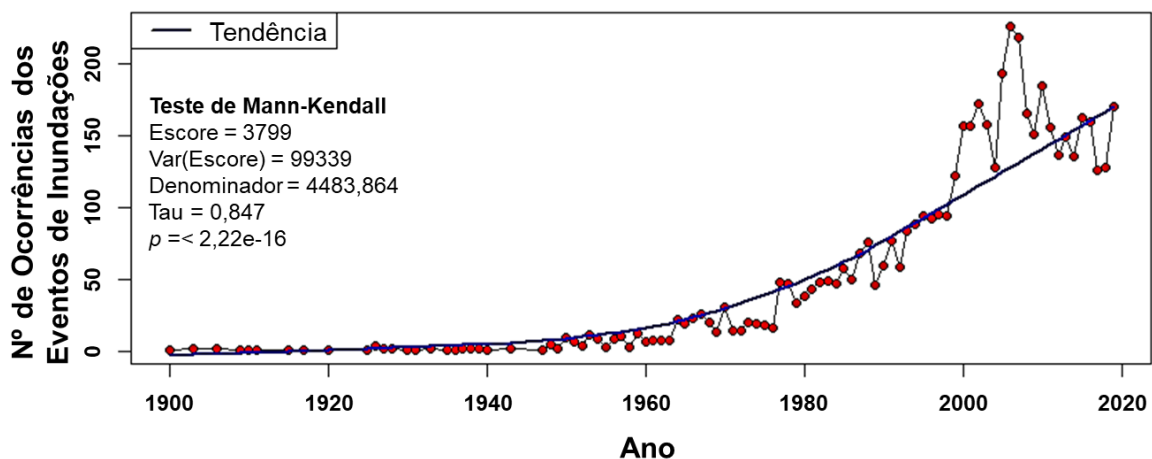


Figura 1.3 Evolução dos registros anuais de ocorrências de inundações (Modelagem realizada pelo autor). Fonte dos dados: EM-DAT: The Emergency Events Database - Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, www.emdat.be, Brussels, Belgium.

Os seres humanos aumentaram o risco de morte e danos ao construir cada vez mais casas, empreendimentos e infraestrutura nas zonas de várzeas vulneráveis à inundações. Além disso, como na maioria de outros desastres naturais, tanto a frequência quanto a magnitude de inundações extremas cresceram nas últimas décadas e tendem a aumentar nas próximas (Berghuijs *et al.*, 2017), fato este impulsionado pelas alterações climáticas globais. Embora sempre tenha havido inundações, pesquisas sugerem uma correlação entre mudanças climáticas globais e inundações (Fiorillo *et al.*, 2018). O volume das chuvas deverá aumentar de 1 a 2% a cada 1°C de aquecimento na temperatura média dos oceanos e a subida do nível do mar colocam mais áreas costeiras em risco. Além disso, mudanças na circulação atmosférica são susceptíveis de causar mais eventos climáticos extremos que são, frequentemente, difíceis de prever a longo prazo (Sugio, 2008; *The Geological Society*, 2013, Fiorillo *et al.*, 2018).

A inundações é parte integrante da variabilidade inerente à natureza. Por mais que possamos procurar controlar e eliminar as inundações, elas continuam a ocorrer. A comunidade

civil está cada vez mais apresentando interesse em aceitar a inevitabilidade de inundações maiores do que a esperada, e em aceitar que muitas atividades humanas podem ampliar o tamanho e o impacto das inundações (Sminovic, 2012). Ela é principalmente motivada por eventos climáticos que podem ser de difícil prognóstico. Por esta razão, os prognósticos de geoperigo de inundação estão comumente à disposição em termos de probabilidades computadas usando dados históricos da cota do nível da água para a área de interesse (Jha *et al.*, 2012). Entretanto, o valor da inferência, com base em observações históricas, naturalmente depende da disponibilidade e da qualidade dos dados, aliados a uma padronização de referencial altimétrico.

As inundações dos rios (inundações fluviais) ou do mar (inundações costeiras ou inundações por maré) ocorrem em formações naturais (várzeas e planícies costeiras) que possuem uma geomorfologia e uma composição geológica favorável aos eventos. Nas planícies de inundação, geocientistas vem utilizando geotecnologias como Sensoriamento Remoto, Processamento Digital de Imagens, Sistema de Informações Geográficas e Geoestatística para mapeamento de áreas de riscos e perigos às inundações. Essa estratégia se torna uma aliada a gestão publica (BGS, 2018).

A mudança climática é um dos desafios mais complexos deste século. Em resumo, ela nada mais é que, uma mudança na distribuição estatística do clima por longos períodos de tempo, que variam de décadas a milhões de anos (Simonovic, 2012). O clima refere-se, geralmente, à temperatura do dia-a-dia e atividade de precipitação. A mudança climática pode ser limitada a uma região específica, ou pode ocorrer em toda a Terra. No contexto de política ambiental, a mudança climática geralmente se refere a mudanças no clima moderno. Pode ser qualificado como mudança do clima antropogênico, mais conhecida como aquecimento global. O aquecimento global é o aumento da temperatura média do ar e dos oceanos da superfície da Terra desde meados do século XX. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Allen *et al.*, 2018), o aquecimento induzido pelo homem atingiu em 2017, aproximadamente 1 °C (provável entre 0,8 °C e 1,2 °C) acima dos níveis pré-industriais, sendo aumentado a 0,2 °C (provavelmente entre 0,1 °C e 0,3 °C) por década (alta confiança).

O aquecimento da atmosfera aumenta a capacidade da atmosfera em reter água e acelera muitos dos processos envolvido na redistribuição da umidade na atmosfera. Estas mudanças influenciam nos processos de geração de inundações. No entanto, o aquecimento também altera muitos outros aspectos do ciclo da água global: a) aumento da evaporação, b) mudança dos padrões e intensidade da precipitação, c) afeta os processos envolvidos no armazenamento

superficial de água incluindo geração e derretimento de neve, derretimento de gelo no rio e derretimento glacial. A maioria desses processos ativa a geração de inundações. A visão geral dos geocientistas é que as inundações estão aumentando com a mudança climática (The Copenhagen Diagnosis, 2009). Além dos citados, o aumento médio do nível do mar (NMM) global é um dos principais fenômenos associados (Nicholls e Cazenave, 2010; IPCC, 2014; Busman *et al.*, 2016; Dangendorf *et al.*, 2019; Bamber *et al.*, 2019). Durante o último quarto de século, o NMM global subiu a uma taxa acelerada, com média de +3 mm/ano, ameaçando comunidades costeiras e ecossistemas em todo o mundo (Nerem *et al.*, 2018; Bamber *et al.*, 2019).

No Brasil, o panorama atual das inundações é extremamente preocupante (Losada *et al.*, 2013). O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) sistematizou dados e informações indicando que as diferentes regiões do Brasil já estão passando por mudanças em seus climas característicos (PBMC, 2014). Prevê-se que essas mudanças afetem os sistemas naturais, humanos, de infraestrutura e de produção do país de maneira não uniforme (Brasil, 2016). O país se destaca como a sétima maior nação do mundo em população costeira (Mcgranahan *et al.*, 2007). Cerca de 25% da população brasileira vive na zona costeira e, ultimamente, sofre com os danos causados pelo aumento relativo do nível do mar (SMC-Brasil, 2018).

Aproximadamente 60% dos eventos naturais que atingiram o Brasil de 1948 a 2006, com consequências nocivas para a população, foram relacionados a inundações e/ou avanços do mar (Brasil, 2016). Esses dados, combinados com cenários de tendências crescentes do nível do mar (Easterling *et al.*, 2000), alertam para a necessidade de projeções (em escala regional e local) para as próximas décadas, para apoiar a preparação e o planejamento para responder à crescente ameaça relacionada a subida do nível do mar. As adaptações a mudança climática envolvem grandes investimentos em infraestrutura, representam decisões difíceis aos gestores públicos e requerem uma base de informações precisa (Hall *et al.*, 2019; Kulp e Strauss, 2019).

As inundações por maré estão se tornando mais frequentes e destruidoras com o aumento do nível médio do mar (NMM) (Herdman *et al.*, 2018). O Quinto Relatório do IPCC apresentou cenários climáticos chamados Caminho de Concentração Representativa (RCP, da sigla em inglês *Representative Concentration Pathway*) (IPCC, 2014). Cada RCP foi construído para a escala global e considera para a projeção de elevação relativa do NMM a evolução histórica de vários fatores, como emissão de gases, concentração de gases de efeito estufa, entre outros. Embora em todos os cenários o aumento projetado em NMM seja de no máximo 1m para o ano 2100, eles foram preparados para a escala global e continental.

Nenhum país está imune a mudança climática e nem pode vir a ser capaz de enfrentar individualmente os desafios interconectados que compreendem decisões políticas e econômicas controversas a nível mundial (PBMC, 2014). Tampouco, os avanços tecnológicos com consequências globais de longo alcance (Banco Mundial, 2010). Entretanto, vários são os trabalhos e metodologias para o mapeamento de inundações em escala global, ficando extremamente evidente a necessidade de trabalhos para as escalas regional e, principalmente, local.

Esta pesquisa se justifica para tentar suprir a necessidade de trazer uma metodologia eficaz para mapeamento de áreas de inundações frente as mudanças climáticas, em escala regional e local, uma vez que se destaca a carência de pesquisas com este enfoque espacial e com padronizações de referencial altimétrico. Este trabalho traz informações acerca das inundações em recortes de duas bacias hidrográficas no Brasil, contribuindo para o entendimento das inundações nos locais em estudo, bem como suas tendências de aumento ou diminuição para o futuro. Originando resultados que podem servir de bases nas Políticas Nacionais de Proteção e Defesa Civil, Gerenciamento Costeiro, Recursos Hídricos e o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima.

Questões importantes serviram de base para a construção das hipóteses desta pesquisa, foram elas:

a) É possível avaliar e diminuir o erro vertical de algum Modelo Digital de Elevação (MDE)? É possível utilizar algum MDE gratuito e utilizá-lo em um eficaz mapeamento de áreas de inundação a nível regional e local com elevada acurácia vertical?

b) É possível simular com precisão as inundações do Rio Uruguai, com elevada acurácia vertical utilizando MDE gratuito? Existe tendência de aumento na frequência e magnitude das inundações no Rio Uruguai?

c) Existe realmente, risco a inundação por maré no Estuário Piranhas-Açú, região semiárida brasileira? É possível mapear o risco de inundação por maré na região do Estuário, tendo como base as projeções atuais de mudanças do clima e elevação do nível do mar? Qual será a cota de inundação por maré, para o ano de 2100, no Estuário Piranhas-Açú?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Desenvolver e aplicar metodologia com base em Geotecnologias de alta precisão vertical no mapeamento de georisco às inundações frente às mudanças climáticas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a qualidade vertical, fatores geomorfológicos influenciadores no erro vertical e calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) obtidos a partir do SRTM e do LiDAR aerotransportado na Bacia Hidrográfica Piancó-Piranhas-Açú, porção norte do Estado do Rio Grande de Norte, Brasil;
- Realizar um mapeamento da delimitação de áreas de perigo a inundação sob influência do Rio Uruguai, Itaqui (RS), por meio de uma calibração de MDE gratuito, dados históricos de nível do rio e técnicas de geoprocessamento;
- Realizar um mapeamento do risco de inundação por marés, considerando os cenários atuais de tendências do aumento do nível do mar, adotando como estudo de caso o estuário Piranhas-Açú, porção norte do estado do Rio Grande do Norte, Brasil.

1.5 Áreas de Estudo

Na tentativa de abordar as geotecnologias no mapeamento de georisco a inundações em duas áreas sob influência de tipos de inundações diferentes (inundação fluvial x inundação por maré) e com forte apelo socioeconômico e ambiental, buscou-se desenvolver esta tese em dois recortes do Brasil (Figura 1.4):

- (I) um recorte na Bacia Piancó-Piranhas-Açú, Estuário do Rio Piranhas-Açú (área de estudo 1), litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte;
- (II) um recorte na Bacia do Rio Uruguai (área de estudo 2), porção compendente a região de Itaqui, Estado do Rio Grande do Sul.

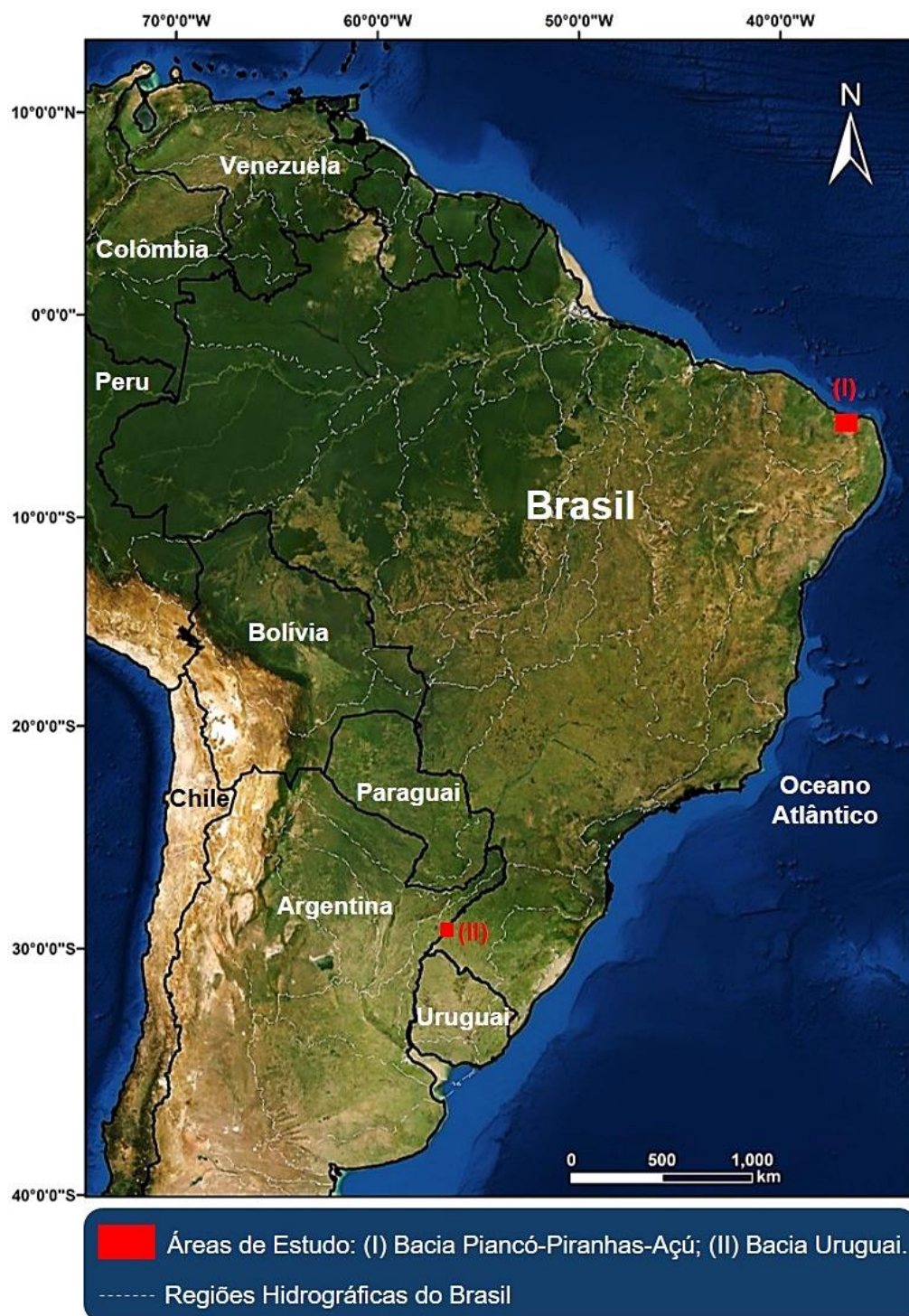


Figura 1.4 Mapa de localização das áreas de estudo.

1.4.2 Bacia Piancó-Piranhas-Açu

Esta área de estudo localiza-se no setor norte da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, porção entre a jusante da Barragem Armando Ribeiro e a foz (área de estudo 1) (Figura 1.5) e é abordada nos Capítulos 3 e 5. A bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu é a maior da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, com área total de 43.683 km². Seu

território divide-se entre os Estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%). Totalmente inserida em território de clima muito quente e semiárido, a bacia apresenta chuvas concentradas em poucos meses do ano (estação chuvosa se atrasando para o outono) e um padrão de forte variabilidade interanual, caracterizado pela alternância entre anos de pluviosidade acima da média, regular e anos consecutivos de valores abaixo da média, que resultam em secas prolongadas e baixa disponibilidade hídrica (ANA, 2016). Assim como os demais rios da bacia, o Rio Piancó-Piranhas-Açu é intermitente em condições naturais. Sua perenização ocorre por meio de dois reservatórios de regularização construídos pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS): Barragem Curema-Mãe d'Água, no Estado da Paraíba, e Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, no Estado do Rio Grande do Norte. Esses reservatórios correspondem às principais fontes hídricas para a região, responsáveis inclusive pelo atendimento de demandas de águas externas, que estão associadas a bacias adjacentes. Cabe destacar brevemente que a bacia também será receptora de água do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). A bacia Hidrográfica Piranhas-Açu é subdividida em 11 Unidades de Planejamento Hidrológico (UPH), determinadas com base na hidrografia, presença de reservatórios de grande porte e unidades de gestão adotadas pelos Estados (ANA, 2016).

Uma das principais UPH para este sistema é a UPH Bacias Difusas do Baixo Açu. Esta, é responsável pelo deságue na foz do estuário Piranhas-Açu de todo o sistema hídrico. O setor industrial dessa UPH compreende essencialmente a exploração mineral, especialmente de sal, petróleo e gás. A extração de petróleo e gás natural é uma atividade de grande importância na bacia e na economia do Rio Grande do Norte, em função dos royalties gerados. Entre os quinze municípios potiguaros produtores, sete pertencem a região em foco: Alto do Rodrigues, Assú, Carnaubais, Macau, Pendências, Porto do Mangue e Upanema (IDEMA, 2005). A aquicultura e a pesca artesanal também têm sua importância na UPH Bacias Difusas do Baixo-Açu, além da agricultura irrigada, carcinicultura e salinas, que representa os principais segmentos de usuários do recurso hídrico da região (ANA, 2016).

Nesta tese, a área de estudo 1 foi subdividida em 2 níveis de escala espacial. Uma compreendendo uma área de aproximadamente 10.742 km², na porção norte do Estado do Rio Grande do Norte. Esse setor foi denominado como área regional, e foi delimitada com o intuito de cobrir toda a região da UPH Bacias Difusas do Baixo Açu e seu retângulo de contorno, região esta que abrange todo o setor jusante da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves (Figura 1.5). Dentro da área regional, foi recortado um segundo setor, denominado área local, de

aproximadamente 536 km² e que envolve toda a região de estuário do Rio Piranhas-Açu e seu retângulo de contorno.

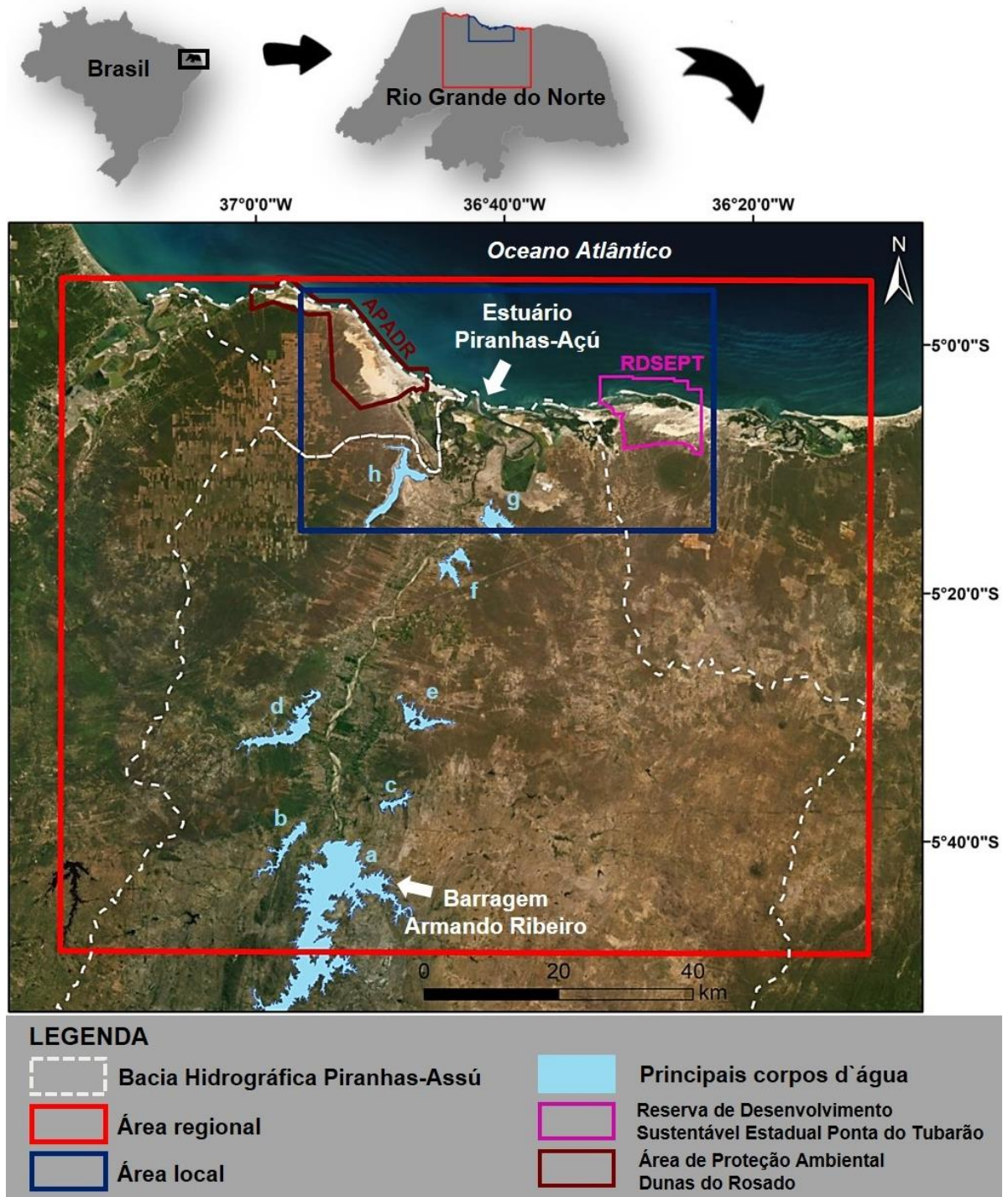


Figura 1.5 Área de Estudo I: A região delimitada em vermelho corresponde a área regional, e em azul corresponde a área local (região do estuário). Principais corpos d'água presentes: a) Barragem Armando Ribeiro; b) Açude Mendubim; c) Açude Pataxós; d) Lagoa do Piató; e) Lagoa da Ponta Grande; f) Lagoa da Pedra; g) Lagoa do Queimado; e h) Lagoa Lagamar.

Essa área é representada por um clima semi-árido, de acordo com Nimer (Nimer, 1972), e se enquadra na categoria BSw'h, de acordo com a classificação de Köppen (Köppen, 1948). As temperaturas diárias variam de 26 °C a 30 °C (com uma temperatura média de 26,8 °C) e a umidade relativa do ar média é de 70%. A pluviosidade varia de 1.300 a aproximadamente 2.000 mm/ano (IDEMA, 1999; Barbosa *et al.*, 2018a).

Sobre a geomorfologia da área em estudo, observa-se a Superfície Cárstica e os Tabuleiros Costeiros, compostos por relevos tabulares amplos e pouco dissecados e por superfície pediplanada. No recorte do estuário Piranhas-Açu, nota-se uma ampla planície fluvial-marinha que constitui a Faixa Litorânea (Barreto *et al.*, 2004; ANA, 2016; Diniz *et al.*, 2017; Barbosa *et al.*, 2018b, Costa *et al.*, 2020). O número e extensão de vários canais presentes ao longo de grandes planícies adjacentes dos rios revela a grande influência das águas oceânicas neste trecho do continente, com a ação das marés sendo uma das principais forças naturais responsáveis pelo controle hidrográfico. A maré local é semidiurna, com duas preamares e duas baixa-mares, onde o nível médio (NM) estabelecido como referência é de 1,39 m acima do nível de redução (NR), conforme estabelecido pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil. Possui médias de preamares de sizígia de 2,34 m acima do nível de redução, média de preamares de quadratura de 2,21 m, média de baixa-mares de sizígia de 0,43 m abaixo do nível de redução e média das baixa-mares de quadratura de 0,56 m (DHN, 2018; Matos *et al.*, 2019). Quanto as correntes marinhas a região encontra-se sob a influência da Corrente Equatorial Sul que atua em toda a costa norte do Brasil (Diniz *et al.*, 2017).

Em termos gerais, o Estuário Piranhas-Açu apresenta um mosaico de ecossistemas assinalados por florestas de mangues, praias oceânicas arenosas expostas e abrigadas, sistema de ilhas barreiras e canais de maré de alta dinâmica sedimentar de curto prazo (Grigio *et al.*, 2006; Santos e Amaro, 2011; Amaro *et al.*, 2012; Busman, *et al.*, 2016).

Destacam-se na área de estudo 1, duas unidades de conservação estadual: A Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT) e a Área de Proteção Ambiental das Dunas do Rosado (APADR). A RDSEPT foi criada através da Lei Estadual nº 8.349 de 18 de julho de 2003 e como objetivos resguardar o modo de vida tradicional, assegurar atividades baseadas em sistema sustentável de exploração de recursos naturais, estas desenvolvidas tradicionalmente ao longo de gerações e adaptadas às condições ecológicas locais e que desempenham papel fundamental na proteção da natureza e na manutenção da diversidade biológica. A APADR foi criada recentemente pelo decreto estadual nº 27.695, de 21 de fevereiro de 2018 e tem por objetivo proteger a diversidade biológica, disciplinar o

processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais da respectiva área.

Apesar do Estuário Piranhas-Açu ter sofrido algumas inundações fluviais, na última década (anos de 2004, 2008 e 2009) (Figura 1.6), em decorrência de eventos extremos pluviométricos (Medeiros e Zanella, 2018; Medeiros, 2019), vem ultimamente sofrendo com os efeitos das inundações por maré. Frequentemente, por efeitos de maré, ruas e casas são invadidas por água, trazendo consequências negativas a várias comunidades do litoral setentrional do Rio Grande do Norte (Figura 1.7). A inundação por maré será objeto de pesquisa para a área de estudo 1.

Historicamente, o litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, mais precisamente o estuário Piranhas-Açu, possui registros de fortes efeitos sobre a mudança de conformação da paisagem litorânea. Como exemplo recente, a antiga Ilha de Manoel Gonçalves, localizada na foz do estuário Piranhas-Açu, por volta de 1880 a 1900 foi totalmente coberta pelo mar. Segundo alguns historiadores, os pescadores e comerciantes que habitavam o lugar se mudaram para outra ilha vizinha situada à direita da foz do Rio Açu e fundaram a atual cidade de Macau (Moura, 2016) (Figura 1.8).

Todo contexto histórico aliado à ocupação desordenada no local, à importância ambiental e econômica da região e, por fim, aos cenários de elevação do nível médio do mar, torna esta região uma área de grande apelo para o desenvolvimento de trabalhos científicos, como subsídio informações plausíveis para futuras tomadas de decisões sobre as adaptações necessárias ao enfrentamento das mudanças climáticas.



Figura 1.6 Eventos de inundações fluviais na UPH Bacias Difusas do Baixo Açú: A) Açú (1974) (Autor desconhecido); B) Macau-RN (2008) (Getúlio Moura); c) Ipanguaçu (2009) (Canindé Soares).



Figura 1.7 Eventos de inundações por marés no litoral norte do estado do Rio Grande do Norte: A) Centro de Macau-RN (19/03/2011) (Autor Desconhecido); B) Comunidade de Diogo Lopes, Macau-RN (03/01/2015) (Tiago Ezequiel); C) Guamaré-RN (19/02/2015) (Autor Desconhecido).

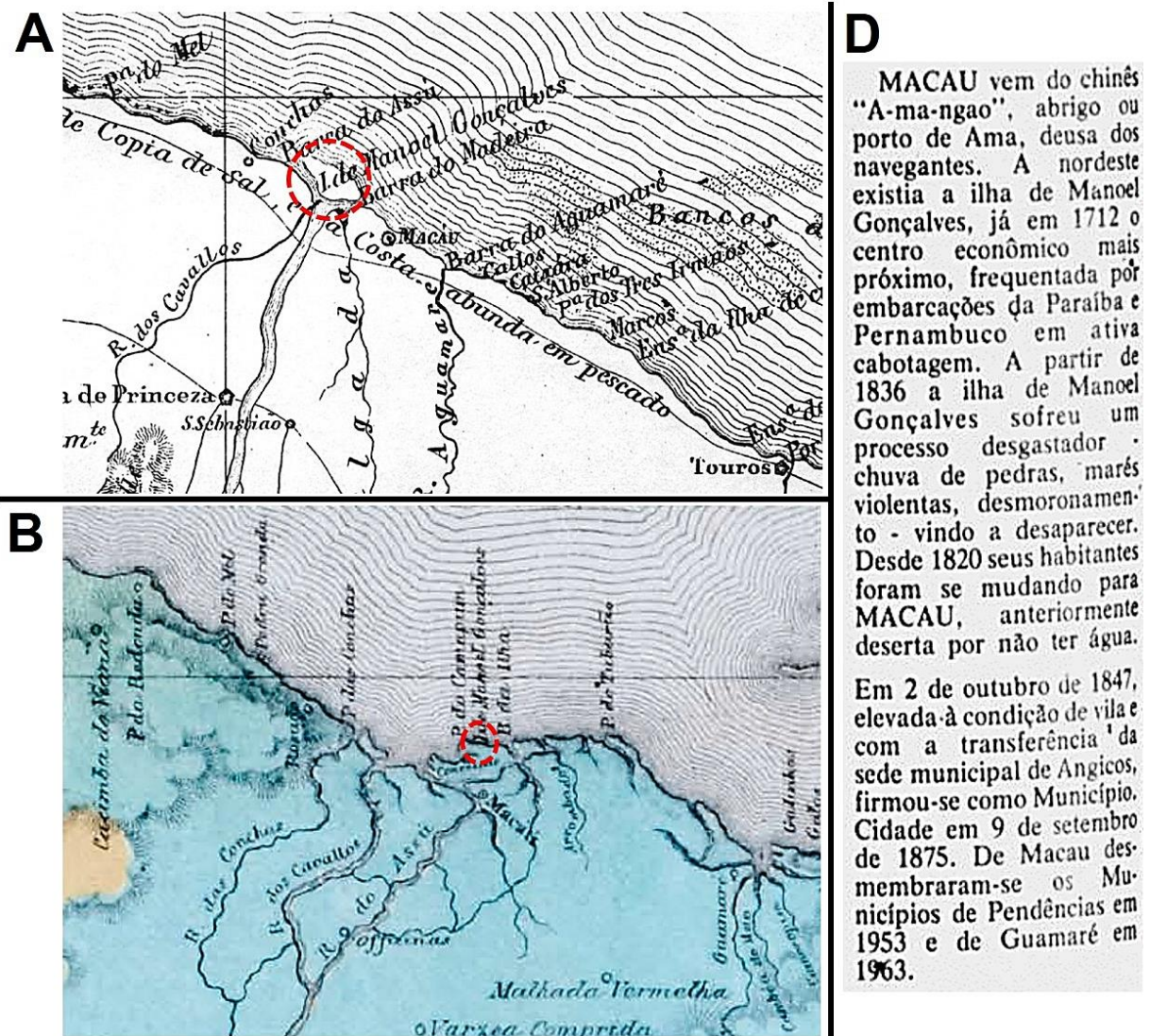


Figura 1.8 Recortes de publicações históricas sobre a antiga Ilha de Manoel Gonçalves (em destaque sob círculo pontilhado vermelho): A) Recorte da carta corographica elaborado por Conrad Jacob de Niemeyer (Coronel D'Engenheiros do Exército); B) em 1843; Recorte do mapa publicado no Atlas do Império do Brasil, em 1868; C) Recorte do trecho de um jornal local, em 23/08/1977 (Silva, 1977).

1.4.2 Bacia Uruguai

A segunda área em estudo é um recorte na Bacia Hidrográfica do Uruguai, Cidade de Itaquí, setor oeste do Estado do Rio Grande do Sul (Área de Estudo 2) (Figura 1.9). Esta região está sob influência de inundação do tipo fluvial ocasionada pelas elevações de nível do Rio Uruguai. Essa área é foco do estudo de caso apresentado no Capítulo 4.

A bacia hidrográfica do Rio Uruguai localiza-se no sul do Brasil e se estende pelos países vizinhos Argentina e Uruguai. Essa bacia marca a divisão entre os estados brasileiros do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e entre o Brasil e a Argentina. A bacia do Rio Uruguai

ocupa uma área total de extensão de 385.000 km², onde aproximadamente 274.300 km² estão localizados no Brasil, correspondendo a 3% do território nacional. Essa região hidrográfica possui um setor econômico de destaque, focado principalmente na melhoria das atividades agrícolas e industriais. A região hidrográfica do Rio Uruguai possui grande potencial hidrelétrico, com capacidade total de produção de 40,5 kW km², e considerando os lados brasileiro e argentino, uma das maiores relações de energia por quilômetro quadrado do mundo (ANA, 2015).

A área da bacia do Rio Uruguai tem clima temperado, com distribuição regular anual de chuvas e algumas altas entre maio e setembro, coincidindo com a estação do inverno no Hemisfério Sul. A disponibilidade hídrica natural da bacia hidrográfica do Uruguai é amplamente influenciada pelas variáveis espaciais e temporais significativas de alguns parâmetros climáticos, como o regime pluviométrico, que reflete diretamente nas atividades econômicas desenvolvidas na região, que são predominantemente no setor agrícola. (BID, 2008).

Muitas áreas foram desmatadas devido ao crescimento das atividades agroindustriais na região, o que levou a um desequilíbrio ambiental, desde o assoreamento dos rios à poluição da água com uso pesticidas e seus resíduos. Essa região possui uma cobertura vegetal original e remanescente do bioma Mata Atlântica brasileiro e do bioma floresta úmida de Araucária. A geomorfologia é dominada pelo relevo acidentado na bacia do alto Rio Uruguai, seguido por um trecho mais plano na região da campanha gaúcha com solo raso, razão pela qual o Rio Uruguai flui através de um substrato rochoso. Essa característica implica em um regime de vazão que segue a tendência das chuvas: quando ocorrem períodos de intensa precipitação, causam inundações nas áreas ribeirinhas e, da mesma forma, quando ocorrem períodos de seca, o regime de vazão é abruptamente reduzido, às vezes até para garantir requisitos hídricos das atividades humanas e socioeconômicas (ANA, 2015).

No Brasil, a região hidrográfica do Uruguai é composta por 11 sub-bacias hidrográficas: (1) Apuae-Inhandava, (2) Passo Fundo, (3) Turvo-Santa Rosa-Santo Cristo, (4) Piratinim, (5) Ibicuí, (6) Quaraí, (7) Santa Maria, (8) Negro, (9) Ijuí, (10) Várzea e (11) Butuí – Icamagua (ANA, 2015).

A área de estudo II compreende a área urbana da Cidade de Itaqui e está localizada às margens do Rio Uruguai, na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1.9). Corresponde à um recorte da sub-bacia de Ibicuí, a maior sub-bacia do Rio Uruguai, que tem o Rio Uruguai e os córregos Cambai e Sanga das Olarias como seus principais corpos d'água. A área de estudo II possui área territorial de 34.066,06 km² e população estimada em 39.049

habitantes, de acordo com o censo oficial brasileiro de 2016 do Instituto Nacional de Geografia e Estatística (IBGE). Esta área desempenha um papel importante no âmbito econômico regional, mas também nacional, devido ao cultivo de arroz, bem como a criação de bovinos Hereford e Braford e a criação comercial de suínos para abate. Essas atividades econômicas influenciam na qualidade ambiental da região, por estarem diretamente relacionadas ao uso da terra, ocupação da área e aumento do consumo de água (Bariani e Bariani, 2013).

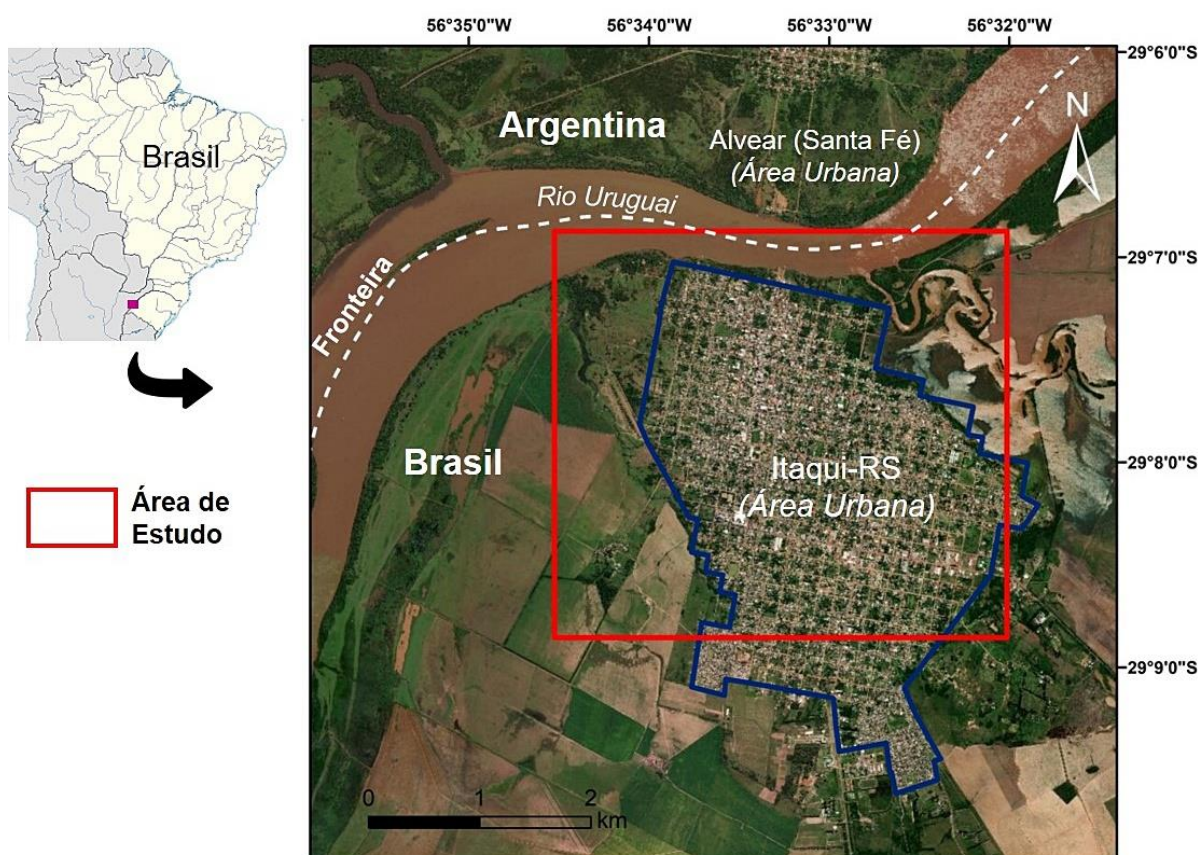


Figura 1.9 Localização da Área de Estudo II.

Itaqui foi assentada à beira do Rio Uruguai e, atualmente, essa localização ribeirinha é ocupada por comunidades, algumas de classe econômica muito baixa, que dependem do Rio para sua subsistência. Os moradores são frequentemente deslocados para regiões mais altas para se afastarem das constantes inundações. Itaqui sobrevive nas mesmas condições que a maioria das pequenas cidades brasileiras, com falta de recursos e de profissionais especializados que podem atuar na projeção e no desenvolvimento urbano ordenado. Esse fato se reflete na falta de estudos e informações que auxiliem o objetivo da gestão urbana de minimizar os impactos negativos na sociedade.

A ocupação “indevida” à margem do Rio Uruguai causa vários problemas que têm impacto direto na sociedade, incluindo principalmente (a mais agravante) inundações na área urbana. Um dos motivos é a expansão urbana desordenada, sem infraestrutura adequada, além da não observância das características naturais do ambiente ocupado que, como consequência, significa que é impossível que áreas próximas a rios e riachos absorvam inundações (Silva *et al.*, 2017). É importante destacar que, além da falta de recursos financeiros investidos no município, existe os gastos quase constantes com os danos causados pelo aumento do nível do rio. A maioria das famílias ribeirinhas vive nas chamadas “casas volantes” que são casas de madeira adaptadas para serem transportadas de um lugar para outro. Mas, em alguns eventos extremos, várias famílias perderam todos os seus pertences e, em alguns casos, até suas casas, deixando ao governo local o auxílio nas despesas dessas comunidades.

O processo de inundação do Rio Uruguai em Itaqui é um fenômeno natural que afeta a população ribeirinha há décadas, fato praticamente intrínseco à história da cidade (Figura 1.10). No entanto, apesar de ser um problema relevante para a população local, somente após 2011 foram publicados trabalhos enfatizando os perigos e riscos locais desse fenômeno natural. Entre os trabalhos publicados, destacam-se Saueressig (2012), Saueressig e Robaina (2015), Silva *et al.* (2017) e Silva (2017), todos estes, resultados de dissertações de mestrado em programas de pós-graduação no Brasil.

Saueressig (2012) enfatizou um zoneamento das áreas de risco a inundação da área marginal urbana do Cidade de Itaqui-RS. A autora organizou um inventário sobre as inundações ocorridas entre os anos de 1980 a 2010 e focou seus esforços em uma discussão socioambiental, desenvolvendo uma modelagem sem muitos critérios sólidos, principalmente no tocante a altimetria.

Silva (2017), objetivou a utilização de métodos geodésicos para elaboração de um modelo digital de elevação integrado com dados hidrológicos para monitoramento das áreas afetadas pelas inundações do Rio Uruguai na cidade de Itaqui. Entretanto, como relatado anteriormente, focou seus esforços na área marginal urbana da cidade de Itaqui-RS.

Assim, esta região de desponta com um forte apelo científico. Principalmente, pela ausência de trabalho científico que cubra toda a área urbana da cidade, mapeando os setores com perigo a inundação em elevada acurácia, e que forneçam informações inovadoras sobre o período de retorno dos fenômenos de inundação fluvial na área de estudo.



Figura 1.10 Eventos de inundações fluviais na Cidade de Itaqui-RS. A: Foto da Praça Marechal Deodoro, inundação extraordinária de 1983 (Saueressig, 2012); B: Inundação de 2015, Rio Uruguai avança pela Rua Independência, uma das principais vias do Centro de Itaqui (registro de Juliano Barbosa); C: Inundação do Rio Uruguai na Cidade de Itaqui em 11 de junho de 2017 (registro de Júnior V. Braga).



Capítulo 2 – Estrutura Metodológica

No desenvolvimento das pesquisas que culminaram com esta Tese foi necessário a utilização de um conjunto de equipamentos e instrumentos que possibilitaram a construção e coleta dos dados, além de ferramentas computacionais para a organização, processamento e análise. A linha de ação integrada e transdisciplinar, envolveu 4 etapas metodológicas, detalhadas a seguir (Figura 2.1):

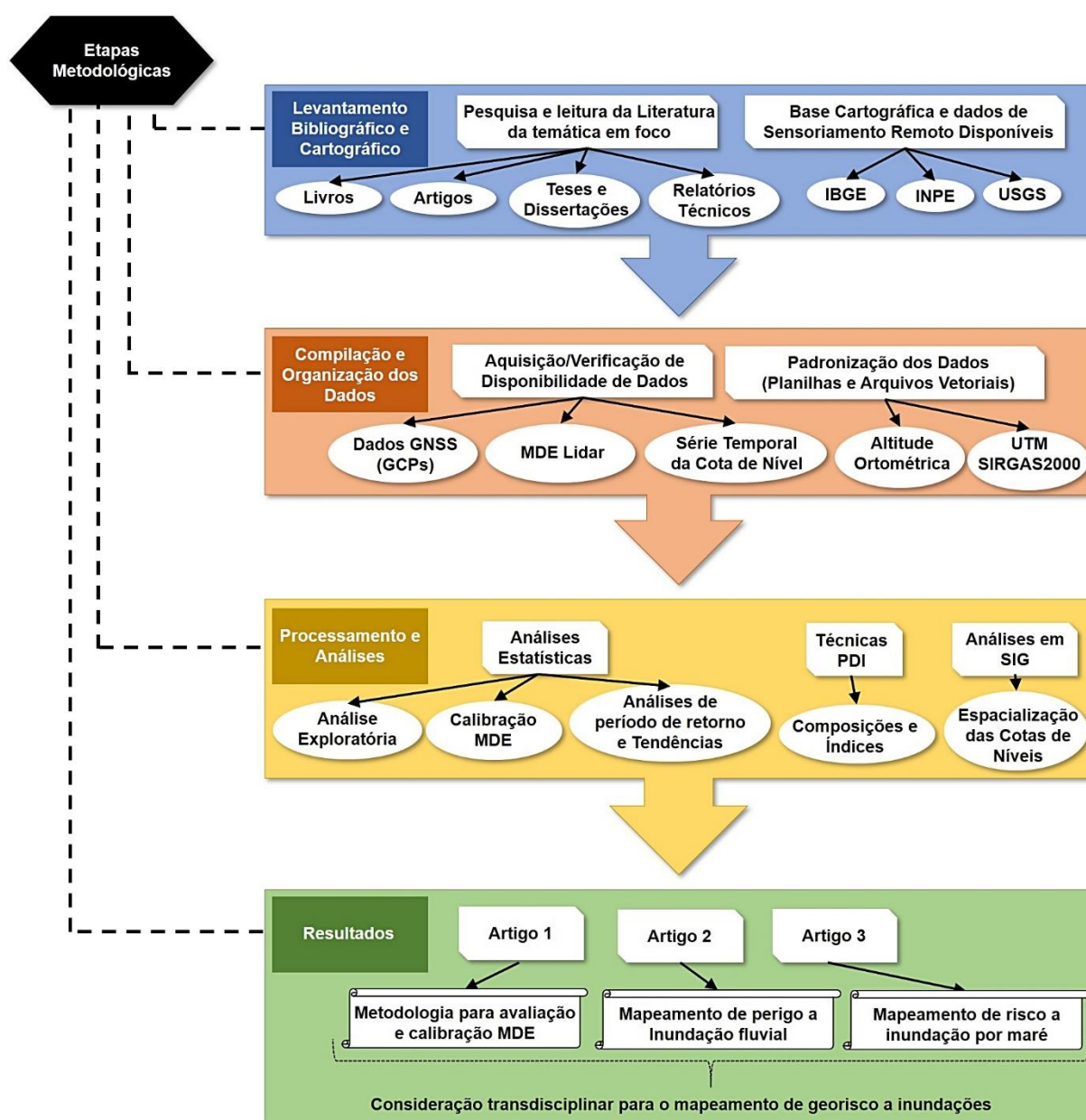


Figura 2.1 Fluxograma metodológico.

2.1 Levantamento Bibliográfico e Cartográfico

Foi realizada uma pesquisa minuciosa e leitura de toda a literatura disponível e considerada importante pelo autor, sobre a temática em foco, principalmente em artigos científicos, teses e dissertações, livros e relatório técnicos. Estudos sobre desastres naturais, inundação, modelos digitais de elevação (MDE), geodésia de precisão com Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS da sigla em inglês para *Global Navigation Satellite System*) e mudanças climáticas foram assuntos fundamentais na pesquisa. Em paralelo, foram realizados todo o levantamento da base cartográfica disponível para as áreas em estudo. Além de portais eletrônicos de disponibilização de dados espaciais, como o IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e USGS - *United States Geological Survey* (Serviço Geológico dos Estados Unidos), foram realizadas buscas de mapas históricos em bibliotecas públicas, no objetivo de compreender a dinâmica da paisagem espacial dos setores a serem mapeados.

2.2 Compilação e Organização dos Dados

A base de dados, compreende basicamente 3 tipos de dados: I) Os Pontos de Controle de Terreno (GCP da sigla em inglês para *Ground Control Points*) de alta acurácia (GNSS); II) os Modelos Digitais de Elevação (MDE); e III) as séries temporais das cotas dos níveis do Rio Uruguai (área de estudo 2) e das marés (área de estudo 1).

Nessa tese, o referencial altimétrico padronizado para todos os dados foi a Altitude Ortométrica (H). Segundo Torge (2001), a altitude ortométrica (H) é definida como a distância linear entre um ponto sobre a superfície física e o geóide medida sobre a vertical do lugar. Também, pode ser definida como a diferença entre a Altitude Geométrica (h) e a Ondulação Geodal (N) (figura 2.2). Adotou-se para este trabalho o modelo geoidal MAPGEO2015.

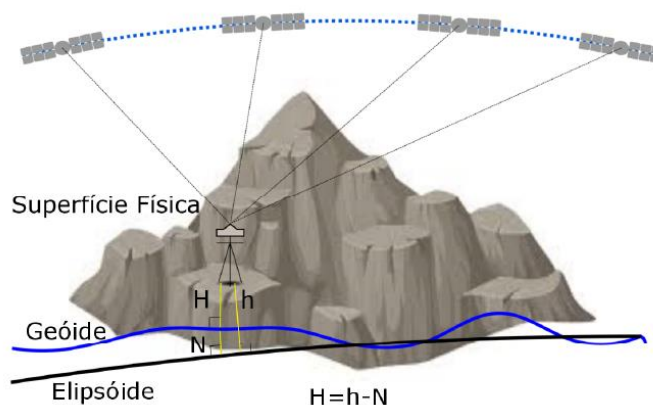


Figura 2.2 Obtenção da altitude ortométrica (H). Adaptada de Silva (2017).

2.2.1 Pontos de Controles de Terreno (GCP)

Foram utilizados pontos de controle com dados oriundos das seguintes redes: (a) pontos da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do IBGE; (b) ponto da Rede Planimétrica do IBGE; (c) pontos da Rede GNSS do Litoral Setentrional (RGLS) do Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GEPRO/UFRN); (d) pontos de controle GNSS coletados em campo e ligadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), denominados de Coletora GNSS (GEOPRO/UFRN); e, (e) pontos de controle GNSS coletadas em campo e logadas ao SGB, denominadas de pontos UNIPAMPA.

A Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) do IBGE foi construída através da técnica de nivelamento geométrico de alta precisão, possibilitando a determinação de estações geodésicas dotadas de um valor de altitude referida ao Nível Médio do Mar (NMM) em Imbituba-SC. Essas estações são denominadas Referências de Nível (RRNN) e foram implantadas em todo o território brasileiro ao longo das rodovias e ferrovias a intervalos de 3 km, nos primeiros levantamentos e atualmente 2 km. Hoje a rede possui aproximadamente 68000 RRNN, e estão disponíveis no Banco de Dados Geodésicos (BDG) que podem ser adquiridos acessando o Portal Brasileiro de Dados Abertos (PBDA), pelo endereço <http://dados.gov.br/dataset/cged_bdg_rn>.

A Rede GNSS do Litoral Setentrional (RGLS) do Estado do Rio Grande do Norte é uma rede de monitoramento GNSS, implantada pelo Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Santos & Amaro, 2011; Santos *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2015). Essa rede foi construída para dar apoio básico aos levantamentos geodésicos de monitoramento costeiro nas áreas próximas à Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT). As altitudes ortométricas das estações da RGLS foram determinadas com precisão centimétrica em relação ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), pelo método de posicionamento relativo estático usando estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). As altitudes ortométricas da RGLS foram calculadas por GNSS no método relativo, usando referências de nível (RRNN) da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP).

Os pontos de controle da base de dados do GEOPRO/UFRN, foram adquiridos em campo por meio de receptores GNSS, utilizando o método de posicionamento relativo estático GNSS com estações da RBMC.

Os pontos de controle da Universidade Federal do Pampa foram adquiridos com receptores GNSS (L1/L2) pelo modelo método “*Stop and Go*”, com duração de 5 min de

rastreio para cada ponto coletado (Silva *et al.*, 2017). *Stop and Go* é um método semi-cinemático, também conhecido como pseudo-estático, pode ser entendido como um estágio intermediário entre estático e cinemático (Gama *et al.*, 2012).

Todos os pontos de controle foram padronizados para o dado horizontal SIRGAS2000, e altitudes ortométricas vinculadas ao SGB (modelo geodésico MAPGEO2015).

2.2.2 Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Nesta pesquisa, adotou-se o termo genérico Modelo Digital de Elevação (MDE), e que é definido como uma representação matemática do terreno contendo pontos de elevação numa área contígua (Miler, 2004; Ma, 2005; Jensen, 2009). Na Área de Estudo I (recorte regional), foram utilizados MDE oriundos da Missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e de LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportado. Enquanto no recorte local da área de Estudo I, foi utilizado somente o MDE LiDAR aerotransportado.

Os dados do SRTM, possuíam uma resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30m no Equador), resolução radiométrica de 16 bits, sistema de coordenadas geográficas, Datum horizontal WGS-1984 e Datum vertical EGM96 (Earth Gravitational Model 1996). Esses dados, foram adquiridos nos servidores da Earth Data (NASA), a partir da interface desenvolvida por Derek Watkins (<http://dwtkns.com/srtm30m/>). Tal interface possui, como principal vantagem das demais, a disponibilização de cenas do SRTM com um excelente processo de correção de *voids*, que são espaços vazios onde nenhum valor de elevação pôde ser determinado. A existência de *voids* causa problemas significativos na utilização de um MDE SRTM, especialmente na aplicação de modelos hidrológicos que requerem superfícies de fluxo contínuo.

O dado do MDE LiDAR aerotransportado foi construído pela PETROBRAS, cedido em termo de cooperação técnica entre a referida instituição e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e disponibilizado pelo Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG), mediante termo de confidencialidade. O levantamento se deu entre fevereiro e setembro de 2012, através de aerofotogrametria integrada. Nesse aerolevanteamento, foi utilizado um equipamento modelo ALS60 fabricado pela Leica Geosystems. A densidade média de pontos foi de 4,2 por m², com frequência de 200.000 pulsos por segundo (200 kHz) e ângulo de abertura (FOV) 26°. A frequência de operação adotada foi de 160,2 kHz, com frequência de perfilamento de 65 Hz e velocidade média da aeronave de 190 km/h. O espaçamento médio de pontos foi de 0,41 m (na direção do voo) e de 0,80 m, na direção transversal ao voo. O sistema geodésico de referência adotado para planimetria foi o

SIRGAS2000 e o sistema de projeção UTM. Para a altimetria utilizou-se a altitude ortométrica, vinculada ao SGB.

2.2.3 Séries temporais das cotas dos níveis em estudo

Para a Área de Estudo I, região sob influência de inundação por maré, foram obtidos os dados locais da Maré Astronômica (MA) e Maré Meteorológica (MM). Para este estudo, a variação do nível do mar foi representada pela soma da maré meteorológica e astronômica (SMC-Brasil, 2018). Para compor a série histórica local da MM, o nível máximo anual da maré foi obtido a partir dos dados do ponto 19 (Lat. 4.821 ° W / Long. 36.500 ° S) do banco de dados GOS (Global Ocean Surge) do Projeto SMC-Brasil (SMC-Brasil, 2018). Esse banco de dados é uma seleção de séries de reanálise regional, localizadas ao longo da costa brasileira, construídas com uma simulação numérica forçada com campos de pressão atmosférica e ventos e validadas para a região. Cada uma das séries tem duração de 60 anos (1948-2008) com intervalo de 1 hora (SMC-Brasil, 2018).

O nível máximo da maré astronômica anual foi utilizado a partir dos dados de previsão da maré astronômica divulgados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), vinculada à estação maregráfica do Porto de Macau (Lat. 4 ° 49 '05 "S / Long 37 ° 02'04 "W), durante o período de 1998 a 2018. Esses dados estavam disponíveis em tabelas que mostram os valores máximos e mínimos diários das alturas astronômicas das marés.

Para a Área de Estudo II, região sob influência de inundação fluvial, foram utilizados os dados das máximas anuais dos níveis fluviométricos do Rio Uruguai. Obtidos pela estação de monitoramento do nível do rio "ITAQUI" nº 75900000 (latitude: -29° 07 '39 " ; longitude: -56° 33' 45"), por 76 anos de informações históricas (entre 1942 e 2017). Todos os registros de nível máximo anual foram vinculados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) com suas respectivas altitudes ortométricas. Esses dados foram obtidos através do Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres do Rio Grande do Sul (SMAD), no site <http://www.smad.rs.gov.br/> (último acesso: 25 de maio de 2018). O SMAD é um projeto implementado pela Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Sul, que é usado pela defesa civil e outras organizações competentes para monitoramento e avisos de desastres. Além disso, é usado para gestão ambiental e monitoramento de recursos naturais.

2.3 Processamento e Análises

2.3.1 Análises Estatísticas

Inicialmente foi realizada a análise exploratória dos dados, onde buscou-se conhecer as características do comportamento dos conjuntos de dados. Uma vez, que esta etapa é crucial para a escolha dos testes estatísticos, obedecendo as premissas de cada um. Em seguida, outras análises estatísticas foram executadas durante esta pesquisa, em destaque: a) Análises de regressões lineares – foram utilizadas para a realização da calibração dos MDE; b) Análises de tendências - foram aplicadas no intuito de investigar as tendências das séries temporais dos níveis; e c) Análise do Período de Retorno – Aplicados para investigar a probabilidade de um evento hidrológico ser correspondido ou excedido.

Em todas as análises estatísticas foi adotado o valor de significância de 5% (Zar, 2010) e foram realizadas no software R v.3.4.1 (R Development Core Team, 2019).

2.3.2 Aplicação de Técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI)

Realces no contraste das imagens orbitais, além de composições de bandas e aplicação de índices (NDWI – Índice de água por diferença normalizada) foram técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) empregadas para permitir a interpretação dos dados. Para aplicar as técnicas de PDI, foram utilizados os softwares ER Mapper 7.1 e o ENVI 5.3.

2.3.3 Análise em Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Foi construído um ambiente SIG para ser alimentado com todos os planos de informações e geração dos mapas. Os resultados das análises estatísticas serviram de base para aplicação de álgebra de mapas no ambiente SIG. Na confecção e manutenção do SIG, foi utilizado o software ArcMap 10.1 (ESRI, 2011).

2.4 Resultados

Em termos de resultados, podemos separar sistematicamente em 3 blocos:

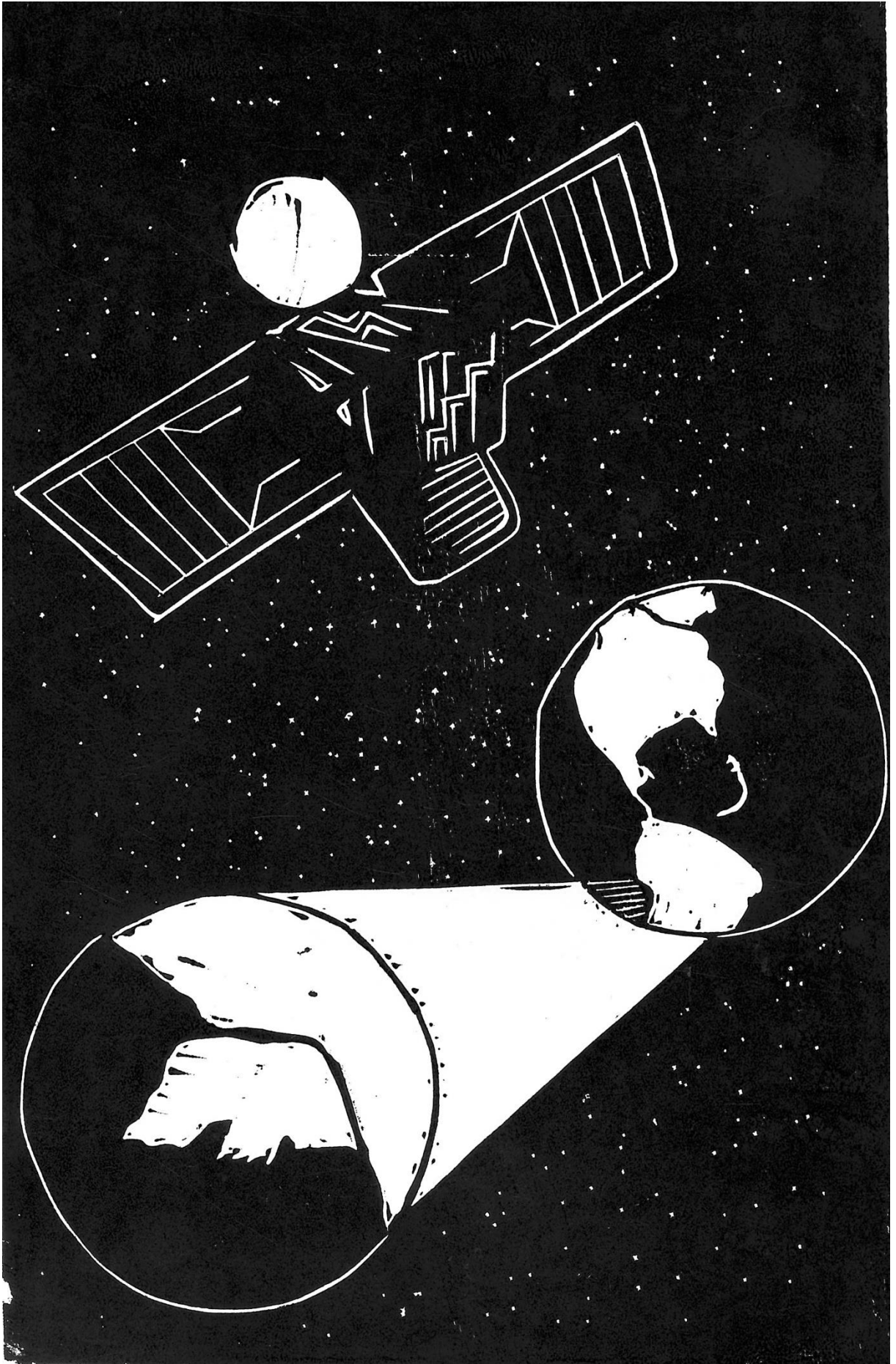
1) Apresentado no Capítulo 3 (Artigo 1), ocorreu o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação e calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDE). A precisão vertical do modelo digital de elevação do SRTM original, para a Área de Estudo I, mostrou ser aproximadamente duas vezes maior do que o valor de 6,20m, apresentado nas especificações originais do produto. Esse valor chegou a ser melhorado em 26 a 29% após calibração com pontos de controle de alta acurácia vertical. A geomorfologia do terreno influencia no erro

altimétrico do MDE SRTM. O aspecto influência de forma não linear no erro do MDE, enquanto em áreas de menores declividades a RMSE tende a diminuir. Os resultados encontrados neste trabalho, aliados aos resultados encontrados na literatura, corroboram com a hipótese da adoção obrigatória da “calibração de MDE” por meio de pontos de controle de alta precisão, como etapa de pré-processamento digital. Visando a melhoria da precisão vertical, aplicado em trabalhos regionais ou locais que necessitem dessas informações.

2) Apresentado no Capítulo 4 (Artigo 2), realizou-se o mapeamento das áreas de perigo a inundação na Área de Estudo II, uma região sob influência de inundação fluvial. Como princípio, utilizou-se um MDE calibrado e uma robusta análise estatística para obtenção do período de retorno das cotas máximas das inundações no Rio Uruguai. O DEM calibrado mostrou uma melhoria de 68,15% na precisão vertical ($RMSE = 1,00$ m). Foram determinadas cinco classes de perigos a inundação: perigo de inundação extremamente alto, perigo de inundação alto, perigo de inundação moderado, perigo de inundação baixo e área não inundável. Os episódios de inundação, com tempo de retorno de 100 anos, foram modelados com nível altimétrico de 57,24m. Níveis altimétricos acima de 51,66 m têm um alto potencial de causar danos, afetando principalmente propriedades e estabelecimentos públicos nas periferias norte e oeste da cidade. A avaliação das áreas que podem ser potencialmente inundadas pode ajudar a reduzir o impacto negativo dos eventos de inundação, apoiando o processo de planejamento do uso da terra em áreas expostas ao perigo de inundação. O trabalho comprova que o máximo anual do nível do Rio Uruguai está em uma tendência positiva, ou seja, a sua frequência e magnitude só irá aumentar nos próximos anos. Este artigo, também demonstra que técnicas bem aplicadas baseadas em geotecnologias, como sensoriamento remoto, SIG e geodésia de alta precisão, proporcionam resultados que podem ser muito eficazes na gestão.

3) Apresentado no Capítulo 5 (Artigo 3), realizou-se um estudo de caso que aborda uma metodologia de mapeamento de risco de inundação em cenários de mudanças climáticas em uma região com forte apelo ambiental e social (Área de Estudo I). Foi possível mapear com robustez a complexidade das inundações das marés ocorridas no estuário Piranhas-Açú, bem como o risco em seu potencial probabilístico para os próximos anos. Foi constatado que aproximadamente 118,26 km² do estuário estão em alto risco e risco extremamente alto de inundação por maré e necessitando urgentemente de medidas de mitigação. Este estudo de caso pode servir de base para futuras ações de gerenciamento, bem como, servir de modelo para aplicação de mapeamento de riscos em outras áreas costeiras.

Todos os resultados são apresentados minuciosamente nos capítulos a seguir.



Capítulo 3 – Acurácia vertical e calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil (1º Artigo¹)

Vertical accuracy and calibration of Digital Elevation Models (DEMs) for the Piranhas-Assu River Basin, Rio Grande do Norte, Brazil

Paulo Victor do Nascimento Araújo^{1, 2}; Venerando Eustáquio Amaro^{1, 3}; Alex Vinícius Capistrano Alcoforado³ & André Luis Silva dos Santos⁴

¹*Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG). Departamento de Geologia. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Caixa Postal 1524, Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal-RN, Brasil*

²*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Campus Macau. Rua das Margaridas, 300, COHAB, CEP 59500-000, Macau-RN, Brasil*

³*Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo (PPGCEP)(UFRN)*

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

*E-mails: paulo.araujo@ifrn.edu.br; venerando.amaro@gmail.com;
alexalcoforado@gmail.com; andresantos@ifma.edu.br*

Resumo

A crescente demanda em uso de dados altimétricos de alta precisão vertical, para o uso em trabalhos ambientais, vem aumentando de forma significativa nos últimos anos. Entretanto, cuidados especiais devem ser tomados para a utilização desse tipo de produto, principalmente na verificação do seu erro vertical. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade vertical e desenvolver uma metodologia de calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) obtidos a partir dos levantamentos realizados pela *Shuttle Radar Topographic Mission* e de sensores aerotransportados *Light Detection And Ranging* na Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, região norte do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Essa avaliação e calibração foi realizada para duas porções dentro da área de estudo: uma regional e outra local. Na área regional foi utilizado apenas o MDE SRTM, enquanto que na área local, foram utilizados os MDEs SRTM e LiDAR

¹ Artigo publicado no periódico “*Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ)*” (ISSN 0101-9759). Como citar: ARAÚJO, P.V.N.; AMARO, V.E.; ALCOFORADO, A.V.C.; SANTOS, A.L.S. Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v.41(1), p. 351-364, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_351_364

aerotransportado. Para calibração foi utilizada uma malha com pontos de controle altimétrico de alta precisão vertical. Os resultados demonstraram que nas áreas de estudo, o MDE SRTM apresentou uma avaliação satisfatória de precisão vertical, melhorada (de 26 a 29%), após sua calibração. Na área local, o uso do MDE LiDAR aerotransportado se mostrou com melhor precisão vertical em comparação ao MDE SRTM, e também foi melhorado (15%) após sua calibração com pontos de controle. Esta pesquisa demonstra a necessidade de avaliação e calibração regional/local do erro vertical de qualquer MDE, antes do seu uso, em trabalhos que necessitem de informações verticais.

Palavras-chaves: Altimetria; GNSS; SRTM; LiDAR Aerotransportado.

Abstract

There is a growing need for high resolution altimetry data to use in environmental research in the last years. Therefore, addition criteria must be applied for this data usage, especially due to vertical error. This paper focuses on vertical error evaluation and calibration methodology of Digital Elevation Models (DEM) obtained with Shuttle Radar Topographic Mission and with airborne Light Detection and Ranging in the Piranhas-Açu river basin; north part of Rio Grande do Norte State, Brazil. The evaluation and calibration was conducted in two sectors of the study area: regional and local. The regional sector was evaluated with SRTM data only and the local sector with DEM from SRTM and airborne LiDAR. The calibration used a network of high vertical accuracy altimetric control points data. The results show that the in the study area the SRTM DEM accuracy is satisfactory and was improved by 26-29% after calibration. In the local area, airborne LiDAR is more accurate than SRTM and was also enhanced by control points calibration (15%). This paper demonstrates the need for vertical error analysis and calibration in DEM prior to topographic use.

Keywords: Altimetry; GNSS; SRTM; Airborne LiDAR.

3.1 Introdução

A utilização de modelos digitais de elevação (MDEs) com alta acurácia vertical para subsidiar estudos ambientais, tem aumentado significativamente nos últimos anos, principalmente em estudos com enfoques hidrológicos e modelagem de inundações e enchentes (e.g., Valeriano & Carvalho Júnior, 2003; Pires *et al.*, 2005; Medeiros *et al.*, 2009; Costa *et al.*, 2010; Moura *et al.*, 2014; Ribeiro & Ferreira, 2014; Chen *et al.*, 2017; Petrasova *et al.*, 2017). Entretanto, observa-se uma carência na oferta de modelos com alta acurácia vertical para recortes regionais e locais, principalmente nos modelos disponibilizados gratuitamente. Um dos

principais desafios da modelagem hidrológica em detalhe está na caracterização morfológica e delineamento da rede hidrográfica, e estas necessitam de MDEs com uma elevada precisão vertical (Pires *et al.*, 2005).

A qualidade de um MDE depende do tipo e da magnitude dos erros a ele relacionados. É importante considerar que os erros são inevitáveis, visto que os MDEs são visões simplificadas da realidade, submetidas a um processo de generalização. Os parâmetros modelados são, portanto, inerentemente imprecisos embora sua representação possa realizar-se com mais ou menos exatidão, dependendo do método de coleta de dados utilizados (Chagas *et al.*, 2010); além disso, os modelos são criados, distribuídos e usados muito frequentemente sem qualquer referência à magnitude do erro implícito ou para os métodos aplicados para sua detecção ou correção (Felicísimo, 1994). A acurácia vertical de um MDE e de seus atributos topográficos derivados, dependem diretamente da qualidade e densidade dos dados primários, da estrutura dos dados (matricial ou vetorial), da resolução espacial, da complexidade topográfica da área modelada e dos algoritmos utilizados nas interpolações de modelagens (Thompson *et al.*, 2001). Sobre a complexidade topográfica, os MDEs podem ser influenciados pelas características do terreno e comumente apresentam qualidade superior em áreas de relevo pouco movimentado e declive suave (Jarvis *et al.*, 2004).

Um dos MDEs gratuitos comumente utilizados em pesquisas ambientais no Brasil são os modelos obtidos nos levantamentos realizados pela *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). Os dados de elevação SRTM são derivados do sensor de Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR) nas bandas C (5,6cm – 5,3GHz) e X (3,1cm – 9,6GHz) (Gorokhovich & Youtianiouk, 2006; Van Niel *et al.*, 2008). A primeira versão dos dados da missão SRTM foi disponibilizada em 2003 e era fornecida pela *United States Geological Survey*. Inicialmente, para os Estados Unidos os dados foram disponibilizados a uma resolução de 1 arco-segundo (aproximadamente 30m no equador), mas para o resto do mundo disponibilizaram um segundo produto de 3 arco-segundos (aproximadamente 90m no equador). Em 23 de setembro de 2014, a Casa Branca anunciou que os dados topográficos de alta resolução gerados a partir da missão SRTM, deveriam ser disponibilizados globalmente até o final de 2015 (NASA, 2017). Entretanto, o produto possui um erro médio vertical bastante elevado para a América do Sul. O erro absoluto vertical e o erro relativo vertical médio associado a esse produto, para as cenas localizadas na América do Sul são de 6,20 e 5,50 metros, respectivamente (Rodríguez *et al.*, 2006).

Mesmo assim, para o desenvolvimento de trabalhos a níveis global ou de grandes proporções regionais, a utilização de MDE SRTM se torna extremamente eficaz ou satisfatória.

Mas, quando se deseja utilizar o MDE SRTM em pequenas escalas regionais ou locais, o seu erro vertical se evidencia como um grande problema (Correa *et al.*, 2017).

Ultimamente, uma das alternativas encontradas para a aquisição de MDE de alta qualidade vertical para pequenas regiões foi o uso de sensor LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportado. O uso de *laser scanners* aerotransportados no Brasil é uma das mais recentes tecnologias para a obtenção de modelos digitais de Elevação (MDE), em alta precisão e em curto espaço de tempo, entretanto ainda demandam elevados custos operacionais (Aguilar *et al.*, 2010; Macedo *et al.*, 2013).

Nesse sentido, este estudo objetiva avaliar a qualidade vertical, fatores geomorfológicos influenciadores no erro vertical e calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) obtidos a partir do SRTM e do LiDAR aerotransportado na Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, porção norte do Estado do Rio Grande de Norte, Brasil. Tendo por finalidade, o desenvolvimento metodológico de avaliação e calibração de MDEs com elevada acurácia vertical para serem utilizados em futuros estudos ambientais, principalmente com enfoques hidrológicos e modelagem de inundações e enchentes.

3.2 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu é a maior da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, com área total de 43.683 km². Seu território divide-se entre os Estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%). Totalmente inserida em território de clima muito quente e semiárido, a bacia apresenta chuvas concentradas em poucos meses do ano (chuvosa se atrasando para o outono) e um padrão de forte variabilidade interanual, caracterizado pela alternância entre anos de pluviosidade acima da média, regular e anos consecutivos de valores abaixo da média, que resultam em secas prolongadas e baixa disponibilidade hídrica (ANA, 2016). Assim como os demais rios da bacia, o rio Piancó-Piranhas-Açu é um rio intermitente em condições naturais. Sua perenização ocorre por meio de dois reservatórios de regularização construídos pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS): Curema/Mãe d'Água, na Paraíba, e Armando Ribeiro Gonçalves, no Rio Grande do Norte. Esses reservatórios correspondem às principais fontes hídricas da bacia, responsáveis inclusive pelo atendimento de demandas de águas externas, que estão associadas a bacias adjacentes. Cabe destacar que a bacia, brevemente, também será receptora de água do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). A bacia Hidrográfica Piranhas-Açú é subdividida em 11 Unidades de Planejamento

Hidrológico (UPHs), determinadas com base na hidrografia, presença de reservatórios de grande porte e unidades de gestão adotadas pelos Estados (ANA, 2016).

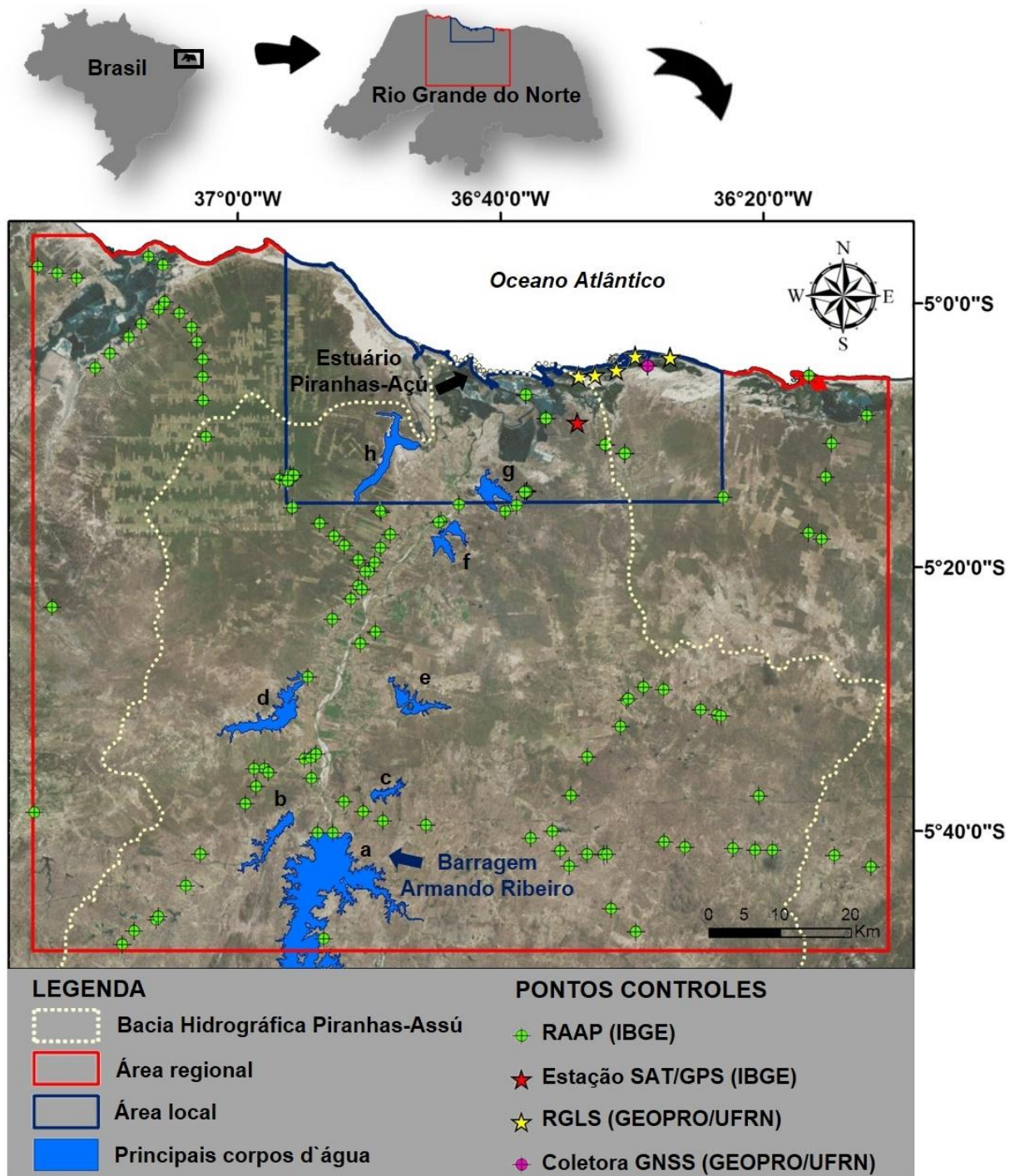


Figura 3.1 Área de estudo e distribuição dos pontos de controle: A região delimitada em vermelho corresponde a Área regional, e em azul corresponde a Área local (região do estuário). Principais corpos d'água presentes: a) Barragem Armando Ribeiro; b) Açude Mendubim; c) Açude Pataxós; d) Lagoa do Piató; e) Lagoa da Ponta Grande; f) Lagoa da Pedra; g) Lagoa do Queimado; e h) Lagoa Lagamar.

Uma das UPH de extrema importância para este sistema é a UPH Bacias Difusas do Baixo Açu. Esta, é responsável pelo deságue na foz do estuário Piranhas-Açu de todo o sistema hídrico. O setor industrial dessa UPH compreende essencialmente a exploração mineral, especialmente de sal, petróleo e gás. A extração de petróleo e gás natural é uma atividade de grande importância na bacia e na economia do Rio Grande do Norte, em função dos *royalties* gerados. Entre os quinze municípios potiguares produtores, nove pertencem a região em foco: Alto do Rodrigues, Areia Branca, Assú, Carnaubais, Macau, Pendências, Porto do Mangue, Serra do Mel e Upanema (IDEMA, 2005). A aquicultura e a pesca artesanal também têm sua importância na UPH Bacias Difusas do Baixo-Açu, além da agricultura irrigada, carcinicultura e salinas, que representa os principais segmentos de usuários do recurso hídrico da região (ANA, 2016).

Nesta pesquisa, a área de estudo compreende uma área de aproximadamente 10.742 km², na porção norte do Estado do Rio Grande do Norte. Essa área foi denominada como área regional, e foi delimitada com o intuito de cobrir toda a região da UPH Bacias Difusas do Baixo Açu, região esta que abrange todo o setor pós Barragem Armando Ribeiro Gonçalves (Figura 3.1). Além disso, dentro da área regional, foi recortada uma segunda área, denominada área local, de aproximadamente 536 km² e que envolve toda a região de estuário da área de estudo. Sobre a geomorfologia da área em estudo, observa-se a Superfície Cárstica e os Tabuleiros Costeiros, compostos por relevos tabulares amplos e pouco dissecados e por superfície pediplanada. Na foz do estuário Piranhas-Açu, nota-se uma ampla planície flúvio-marinha que constitui a Faixa Litorânea (Barreto *et al.*, 2004; ANA, 2016).

3.3 Metodologia

A metodologia empregada possui por princípio a utilização de pontos de controle de alta precisão vertical, oriunda de diversas bases de referências, aliada a uma robusta análise estatística para o emprego da avaliação e calibração dos MDEs SRTM e LiDAR, em duas áreas com dimensões diferentes, na região da UPH Bacias Difusas do Baixo Açu.

3.3.1 Base de Dados

Os dados necessários para a realização deste trabalho, constituem-se de 3 (três) principais tipos de fontes: I) Bases de referências geodésicas (GNSS); II) Modelo digital de elevação da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*); e III) Modelo digital de elevação de sensor aerotransportado LiDAR (*Light Detection And Ranging*).

3.3.1.1 Bases de Referências Geodésicas - Pontos de Controle

Neste estudo, tomou-se como pontos de controles verticais a altimetria ortométrica, aqui denominadas como “Bases Referências” ou “Pontos de Controles. Foi construída uma malha com 110 pontos de controles com dados oriundos de 4 redes: (a) 99 pontos da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do IBGE; (b) 1 ponto da Rede Planimétrica do IBGE; (c) 5 pontos da Rede GNSS do Litoral Setentrional (RGLS) do GEPRO/UFRN; e (d) 5 pontos de controle GNSS coletados em campo, denominados de Coletora GNSS (GEOPRO/UFRN) (Figura 3.1).

A Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) do IBGE foi construída através da técnica de nivelamento geométrico de alta precisão, possibilitando a determinação de estações geodésicas dotadas de um valor de altitude referida ao Nível Médio do Mar (NMM) em Imbituba-SC. Essas estações são denominadas Referências de Nível (RRNN) e foram implantadas em todo o território brasileiro ao longo das rodovias e ferrovias a intervalos de 3 km, nos primeiros levantamentos e atualmente 2 km. Hoje a rede possui aproximadamente 68000 RRNN, e estão disponíveis no Banco de Dados Geodésicos (BDG) que podem ser adquiridos acessando o Portal Brasileiro de Dados Abertos (PBDA), pelo endereço http://dados.gov.br/dataset/cged_bdg_rn. Para este estudo, foram utilizados 99 pontos de estações da RAAP que estavam dentro da área de estudo e com um bom estado de conservação. Além dessas, foi também utilizada uma Estação Planimétrica (SAT/GPS) da Rede Planimétrica do IBGE (estação nº 92428, localizada no município de Macau-RN).

Também, foram utilizados 5 pontos da Rede GNSS do Litoral Setentrional (RGLS) do Estado do Rio Grande do Norte. A RGLS é uma rede de monitoramento GNSS, implantada pelo Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) (Santos & Amaro, 2011; Santos *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2015). Essa rede foi construída para dar apoio básico aos levantamentos geodésicos de monitoramento costeiro na área próxima à Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão (RDSEPT). As altitudes ortométricas das estações da RGLS foram determinadas com precisão centimétrica em relação ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), pelo método de posicionamento relativo estático usando estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). As altitudes ortométricas da RGLS foram calculadas por GPS no método relativo, usando referências de nível (RRNN) da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP). Foram ainda utilizados 5 pontos de controle da base de dados do GEOPRO/UFRN. Esses pontos foram adquiridos em campo por meio de receptores GNSS, utilizando o método de posicionamento relativo estático GNSS com estações da RBMC.

Todos os 110 pontos das Bases Referências foram padronizados para o *Datum* horizontal SIRGAS2000, sistema de projeção UTM (Fuso: 24S / MC: 39° W.Gr) e modelo geoidal MAPGEO2010. Por fim, os dados foram exportados em formato *shapefile* com o auxílio do software ArcMap 10.1 (ESRI, 2011).

3.3.1.2 Shuttle Radar Topography Mission - MDE SRTM

Foram utilizados dados do SRTM com resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30m no equador), resolução radiométrica de 16 bits, sistema de coordenadas geográficas, *Datum* horizontal WGS-1984 e *Datum* vertical EGM96 (*Earth Gravitational Model 1996*). Esses dados, foram adquiridas nos servidores da *Earth Data* (NASA), a partir da interface desenvolvida por *Derek Watkins* (<http://dwtkns.com/srtm30m/>). Essa interface possui como principal vantagem das demais, a disponibilização de cenas do SRTM com um excelente processo de correção de *voids* (espaços vazios onde nenhum valor de elevação pôde ser determinado). A existência de *voids* causa problemas significativos na utilização de um MDE SRTM, especialmente na aplicação de modelos hidrológicos que requerem superfícies de fluxo contínuo. Foram realizados os downloads das cenas: S05W038, S05W037, S06W038 e S06W037.

Inicialmente as cenas foram submetidas ao processo de mosaico, no intuito de criar uma só imagem que abrangesse toda área de estudo (Jensen, 2009). Em seguida foram substituídos por “0” (zero), os valores dos pixels negativos e aplicado uma máscara do limite continental para extração da porção oceânica. Por fim, foram extraídos os valores das alturas ortométricas dos pixels a partir da malha de pontos de controles, e exportada em forma de tabela para fins de análises estatísticas.

3.3.1.3 Light Detection And Ranging - MDE LiDAR Aerotransportado

Foi utilizado um MDE LiDAR aerotransportado, com resolução espacial horizontal de 5m e com cobertura para toda a área local. Esse MDE foi construído pela PETROBRAS, cedido em termo de cooperação técnica entre a referida instituição e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e disponibilizado pelo Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG), mediante termo de confidencialidade. O levantamento se deu entre fevereiro e setembro de 2012, através de aerofotogrametria integrada. Nesse aerolevantamento, foi utilizado um equipamento modelo ALS60 fabricado pela Leica Geosystems. A densidade média de pontos foi de 4,2 por m², com frequência de 200.000 pulsos por segundo (200 kHz) e

ângulo de abertura (FOV) 26°. A frequência de operação adotada foi de 160,2 kHz, com frequência de perfilamento de 65 Hz e velocidade média da aeronave de 190 km/h. O espaçamento médio de pontos foi de 0,41 m (na direção do voo) e de 0,80 m, na direção transversal ao voo. O sistema geodésico de referência adotado para planimetria foi o SIRGAS2000 e o sistema de projeção UTM (Fuso: 24S / MC: 39° W.Gr). Para a altimetria utilizou-se o modelo geoidal MAPGEO2010. A altura geométrica, foi convertida em altura ortométrica.

Por fim, foram extraídos os valores das alturas ortométricas dos pixels a partir da malha das Bases Referências, e exportada em forma de tabela para fins de análises estatísticas.

3.3.2 Análise dos Dados

As análises dos dados foram subdivididas em duas etapas. A primeira etapa, foi avaliar e calibrar o MDE SRTM para a área regional. Nesta etapa, além de avaliar o erro altimétrico do MDE, foi investigado a influência da geomorfologia na variação deste erro.

Na segunda etapa, buscou-se avaliar e calibrar os MDEs SRTM e LiDAR para a área local.

3.3.2.1 Avaliação e calibração do MDE SRTM para a área regional

Para avaliar e calibrar o MDE desta área, foi construído uma matriz com os valores das alturas ortométricas das bases referências e do SRTM. Esse conjunto de dados foi submetido a uma análise de Regressão Linear, com os valores das bases referências como variável dependente e o SRTM, como variável independente.

A análise de Regressão Linear é utilizada para verificar uma relação linear entre uma variável dependente e uma variável independente. É definida por uma função matemática:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \epsilon_i$$

Em que: Y_i é a variável explicada (dependente) (altitude ortométrica calibrada); α é a constante que representa a interceptação da reta com o eixo vertical; β é a constante que representa o declive (coeficiente angular) da reta; X_i é a variável explicativa (independente) (altitude ortométrica de referência); e ϵ_i é uma variável aleatória que representa o erro experimental.

O modelo obtido pela regressão linear pode ser avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2). Obtém-se a medida de ajustamento de um modelo indicando, em um

intervalo de 0 a 1, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. O R^2 é calculado por:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2][\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2]}}$$

Em que: O_i é o valor da altura ortométrica do MDE no ponto i , P_i é o valor da altura ortométrica dos pontos de controles (bases referências) no ponto i , $\bar{O}$ é a média da altura ortométrica do MDE, $\bar{P}$ é a média das alturas ortométricas dos pontos de controle (bases referências) e n é o número de observações.

Em seguida, o MDE SRTM foi calibrado a partir do modelo proposto pela regressão linear. Logo após, os MDEs (origina e o calibrado) foram submetidos a uma análise estatística descritiva e a comparação quanto à média da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) e ao valor da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE – *Root mean square error*).

A média da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) indica se um MDE tem um deslocamento vertical geral, positivo ou negativo, do nível do solo verdadeiro (Gesch *et al.*, 2012). É feita conforme a seguinte expressão:

$$\overline{\Delta H} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{Base,i} - H_{MDE,i})}{n}$$

Onde, H_{Base} é o valor da altura ortométrica observada de referência e H_{MDE} é o valor da altura ortométrica do modelo no ponto i .

A RMSE é uma medida estatística da magnitude do erro frequentemente usada para comparar modelos de elevações (e.g., Falorni *et al.*, 2005; Santos *et al.*, 2006; Medeiros *et al.*, 2009; Chagas *et al.*, 2010; Hirt *et al.*, 2010; Mouratidis *et al.*, 2010; Sánchez & Villarán, 2012; Macedo *et al.*, 2013; Moura *et al.*, 2014; Mukul *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2015; Mukul *et al.*, 2016; Patel *et al.*, 2016; Mukul *et al.*, 2017; Marini *et al.*, 2017). Ela avalia as diferenças individuais entre os valores observados pelos valores modelados. Essas diferenças individuais também são chamadas de resíduos, e a RMSE serve para agregá-las em uma única medida de poder preditivo. A RMSE de um modelo em relação à sua observação é definida como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{Base,i} - H_{MDE,i})^2}{n}}$$

Onde, H_{Base} é o valor da altura ortométrica observada de referência e H_{MDE} é o valor da altura ortométrica do modelo no ponto i .

Para avaliar a influência da geomorfologia nas Variações das Alturas Ortométricas (ΔH), foram tomadas como variáveis geomorfológicas a altura ortométrica das bases referências (H), a declividade do terreno e o aspecto da declividade do terreno. Essas duas ultimas variáveis geomorfológicas, extraídas diretamente do SRTM original. A declividade e o aspecto (direção da declividade) foram calculados a partir das derivadas parciais da altura ortométrica do SRTM ao longo das direções Este (x) e Norte (y), conforme as equações abaixo (Burrough, 1987; Miliaresis & Paraschou, 2005):

$$Declividade = \sqrt{\left(\frac{dH}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dH}{dy}\right)^2}$$

$$Aspecto = \arctan\left(\frac{-dH/dy}{dH/dx}\right)$$

A declividade e o aspecto foram expressas em graus. Quando utilizado na estatística descritiva a declividade foi dividida em 2 classes (“< 5°” e “5° a 10°”), e o aspecto padronizado para as oito direções geográficas (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). Foi determinado como “plano” a declividade com valor igual a 0°.

Os dados utilizados para a investigação inferencial da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) na área regional, consistiram de uma matriz formada pelos valores das variáveis “ ΔH ”, “ H ” (altura ortométrica das bases referências), “Declividade” (declividade do SRTM) e “Aspecto” (aspecto da declividade do SRTM). Essas variáveis foram submetidas ao processo de padronização de dados, através do método Escore-Z (também conhecido como escore padronizado). O escore-Z representa o número de desvios-padrão que separa uma variável aleatória X da média do grupo. Esse tipo de transformação é muito utilizada em padronização de variáveis, pois não altera a forma de distribuição da variável original e gera uma nova variável com média 0 e variância 1. Dessa forma, quando muitas variáveis com diferentes ordens e grandeza estiverem sendo utilizadas em uma análise, o processo de padronização

escore-Z fará com que todas as novas variáveis padronizadas apresentem a mesma distribuição, com ordens e grandeza iguais (Fávero *et al.*, 2009).

Em seguida os dados padronizados foram testados quanto a multicolinearidade. Para isso, uma matriz de correlação de Spearman (Spearman, 1904) foi construída para avaliar a multicolinearidade dos dados, sendo preferível por evitar suposições de linearidade entre as variáveis (Zar, 2010). De acordo com Neter *et al.* (1990) e Graham (2003), as variáveis com alta colinearidade podem resultar em estimativas de difícil interpretação como efeitos independentes. Assim, valores modulares do coeficiente de correlação de Spearman superiores a 0.5 são indicativos de alta colinearidade de uma variável (Booth *et al.*, 1994).

Por fim, foi realizado um Modelo Aditivo Generalizado (MAG) com as variáveis “H”, “Declividade” e “Aspecto” como variáveis independentes e, “ ΔH ” como variável dependente. O modelo aditivo generalizado é uma extensão não paramétrica do modelo linear generalizado (i.e., cuja forma não é especificada), estimada através de curvas suavizadas (Hastie & Tibshirani, 1990). Com essa substituição, não é necessário assumir uma relação linear entre a variável exploratória e as variáveis explicativas, como no Modelo Linear Generalizado ou em uma Regressão Linear simples. De fato, não é necessário nem mesmo conhecer previamente a forma dessa relação, mas é possível estimá-la a partir de um conjunto de dados (Conceição *et al.*, 2001). Essa função estimada, também chamada de curva suavizada permite então descrever a forma, e mesmo revelar possíveis não linearidades nas relações estudadas, uma vez que não apresenta a estrutura rígida de uma função paramétrica (Wood *et al.*, 2016). Para elaboração do MAG foi utilizado o pacote “gam” (Wood *et al.*, 2016) do software R v.3.4.1 (R Development Core Team, 2017).

3.3.2.2 Avaliação e calibração do MDE SRTM e LiDAR para a área local

Para avaliar e calibrar os MDEs desta área menor, foi construído uma segunda matriz, com os valores das alturas ortométricas das bases referências, do SRTM e do LiDAR aerotransportado. Esse conjunto de dados também foi submetido a análises de regressões lineares. A primeira regressão linear teve os valores das bases referências como variável dependente e o SRTM, como variável independente. E a segunda regressão linear, alterando somente a variável independente pelo LiDAR. Em seguida, os modelos foram calibrados em relação as suas previsões resultantes das regressões lineares. Além disso, foram submetidos a uma análise estatística descritiva e a comparação quanto ao valor da média de ΔH e RMSE.

Por fim, todos os dados foram submetidos a verificação de parametricidade (normalidade e homogeneidade), por meio dos testes de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965)

e Levene (Levene, 1960). Ao verificar que não ocorreu parametricidade dos dados, foi realizado uma comparação dos grupos por meio do teste não paramétrico Teste de Friedman (Friedman, 1940), seguido pelo teste *post-hoc* Student–Newman–Keuls. O Teste de Friedman, segundo Diggle (1988) e Crowder & Hand (1990), pode ser usado para designar medidas feitas para uma mesma variável resposta na mesma localização geográfica em mais de uma ocasião (medidas repetidas).

Em todas as análises estatísticas foi adotado o valor de significância de 5% (Zar, 2010) e foram realizadas no software R v.3.4.1 (R Development Core Team, 2017).

3.4 Resultados e Discussão

Os resultados alcançados neste trabalho, são apresentados sistematicamente a seguir.

3.4.1 Avaliação e calibração do MDE SRTM para a área regional

Foi possível avaliar e calibrar o Modelo Digital de Elevação do SRTM para a área regional, a partir dos 110 pontos de controles. A análise de regressão linear revelou uma forte correlação entre as Bases Referências e os dados de altimetria SRTM, gerando um modelo altamente robusto com $R^2 = 0,9983$ e $p < 0,001$ (Figura 3.2). O valor de R^2 acima de 0,99 indicam que quase 100% das células do MDE, que geograficamente coincidem com os pontos de controle, possuem grandezas compatíveis com àquelas das Bases Referências, além de resíduos de baixa magnitude. O modelo de correção/calibração do SRTM a partir dos pontos de controle foi determinado como $y = 0,9966x - 1,8568$.

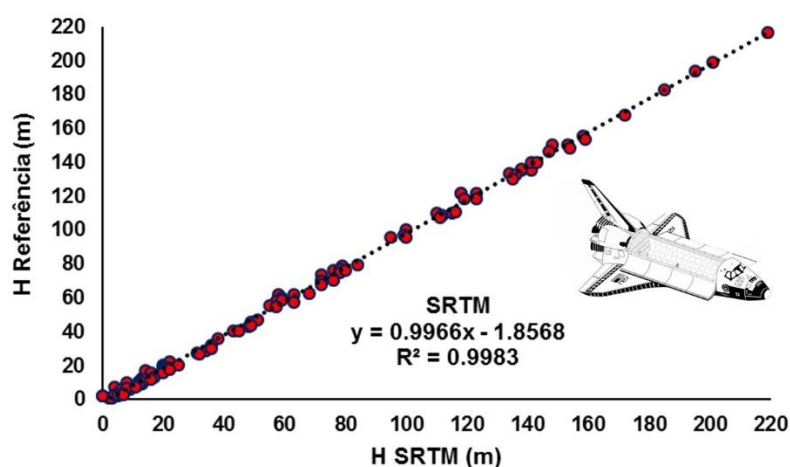


Figura 3.2 Resultado gráfico da análise de regressão linear: H SRTM x Bases de Referências.

Elevados valores de R^2 , acima de 0,9, são amplamente encontrados na literatura, em estudos de calibração do MDE SRTM a partir dos pontos de controle de alta precisão vertical (e.g., Gorokhovich & Voustianiouk, 2006; Medeiros *et al.*, 2009; Forkuor & Maathuis, 2012; Athmania & Achour, 2012; Santillan & Makinano-Santillan, 2016).

A estatística descritiva dos dados, para toda a área regional, segue na Tabela 3.1, incluindo nela o SRTM calibrado, a partir do modelo proposto anteriormente. Analisando a Tabela 3.1, foi possível verificar uma média da variação da altura ortométrica (ΔH) da Bases Referências em relação ao SRTM não calibrado, com o valor de -2.07m. Significando assim, que o plano do MDE SRTM original possui um deslocamento negativo em relação ao plano da rede de pontos de controles. O valor encontrado em módulo, 2m, é muito parecido com o encontrado por Patel *et al.* (2016), durante trabalho de validação do SRTM para uma área na capital de Madia Pradexe (Índia). Medeiros *et al.*, (2009), em uma área de estudo que englobava todo o Estado de Goiás e o Distrito Federal, encontraram uma média de ΔH do SRTM em relação aos pontos de controle adotados, aproximadamente de -3m. Nesse último estudo, os autores utilizaram 559 referências de níveis.

Tabela 3.1 Estatística descritiva dos dados altimétricos para toda a área de estudo (Área Regional). $n= 110$.

	H_{Bases} (m)	H_{SRTM} (m)	$\Delta H = H_{Bases} - H_{SRTM}$	H_{SRTM} Calibrado (m)	$\Delta H = H_{Bases} - H_{SRTM}$ Calibrado
Mínimo	0.96	0.00	-5.70	-1.86	-3.72
Mediana	51.04	53.00	-2.22	50.96	-0.16
Média	62.20	64.27	-2.07	62.20	0.00
Máximo	216.77	219.00	3.95	216.40	6.20
Erro padrão	5.32	5.33	0.22	5.31	0.22
Variância	3108.35	3124.04	5.39	3102.83	5.35
Desvio padrão	55.75	55.89	2.32	55.70	2.31
RMSE (m)		3.10		2.30	

Em relação à média de ΔH do SRTM calibrado ser encontrado no valor igual a zero, já era de se esperar. Esse fator se deve ao ajustamento do plano do MDE ao plano da rede de pontos de controles após calibração. A avaliação dos modelos com base na Variação da Altura Ortométrica (ΔH) torna-se mais compreensível quando estes são reclassificados em intervalos de classes (Figura 3.3). Investigando a estratificação dessa variação em classes de altura ortométrica, foi possível observar uma diminuição de ΔH do SRTM não calibrado para o SRTM

calibrado, em quase todas as classes, exceto na classe de 120 a 130m. Após a calibração, ΔH teve uma evolução média de 90% nas classes de altura ortométricas para toda a área regional.

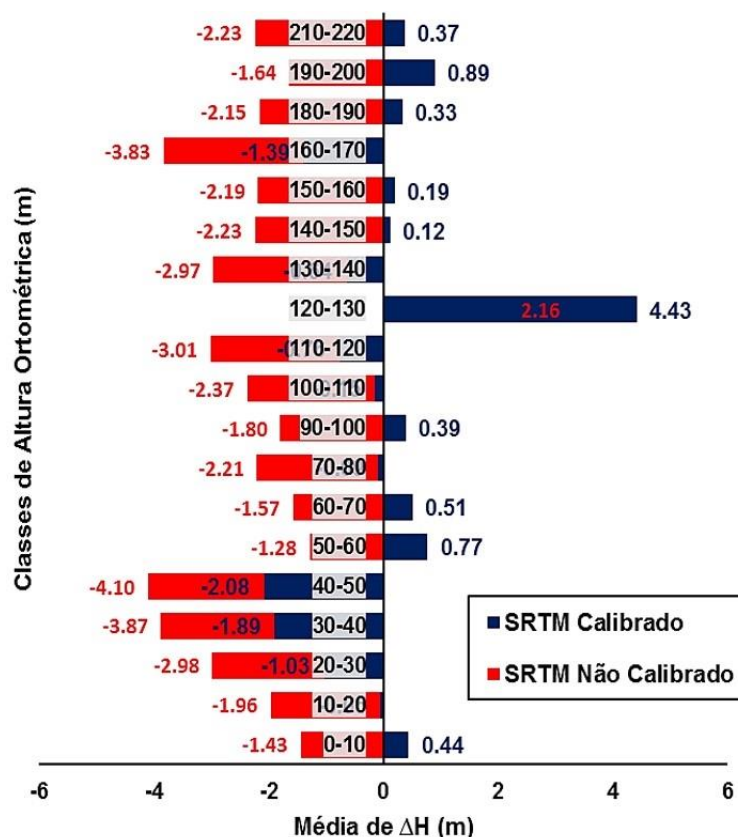


Figura 3.3 Comportamento da Média da Variação da Altura Ortométrica (ΔH) em relação as classes de Altura Ortométrica (H) para o “SRTM_{Calibrado}” e “SRTM_{Não Calibrado}”.

Em relação a RMSE do MDE SRTM original (SRTM não calibrado), foi encontrado uma RMSE de 3,10m, em comparação aos pontos de controles. Essa precisão é 2 vezes maior do que a divulgada nas especificações originas do SRTM (6,20m para a América do Sul). Além disso, ao calibrar o SRTM, foi verificado uma extrema melhora da RMSE, onde foi encontrado o valor de 2,30m. Ocorrendo assim uma diminuição em 26% no valor da RMSE do SRTM calibrado em relação ao SRTM não calibrado (Tabela 3.1).

Gorokhovich & Voustianiouk (2006), observaram em estudos realizados nos EUA e na Tailândia, que a precisão vertical do SRTM, eram de duas a quatro vezes maiores que os valores apresentados nas especificações originais deste produto para as regiões estudadas. Para o Nordeste de Mindanau (Filipinas), Santillan & Makinano-Santillan (2016) verificaram que o SRTM para a região possuía uma precisão melhor do que a informada nas especificações originais desse MDE. Eles encontraram uma média de $\Delta H = 6,21\text{m}$ e $\text{RMSE} = 8,28\text{m}$, enquanto que nas especificações a média de ΔH esperado era de 10m e RMSE de 16m.

Diferentemente dos autores mencionados, Santos *et al.* (2006), em um estudo de avaliação da precisão vertical para uma área na região da Amazônia, encontrou uma RMSE de 7,642m, valor este, superior ao divulgado nas especificações originais. Outro trabalho, que se destaque pela elevada diferença na RMSE do SRTM ao tabelado, é o trabalho de Sánchez & Villarán (2012). Estes, encontraram uma precisão vertical entre 70 a 117m, para todo o território do Peru. Os mesmos autores concluíram também que, essa variação poderia não depender da altura e nem da localização geográfica do determinado local, mas sim, fruto da função da cobertura de nuvens densas e elevação do ângulo do sensor durante a aquisição dos dados. Mukherjee *et al.* (2013) reforçam que a rugosidade do terreno (geomorfologia) influencia negativamente a precisão vertical do MDE SRTM.

Além dos trabalhos citados, é possível encontrar na literatura estudos de validação do SRTM a partir de pontos de controles GNSS, com valores de erro vertical próximos daqueles informados pela especificação do produto. Exemplos destes, são os trabalhos de Falorni *et al.* (2005) e Mouratidis *et al.* (2014), desenvolvidos em Oklahoma (USA) e no Norte da Grécia, respectivamente.

Ao investigar estatisticamente as possíveis tendências das variáveis geomorfológicas na variação da altura ortométrica (ΔH) do SRTM não calibrado, por meio da aplicação de modelos aditivos generalizados, foi possível obter um modelo inferencial para a variável preditiva. Além disso, as análises descritivas demonstraram também possíveis relações de outras variáveis explicativas em ΔH .

Inicialmente a matriz de correlação de Spearman mostrou uma baixa correlação entre as variáveis geomorfológicas, todos os valores em módulo, abaixo de 0,2. Demonstrando assim uma baixa colinearidade entre essas variáveis, ou seja, cada variável explicativa não é influenciada por nenhuma outra variável explicativa (Tabela 3.2). Entretanto, o maior valor em módulo encontrado na comparação com a variável ΔH , foi a variável “Aspecto”, que apresentou $r = -0,20$. Indicando assim que, 20% da variabilidade de ΔH é controlada pelo Aspecto da declividade. No total, as variáveis “H”, “Declividade” e “Aspecto” representaram 39% da variabilidade de ΔH .

Ao realizar o MAG entre as variáveis geomorfológicas e a variação da altura ortométrica, foi possível encontrar um modelo robusto de explicação inferencial para ΔH apenas com a inclusão da variável “Aspecto”. Foi encontrado um modelo, explicado pela suavização do Aspecto ($p < 0,02$) ($R^2 = 0,102$) (Tabela 3.2). A orientação da face da declividade está intimamente e de forma não linear influenciando na variação do erro do MDE SRTM na área de estudo (Figura 3.4).

Tabela 3.2 Resultado da Matrix de Correlação e resumo do Modelo Aditivo Generalizado.

Matriz de Correlação de Spearman				
	ΔH	H	Declividade	Aspecto
ΔH	1.00	---	---	---
H	-0.10	1.00	---	---
Declividade	-0.09	0.15	1.00	---
Aspecto	-0.20	0.01	0.10	1.00

Modelo Aditivo Generalizado				
Fórmula: $\Delta H = s(\text{Aspecto})$				
	Estimado	Erro Pad.	Valor t	P
(Intercepto)	-2.065	0.210	-9.856	<0.01

Significância aproximada do termo suavizado				
	edf	Ref.df	F	P
s(Aspecto)	3.477	4.296	3.064	<0.01

R^2 (ajustado) = 0.102
 Desvio explicado: 13%
 GCV = 5.0311; Scale est. = 4.8263; n = 110

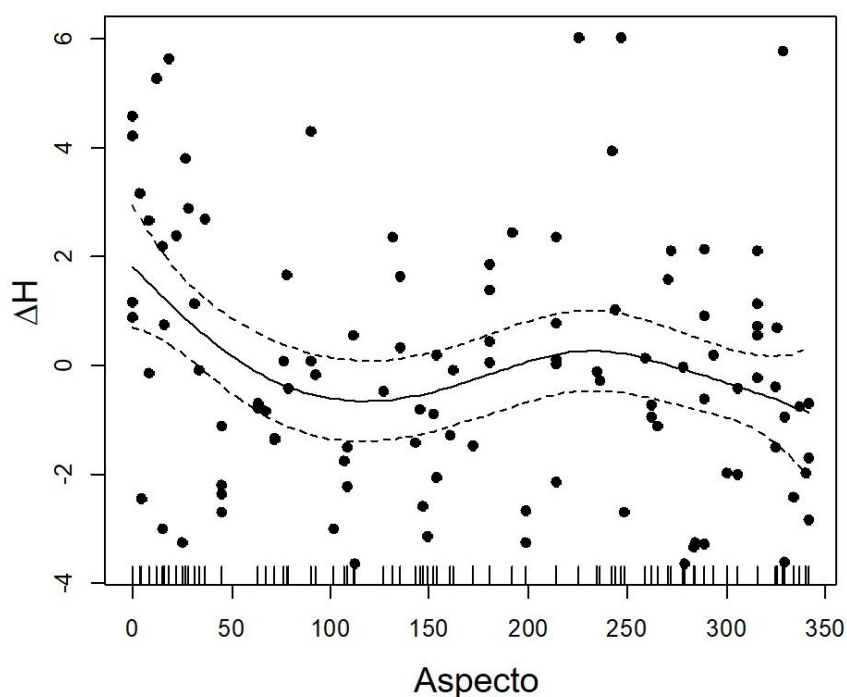


Figura 3.4 Curvas suavizadas da variação da altura ortométrica em função do aspecto da declividade.

Observando a estatística descritiva da RMSE isoladamente nas variáveis geomorfológicas, foi possível verificar o comportamento desse erro em cada variável explicativa (Figura 3.5a, 3.5b e 3.5c). Nas classes de altura ortométrica, foram encontrados os menores valores de RMSE nas classes de “180 a 200m” (RMSE= 1.74), seguido pelas classes “200 a 220m” (RMSE= 2,16) e “0 a 20m” (RMSE= 2,45) (Figura 3.5a).

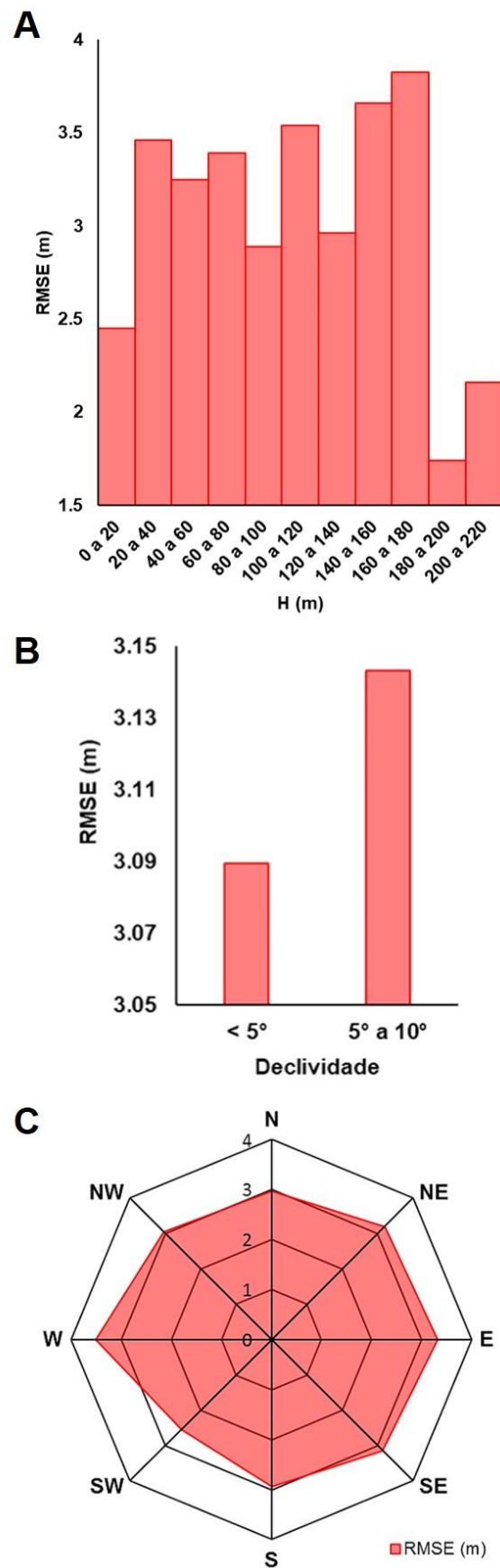


Figura 3.5 Gráficos: (A) Comportamento da RMSE nas classes de altura ortométrica (H); (B) Comportamento da RMSE nas classes de declividade; e (C) Comportamento da RMSE nas classes de aspecto.

Já a declividade, apresentou uma leve diminuição na classe “<5°” em relação a classe “5 a 10°”. Foram encontrados os valores de RMSE de 3,09 e 3,14, respectivamente (Figura 3.5b). Possivelmente, essa leve diminuição se deva ao fato do conjunto de dados já se encontrar em uma faixa muito baixa de declividade, apresentando uma amplitude apenas de 10°. Entretanto, os valores apresentados corroboram com as hipóteses encontradas na literatura, em que os valores de RMSE tendem a diminuir com a diminuição da declividade. Essa hipótese foi ainda mais reforçada ao analisar somente os valores de ΔH nas regiões em que não apresentavam declividade (declividade= 0°), onde foi observado um valor da RMSE= 2,34. Em relação ao aspecto, não foi observado muita variação da RMSE, exceto em uma leve queda nas classes de SW, apresentando um valor da RMSE= 2,54 (Figura 3.5c).

3.4.2 Avaliação e calibração do MDE SRTM e LiDAR para a área local

Foi possível avaliar e calibrar os MDEs do SRTM e do LiDAR para a área local, a partir das bases referências. Também, como na etapa anterior, as análises de regressões lineares tiveram fortes correlações entre as Bases Referências e os dados do LiDAR ($R^2 = 1$) ($p < 0,001$), e com os dados do SRTM ($R^2 = 0,9981$) ($p < 0,001$), para a pequena área do estuário Piranhas-Açú (Figura 3.6). Para o MDE LiDAR, o modelo de correção/calibração, a partir dos prontos de controle foi determinado como $y = 0,9991x + 0,1836$. Enquanto que, para o MDE SRTM, o modelo de correção/calibração foi estimado como $y = 0,9789x - 1,0357$.

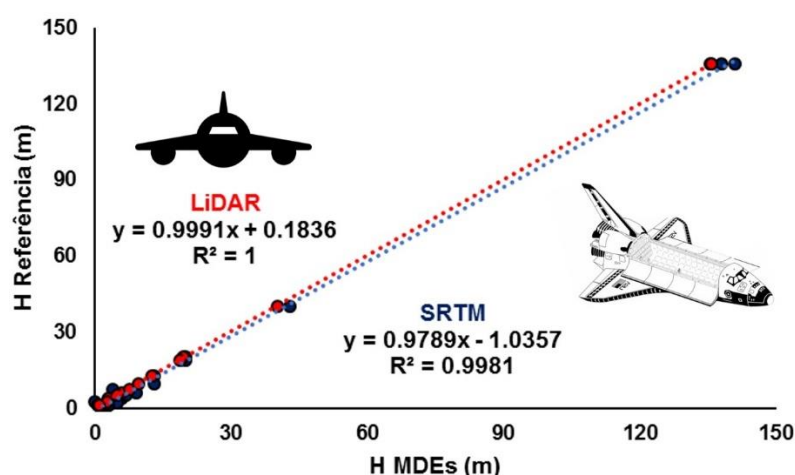


Figura 3.6 Resultado gráfico da análise de regressão linear: H SRTM x Bases de referências e H LiDAR x Bases de Referências.

A estatística descritiva dos dados, para a área local, segue na Tabela 3.3, incluindo nela, os MDEs calibrados LiDAR e SRTM. Analisando a Tabela 3.3, foi possível verificar uma

média da variação da altura ortométrica (ΔH) da Bases Referências em relação ao LiDAR de 0,16m, e em relação ao SRTM de -1,54m.

Ao analisar a RMSE dos MDEs em relação aos pontos de controles, foi verificado que o LiDAR não calibrado, o LiDAR calibrado, o SRTM não calibrado e o SRTM calibrado, apresentaram RMSE de 0,32m, 0,27m, 2,53m e 1,80m, respectivamente.

O fato do SRTM apresentar melhor acurácia vertical na área local, em comparação com a área maior (área regional), possivelmente pode ser explicado devido a área menor possuir elevações mais baixas e áreas mais planas. Forkuor & Maathuis (2012), quando comparou dois setores em Gana, concluíram que a precisão vertical do SRTM era melhor em terreno plano e menos complexo. Mesmo sendo um MDE com uma excelente qualidade vertical (RMSE= 0,32m), o LiDAR original, apresentou uma elevada evolução na diminuição de seu RMSE quando calibrado com os pontos de controles dispostos na área de estudo. A diminuição do RMSE do LiDAR calibrado em relação ao LiDAR não calibrado foi de 15%, enquanto que o SRTM calibrado apresentou uma diminuição de 29% em relação ao SRTM não calibrado (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 Estatística descritiva dos dados altimétricos para o recorte do estuário. n= 18.

	H _{bases} (m)	H _{LiDAR} (m)	$\Delta H =$ H _{Bases} - H _{LiDAR}	H _{LiDAR} Calibrado (m)	$\Delta H = H_{Bases}$ - H _{LiDAR} Calibrado	H _{SRTM} (m)	$\Delta H =$ H _{Bases} - H _{SRTM}	H _{SRTM} Calibrado (m)	$\Delta H =$ H _{Bases} - H _{SRTM} Calibrado
Mínimo	0.96	0.82	-0.31	1.00	-0.49	0.00	-5.32	-1.04	-2.18
Mediana	5.66	5.35	0.16	5.53	0.01	6.50	-1.98	5.33	-0.84
Média	22.51	22.35	0.16	22.51	0.00	24.06	-1.54	22.51	0.00
Máximo	135.68	135.71	0.82	135.77	0.65	141.00	3.57	136.99	4.69
Erro padrão	9.98	9.99	0.07	9.98	0.07	10.19	0.49	9.97	0.44
Variância	1792.77	1795.94	0.08	1792.71	0.08	1867.23	4.27	1789.27	3.44
Desvio padrão	42.34	42.38	0.28	42.34	0.28	43.21	2.07	42.30	1.86
RMSE (m)		0.32		0.27		2.53		1.80	

Ao aplicar o Teste de Friedman, foi observado uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($p < 0,001$) (Tabela 3.4). Em seguida, verificou-se durante comparação múltipla dos grupos, por meio do método Student-Newman-Keuls, que os únicos grupos que não deferiram estatisticamente significativo ($p < 0,05$), foram as Bases Referências x LiDAR calibrado, LiDAR calibrado x SRTM calibrado, e Bases Referências x SRTM

calibrado (Tabela 3.4). Ou seja, os pontos de controles, o MDE Lidar e o MDE SRTM estavam agora no mesmo plano referencial (provado estatisticamente). Reforçando assim, a robustez da metodologia empregada durante calibração dos MDEs com as Bases Referências (pontos de controles).

Tabela 3.4 Teste de Friedman e teste *post-hoc* para os dados altimétricos no recorte do Estuário Piranhas-Açú.

Teste de Friedman			
Grupo	Mediana	25%	75%
Bases Referências	5.66	1.09	18.95
LiDAR	6.50	3.00	20.00
LiDAR _{Calibrado}	5.35	0.85	18.67
SRTM	5.33	1.90	18.54
SRTM _{Calibrado}	5.53	1.03	18.84
<i>N=18; Qui-quadrado= 30.089; GL= 4; p < 0.001</i>			
Resultado do teste de comparação múltipla (método Student-Newman-Keuls)			
Comparação	Diferença entre ranks	q	p < 0.05
SRTM x LiDAR	51	7.603	Sim
SRTM x Bases Referências	34	6.208	Sim
SRTM x SRTM _{Calibrado}	31	7.307	Sim
SRTM x LiDAR _{Calibrado}	29	9.667	Sim
LiDAR _{Calibrado} x LiDAR	22	4.017	Sim
LiDAR _{Calibrado} x Bases Referências	5	1.179	Não
LiDAR _{Calibrado} x SRTM _{Calibrado}	2	0.667	Não
SRTM _{Calibrado} x LiDAR	20	4.714	Sim
SRTM _{Calibrado} x Bases Referências	3	1.000	Não
Bases Referências x LiDAR	17	5.667	Sim

3.5 Conclusões

As análises apresentadas neste documento indicam que:

1. A precisão vertical do modelo digital de elevação do SRTM original, para nosso conjunto de dados, mostrou ser aproximadamente duas vezes maior do que o valor de 6,20m, apresentado nas especificações originais do produto. Esse valor chegou a ser melhorado em 26 a 29% após calibração com pontos de controle de alta acurácia.

2. A geomorfologia do terreno influencia no erro altimétrico do MDE SRTM na área de estudo, corroborando assim com as hipóteses encontradas na literatura. O aspecto influencia de forma não linear no erro do MDE, enquanto que em áreas de menores declividades a RMSE tende a diminuir.
3. O MDE LiDAR aerotransportado mesmo apresentando melhor RMSE para a área local, teve uma melhora de 15% após calibração.
4. Os modelos de calibrações desenvolvidos nesta pesquisa podem ser usados em futuros trabalhos com MDEs na área de estudo, principalmente para modelagens hidrológicas e de inundações/enchentes.
5. Os resultados encontrados neste trabalho, aliados aos resultados encontrados na literatura, corroboram com a hipótese da adoção obrigatória da “calibração de MDE por meio de pontos de controle de alta precisão”, como etapa de pré-processamento digital. Visando a melhoria da precisão vertical, aplicado em trabalhos regionais ou locais que necessitem dessas informações.
6. Novos estudos devem ser encorajados visando a melhoria da compreensão e as potencialidades altimétricas do SRTM em outros contextos topográficos e geomorfológicos.

3.6 Agradecimentos

Os autores desejam reconhecer em especial ao Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e a PETROBRAS, pela disponibilidade de uso do Modelo Digital de Elevação LiDAR.

3.7 Referências

- Aguilar, F.J.; Millis, J.P.; Delgado, J.; Aguilar, M.A.; Negreiros, J.G. & Pérez, J.L. 2010. Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1): 103-110.
- ANA - Agência Nacional das Águas. 2016. *Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu*. Agência Nacional das Águas, Brasília-DF. 167p.
- Athmania, D. & Achour, H. 2014. External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI- SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Remote Sens.*, 6(5): 4600-4620.
- Barreto, A.M.F.; Suguio, K.; Bezerra, F.H.R.; Tatumi, S.H.; Yee, M. & Giannini, P.C.F. 2004. Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. *Geol. USP Sér. Cient.*, 4(2): 1-12.

- Booth, G.D.; Niccolucci, M.J. & Schuster, E.G. 1994. *Identify proxy sets in multiple linear regression: an aid to better coefficient interpretation*. Research paper INT-470. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Ogden, Utah.
- Chagas, C.S.; Fernandes Filho, E.I.; Rocha, M.F.; Carvalho Júnior, W. & Souza Neto, N.C. 2010. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(2): 218-226.
- Chen, Y.; Li, J.; Wang, H.; Qin, J. & Dong, L. 2017. Large-watershed flood forecasting with high-resolution distributed hydrological model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(2): 735-749.
- Conceição, G.M.S.; Saldiva, P.H.N. & Singer, J.M. 2001. Modelos MLG e MAG para análise da associação entre poluição atmosférica e marcadores de morbi-mortalidade: uma introdução baseada em dados da cidade de São Paulo. *Rev. Bras. Epidemiol.*, 4(3): 206-219.
- Correa, N.F.; Ribeiro, V.O.; Miotto, C.L. & Paranhos Filho, A.C. 2017. Obtenção de MDE Corrigido para Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(1): 217-225.
- Costa, C.A.G.; Teixeira, A.S.; Andrade, E.M.; Lucena, A.M.P. & Castro, M.A.H. 2010. Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. *Revista Ciência Agronômica*, 41(2): 222-230.
- Crowder, M.J. & Hand, D.J. 1990. *Analysis of repeated measures*. London: Chapman & Hall.
- Diggle, P.J. 1988. An approach to the analysis of repeated measurements. *Biometrics*, 44: 959-971.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. 2011. *ArcGIS Desktop: Release 10*. Redlands, CA, U.S.A.
- Falorni, G.; Teles, V.; Vivoni, E.R.; Bras, R.L. & Amaratunga, K.S. 2005. Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Geophysical Research*, 110(F02005): 1-20.
- Fávero, L.P.; Belfiore, P.; Silva, F.L. & Chan, B.L. 2009. *Análise de dados: Modelagem multivariada para tomada de decisões*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Felicísimo, A.M. 1994. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 49(4): 29-33.
- Forkuor, G. & Maathuis, B. 2012. Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models over Two Regions in Ghana - Implications for Hydrological and Environmental

- Modeling. In: PIACENTINI, T. (ed.), *Studies on Environmental and Applied Geomorphology*. In Tech: Rijeka, Croatia, p. 219–240.
- Friedman, M. 1940. A comparison of alternative tests of significance for the problem of m rankings. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(1): 86-92.
- Gesch, D.; Oimoen, M.; Zhang, Z.; Meyer, D. & Danielson, J. 2012. Validation of the ASTER global digital elevation model version 2 over the conterminous United States. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B4: 281-286.
- Gorokhovich, Y. & Voustianiouk, A. 2006. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 104(4): 409–415.
- Graham, M. 2003. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology*, 84(11): 2809-2815.
- Hastie T. & Tibshirani, R. 1990. *Generalized additive models*. London: Chapman & Hall.
- Hirt, C.; Filmer, M.S. & Featherstone, W.E. 2010. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(3): 337-347.
- IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente. 2005. *Projeto de Zoneamento Ecológico-Econômico dos Estuários do Rio Grande do Norte – ZEE/RN*. Natal-RN. 35p.
- Jarvis, A.; Rubiano, J.; Nelson, A.; Farrow, A. & Mulligan, M. 2004. *Practical use of SRTM data in the tropics – comparisons with digital elevation models generated from cartographic data*. Working document no. 198. Cali: CIAT. 31p.
- Jensen, J.R. 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*. Tradução da Segunda Edição. São José dos Campos, Parêntese Editora. 598p.
- Jolliffe, I. 2002. *Principal component analysis*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Levene, H. 1960. Robust Tests for Equality of Variances. In: OLKIN, I. (ed.). *Contributions to Probability and Statistics*. Stanford Univ. Press, p. 278-292.
- Macedo, R.C.; Santos, J.R. & Soares, J.V. 2013. Validação de modelo digital de terreno em área florestal com relevo ondulado, gerado a partir de dados lidar. *Revista Brasileira de Cartografia*, 65(4): 695-702.

- Marini, L.B.; Marcato Junior, J.; Ramos, A.P.M.; Paranhos Filho, A.C.; Barros, W.M. & Higa, L.T. 2017. Análise da Acurácia Altimétrica dos Modelos Digitais de Superfície SRTM, Aster e Topodata e Aplicação na Representação 3D do Pantanal da Nhecolândia. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(3): 48-54.
- Medeiros, L.C.; Ferreira, N.C. & Ferreira, L.G. 2009. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, 61(2): 137-151.
- Moura, L.Z.; Bias, E.S. & Brites, R. 2014. Avaliação da acurácia vertical de modelos digitais de elevação (mdes) nas bacias do Paranoá e São Bartolomeu. *Revista Brasileira de Cartografia*, 66(1): 1-14.
- Mouratidis, A.; Briole, P. & Katsambalos, K. 2010. SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 31(23): 6205-6222.
- Mukherjee, S.; Joshi, P.K.; Mukherjee, S.; Ghosh, A.; Garg, R.D. & 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.
- Mukul, M.; Srivastava, V. & Mukul, M. 2015. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. *Journal of Earth System Science*, 124(6): 1343-1657.
- Mukul, M.; Srivastava, V. & Mukul, M. 2016. Accuracy analysis of the 2014–2015 Global Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 arc-sec C-Band height model using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. *Journal of Earth System Science*, 125(5): 909-917.
- Mukul, M.; Srivastava, V.; Jade, S. & Mukul, M. 2017. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, 7: 41672.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration. 2017. *U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data*. Disponível em: <<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em 03 jul. 2017.
- Neter, J.; Wasserman, W. & Kutner, M. 1990. *Applied linear statistical models*. 2nd ed. Richard E. Irwin, Inc., Homewood, IL.

- Patel, A.; Katiyar, S.K. & Prasad, V. 2016. Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(1): 7-16.
- Petrasova, A.; Mitsova, H.; Petras, V. & Jeziorska, J. 2017. Fusion of high-resolution DEMs for water flow modeling. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2(6): 1-8.
- Pires, J. M.; Nascimento, M.C.; Santana, R.M. & Ribeiro, C.A.A.S. 2005. Análise da exatidão de diferentes métodos de interpolação para geração de modelos digitais de elevação e obtenção de características morfométricas em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(2): 39-47.
- R Development Core Team. 2017. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<http://www.R-project.org/>>.
- Ribeiro, H.J. & Ferreira, N.C. 2014. Análise Comparativa de Redes Hidrológicas Geradas a Partir de Superfícies Hidrologicamente Consistentes. *Bol. Ciênc. Geod.*, 20(4): 784-805.
- Rodríguez, E.; Morris, C.S. & Belz, J.E. 2006. A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3): 249-260.
- Sánchez, E.P. & Villarín, R.F. 2012. SRTM 3" comparison with local information: Two examples at national level in Peru. *J. Appl. Geodesy*, 6(2): 75-81.
- Santillan, J.R. & Makinano-Santillan, M. 2016. Vertical accuracy assessment of 30-M resolution ALOS, ASTER, and SRTM global DEMs over northeastern Mindanao, Philippines. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4: 149-156.
- Santos, M.S.T. & Amaro, V.E. 2011. Rede geodésica para o monitoramento costeiro do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. *Bol. Ciênc. Geod.*, 17(4): 571-585.
- Santos, P.R.A.; Gaboardi, C. & Oliveira, L.C. 2006. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. *Revista Brasileira de Cartografia*, 58(1): 101-107.
- 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(5): 663-681.
- Santos, A.L.S.; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. 2014. Geodésia de precisão aplicada à análise da evolução morfodinâmica de curto prazo na ilha barreira do corta cachorro, litoral do Rio grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(3): 425-442.

- Santos, A.L.S.; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. 2015. Avaliação de metodologia de aquisição de dados para representação de feições morfológicas de praias arenosas através de modelo digital de elevação. *Mercator*, 14(2): 137-155.
- Shapiro, S.S. & Wilk, M.B. 1965. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4): 591-611.
- Spearman, C. 1904. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 15(1): 72–101.
- Thompson, J.A.; Bell, J.C. & Butler, C.A. 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling. *Geoderma*, 100(1/2): 67-89.
- Valeriano, M.M. & Carvalho Júnior, O.A. 2003. Geoprocessamento de Modelos Digitais de Elevação para Mapeamento da Curvatura Horizontal em Microbacias. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 4(1): 17-29.
- Van Niel, T.G.; Mcvicar, T.R.; Li, L.; Gallant, J.C. & Yang, Q. 2008. The impact of misregistration on SRTM and DEM image differences. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2430-2442.
- Wood, S.N.; Pya, N. & Saefken, B. 2016. Smoothing parameter and model selection for general smooth models (with discussion). *Journal of the American Statistical Association*, 111: 1548-1575.
- Zar, J.H. 2010. *Biostatistical Analysis*. 5th Edition. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ. 944p.



Capítulo 4 – Delimitação de áreas de inundação com base em um MDE calibrado e geoprocessamento: estudo de caso no Rio Uruguai, Itaqui, Sul do Brasil (2º Artigo²)

Delimitation of flood areas based on a calibrated DEM and geoprocessing: case study on the Uruguay River, Itaqui, Southern Brazil

Paulo Victor do Nascimento Araújo^{1,2}, Venerando Eustáquio Amaro¹, Robert Martins da Silva³ & Alexandre Bernardino Lopes⁴

¹Federal University of Rio Grande do Norte. Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics (PPGG). Department of Geology. Center of Exact and Earth Sciences. P.O. Box 1524, Campus Universitario, Lagoa Nova, Zip Code 59078-970, Natal-RN, Brazil.

²Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Norte. Campus Macau. Margaridas street, 300, COHAB, Zip Code 59500-000, Macau-RN, Brazil.

³Federal University of Pampa. Campus Itaqui. Luiz Joaquim de Sa Britto street, Promorar, Zip Code 96650-000, Itaqui-RS, Brazil.

⁴Federal University of Parana. Center of Sea Studies. Beira Mar Avenue, P.O. Box 61, Zip Code 83255-976, Pontal do Sul, Paraná-PR, Brazil.

E-mails: paulo.araujo@ifrn.edu.br; venerando.amaro@gmail.com;
robertsilva@unipampa.edu.br; ablopesrp@yahoo.com.br

Abstract

Flooding is a natural disaster which affects thousands of riverside, coastal, and urban communities causing severe damage. River flood mapping is the process of determining inundation extents and depth by comparing historical river water levels with ground surface elevation references. This paper aims to map flood hazard areas under the influence of the Uruguay River, Itaqui (southern Brazil), using a calibration digital elevation model (DEM), historic river level data and geoprocessing techniques. The temporal series of maximum annual level records of the Uruguay River, for the years 1942 to 2017, were linked to the Brazilian Geodetic System using geometric leveling and submitted for descriptive statistical analysis and probability. The DEM was calibrated with ground control points (GCPs) of high vertical accuracy based on post-processed high-precision Global Navigation Satellite System surveys. Using the temporal series statistical analysis results, the spatialization of flood hazard classes

² Artigo publicado no periódico “Natural Hazards and Earth System Sciences” (ISSN 1684-9981). Como citar: ARAÚJO, P.V.N.; AMARO, V.E.; SILVA, M.S.; LOPES, A.B. 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, v.19(1), p. 237-250, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-19-237-2019>

on the calibrated DEM was assessed and validated. Finally, the modeling of the simulated flood level was visually compared against the flood area on the satellite image, which were both registered on the same date. The free DEM calibration model indicated high correspondence with GCPs ($R^2 = 0.81$; $p < 0.001$). The calibrated DEM showed a 68.15 % improvement in vertical accuracy (RMSE = 1.00 m). Five classes of flood hazards were determined: extremely high flood hazard, high flood hazard, moderate flood hazard, low flood hazard, and non-floodable. The flood episodes, with a return time of 100 years, were modeled with a 57.24 m altimetric level. Altimetric levels above 51.66 m have a high potential of causing damage, mainly affecting properties and public facilities in the city's northern and western peripheries. Assessment of the areas that can potentially be flooded can help to reduce the negative impact of flood events by supporting the process of land use planning in areas exposed to flood hazard.

Keywords: Flood Geohazard; River Inundation; Altimetry; GIS; SRTM.

4.1 Introduction

Flooding, as a major natural disaster, affects many parts of the world including developed countries, and has severe impacts on populations and causes socioeconomic damage. Due to this kind of natural disaster, billions of dollars in infrastructure and property damage, as well as hundreds of human lives, are lost each year (Demir and Kisi, 2016; Elnazer *et al.*, 2017). It is understood that flood risks and hazards will not subside in the future and, with the onset of climate change, flood intensity and frequency will threaten many regions of the world (IPCC, 2014).

These hazards can be prevented and reduced by providing reliable information to the public about the flood hazard through flood inundation maps (Alaghmand *et al.*, 2010; Demir and Kisi, 2016). This information can, for example, assist urban management or even help the rescue operations during these events (Cook and Merwade, 2009), thus helping the communities directly to avoid or mitigate such future losses and damage (Arrighi *et al.*, 2013; Savage *et al.*, 2014; Speckhann *et al.*, 2017).

Flood hazard maps therefore need to be created as they provide a basis for the development of flood risk management plans. These plans need to be effectively communicated to various target groups, including decision makers, emergency response units and the public, as a measure to reduce flood risk by integrating different interests, and potential conflicts over space and land use in a city (Ouma and Tateishi, 2014). However, creating flood maps is a complex process which is affected by the input data, flow design, and consistent topographic information (APFM, 2013). A major aid in the construction of flood maps is use of

geoprocessing (Chen *et al.*, 2009; Sarhadi *et al.*, 2012; Demir and Kisi, 2016; Ovando *et al.*, 2016; Liu and Yamazaki, 2018). Geoprocessing is a set of techniques based on the study of spatially distributed information in order to describe the characteristics of the phenomenon under investigation in the whole area of interest (Costa and Lourenço, 2011). The construction process of flood maps requires an understanding of flow dynamics over the floodplain, topographic relationships and sound judgments of the modeler (Noman *et al.*, 2001; Sinnakaudan *et al.*, 2003; Sanders, 2007; Alagmand *et al.*, 2010; Sarhadi *et al.*, 2012). Frequently, applications for flood hazard mapping found in the literature are based on low-resolution models, mainly using free digital elevation models, which are not vertically calibrated to a local geodetic reference system (Komi *et al.*, 2017; Patel *et al.*, 2017; Speckhann *et al.*, 2017; Dhiman *et al.*, 2019).

Thus, special attention is required for topographic data because a robust flood model needs high vertical accuracy linked to a geodetic reference system, since in many cases, flood-prone areas are found in marginal regions of low-slope floodplain and may embrace large areas, such as this case study (Uruguay River basin, Itaqui) (Gupta, 2009; Mistry, 2009). The modeling of a flood hazard map is linked to the local geodetic reference system, corroborated with the identification and monitoring of flood situations, and construction of realistic predictive scenarios (operational level) for risk management and adaptation (governmental agencies, such as the local civil defense) (Joshi *et al.*, 2012; Gallien *et al.*, 2018; Jongman, 2018). It is extremely important to do the calibration of the digital elevation model (DEM) using high-accuracy ground control point (GCP) data, aimed at improving the vertical accuracy, and applied to regional or local studies about floods (Araújo *et al.*, 2018). Therefore, this study aims to conduct a robust mapping of flood hazard delimitation areas influenced by the Uruguay River, using the case study of Itaqui in the state of Rio Grande do Sul, southern Brazil, through a calibration of DEM from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) images, historical fluvimetric level data collected at Itaqui station, and geoprocessing techniques.

4.2 Study area

The Uruguay River basin is one of the most important hydrographic basins of Brazil; it is located in the south of the country and extends throughout the neighboring countries of Argentina and Uruguay. Therefore, this basin marks the division between the Brazilian states of Rio Grande do Sul and Santa Catarina, and also between Brazil and Argentina. The Uruguay River basin occupies a total extension area of 385 000 km², where approximately 274 300 km² is located in Brazil, corresponding to 3 % of national territory. This hydrographic region has a

prominent economic sector, mainly focused on the improvement of agricultural and industrial activities. The Uruguay River hydrographic region has great hydroelectric potential with a total production capacity of 40.5 kW km², and when considering both Brazilian and Argentinian sides, one of the biggest energy per square kilometer relations in the world (ANA, 2015).

The Uruguay River basin area has a temperate climate, with a regular intra-annual rainfall distribution, and some highs during May to September, coinciding with the winter season in the Southern Hemisphere. The natural hydric availability of the Uruguay hydrographic basin is largely influenced by the significant spatial and temporal variables of a few climatic parameters, such as the pluviometric regime, which reflects directly on the economic activities developed in the region, which are largely in the agricultural sector (BID, 2008). Many areas were deforested due to the growth of agro-industrial activities in the region, which led to an environmental imbalance, from river siltation to water pollution with pesticides and their residues. Therefore, this region shows the original and remaining native vegetation cover of the Brazilian Atlantic forest biome and Araucaria moist forest biome. Geomorphology is dominated by rugged relief in the upper Uruguay River basin, followed by a flatter patch in the gaucho campaign region with shallow soil, which is the reason why the Uruguay River flows through a rocky substrate. This characteristic implies a flow regime that follows the rainfall trend: when periods of intense precipitation occur, they cause floods in riverside areas and, in the same way, when periods of drought occur, the flow regime is abruptly reduced, sometimes even to guarantee the hydric requirements of human and socioeconomic activities. In Brazil, the Uruguay hydrographic region is composed of 11 hydrographic sub-basins: (1) Apuae–Inhandava, (2) Passo Fundo, (3) Turvo–Santa Rosa–Santo Cristo, (4) Piratinim, (5) Ibicui, (6) Quarai, (7) Santa Maria, (8) Negro, (9) Ijuí, (10) Varzea and (11) Butuí–Icamaqua (ANA, 2015).

The study area comprises the urban area of Itaqui and is located on the banks of the Uruguay River on the western border of the state of Rio Grande do Sul, southern Brazil (Figure 4.1). It corresponds to Ibicui sub-basin, the largest sub-basin of the Uruguay River, which has the Uruguay River and also the Cambai and Sanga das Olarias streams as its main water bodies. The study area has a territorial area of 34 066.06 km² and an estimated population of 39 049 inhabitants according to the Brazilian official 2016 Census by the National Institute of Geography and Statistics (IBGE, in Portuguese). This area plays an important role in regional but also national economic scope due to rice cultivation, as well as Hereford and Braford bovine breeding, and commercial pig breeding for slaughter. These economic activities influence the

region's environmental quality because they are directly related to the land use, occupation of the area, and increases in water consumption (Bariani and Bariani, 2013).

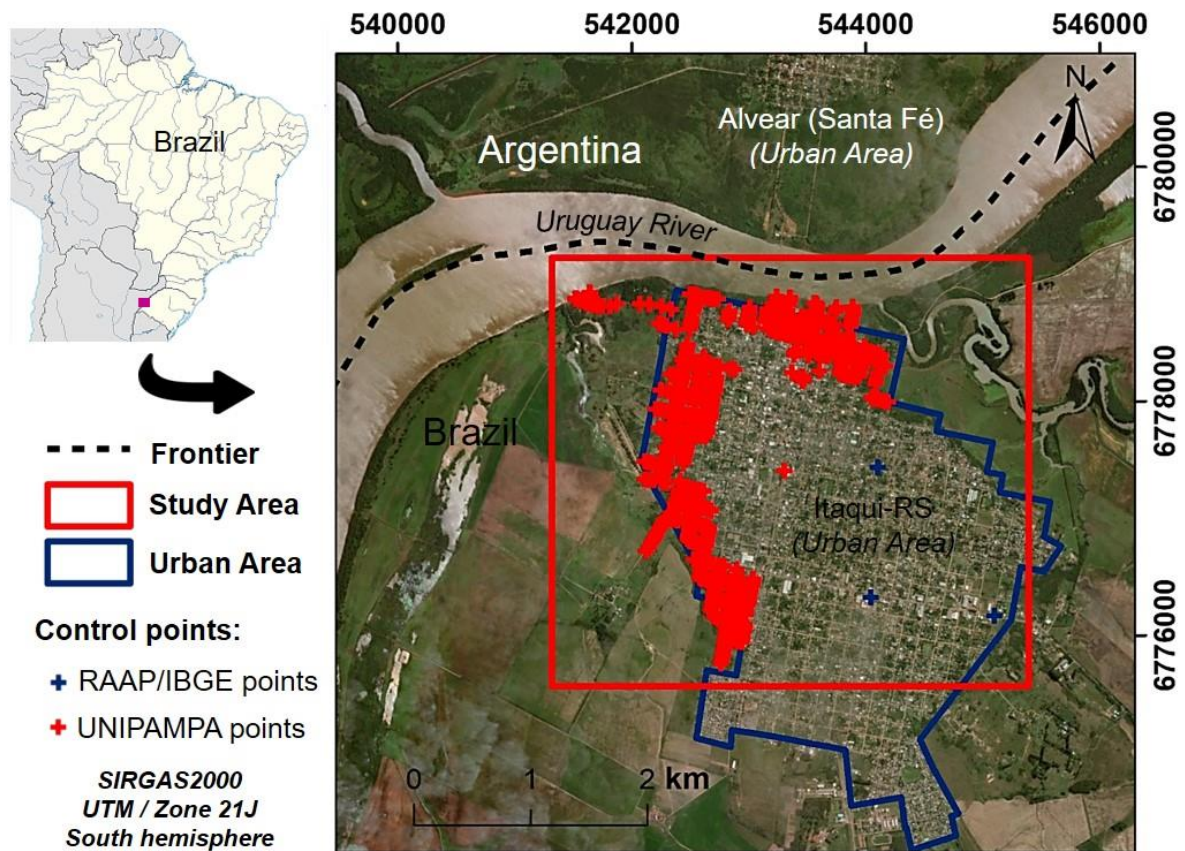


Figure 4.1 Location of the study area. Highlighted are the ground control points of high vertical accuracy from the High Accuracy Altimeter Network (in Portuguese, Rede Altimétrica de Alta Precisão – RAAP) of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) and from the Federal University of Pampa (UNIPAMPA).

Itaqui was settled on the edge of the Uruguay River. Currently, this riverside location is occupied by communities, some of very low economic class, that depend on the river for their livelihoods. These dwellers are often displaced to higher regions to move away from the constant flood. Itaqui survives under the same conditions as most Brazilian small cities, with a lack of resources and of specialized professionals that can act in the projection and the orderly urban development. This fact is reflected in the lack of studies and information that aid the aim of urban management to minimize negative impacts on society. Itaqui city had his settlement initiated into the edges of the Uruguay River. Currently, this riverside locations are occupied by the communities, some of very low-economic class, that depend on the river to withdraw their livelihoods. These dwellers are often displaced to higher regions so as to move away from the constant flood. Itaqui city survives the same reality of most of the Brazilian small cities, the lack of resources and of specialized professionals in order that they act in the projection and in

the orderly urbane development. This fact reflects in the lack of studies and information that aid the urban management aim to minimize the negative impacts to the society.

This undue occupation causes various problems that have a direct impact on society, including floods within the urban area. One of the reasons is the disorderly urban sprawl without adequate infrastructure, along with the non-observance of the natural characteristics of the occupied environment that, as a consequence, means that it is impossible for areas near rivers and creeks to absorb floods (Silva *et al.*, 2017). It is important to highlight that, in addition to the lack of financial resources to be invested in the municipality, there the almost constant expense of the damages caused by the increase in river level. Most riverside families live in so-called “volantes houses” (Figure 4.2); these are wooden houses and can be transported from one place to another. But in some extreme events such as the one that occurred in 2017, some families lost all of their belongings and in some cases even their homes, leaving it to the local government to help with the expenses of these communities (Figure 4.3).



Figure 4.2 “Volants houses” being transferred in periods of flooding in Itaqui.



Figure 4.3 The Brazilian Army helping local residents during flooding events in Itaqui (adapted from: EB, 2017).

4.3 Previous studies of flooding in Itaquí

The flooding process of the Uruguay River in Itaquí is a natural phenomenon that has afflicted the riverside population for decades. It is practically intrinsic to the city's history. However, even though it is a relevant problem to the local population, only after 2011 were papers published emphasizing the local hazards and risks of this natural phenomenon. Among the published papers, we emphasize Saueressig (2012), Saueressig and Robaina (2015), Silva *et al.* (2017), and Silva (2017). All of these are results of Masters dissertations in postgraduate programs in Brazil.

Saueressig (2012) emphasized a zoning of flood risk areas of the urban marginal area of the Municipality of Itaquí. The author organized an inventory of floods that happened between 1980 and 2010, and focused on a socio-environmental discussion, developing models with a few consistent criteria in relation to altimetry.

Silva (2017) concentrated on the usage of geodetic methods to elaborate a DEM of integrated elevation with hydrologic data for monitoring affected areas lined by the Uruguay River. However, Silva (2017) focused his efforts on the marginal urban areas of Itaquí.

Thus, this work intends to fill an information gap, covering the entire urban area of the city, with the hazard in focus, priming a methodological application that uses high accuracy altimetric data to model flood hazard maps. Furthermore, a statistical analysis using a temporal series of maximum annual level records of Uruguay River data was developed, which will provide innovative information about the return period of the flood phenomenon in study region.

4.4 Material and methods

The temporal series of annual maximum fluviometric records of the Uruguay River, from 1942 to 2017 (76 years of data), linked to Brazilian Geodetic System (Sistema Geodésico Brasileiro – SGB) and using geometric leveling, was submitted for statistical analysis. Then, calibration of a digital elevation model (DEM), obtained free of charge from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), was conducted using ground control points (GCPs) of high vertical accuracy. The results of the temporal series statistical analysis served as the basis for the spatialization of floods on the calibrated DEM. Finally, a visual comparison between a modeled flood and a digitally processed image from the flood area satellite image was performed, both having been registered concomitantly on the same day in study region.

In summary, the flood simulation model is based on the fill of the DEM, calibrated at river level orthometric heights, and linked to a common geodetic reference system. The workflow of the proposed methodology is shown in Figure 4.4.

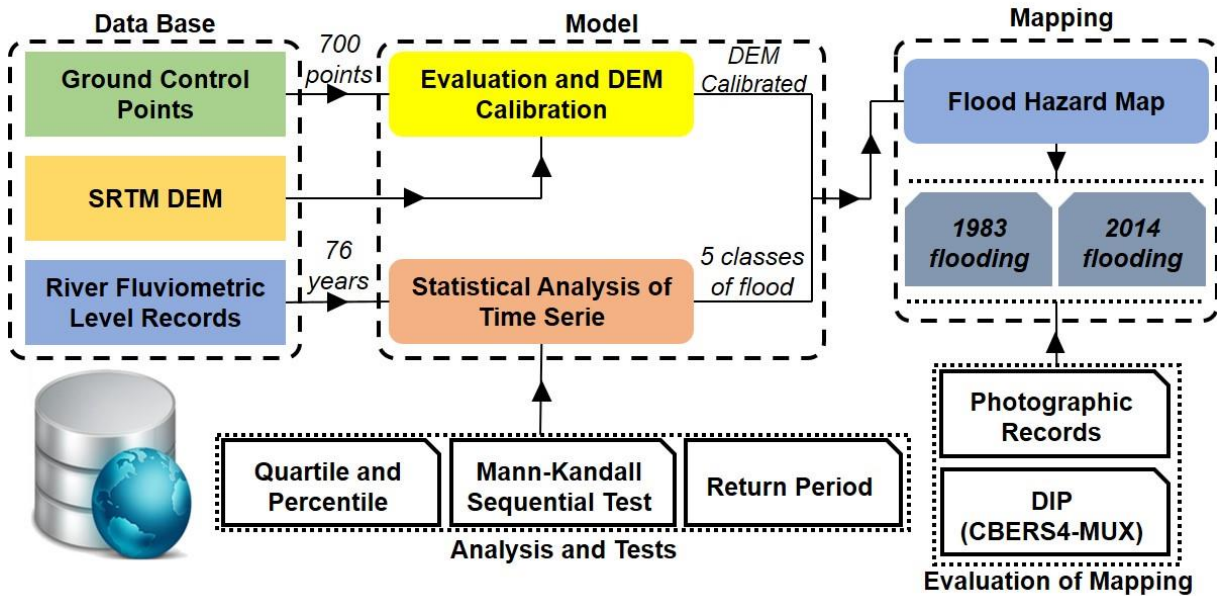


Figure 4.4 Flowchart of the proposed approach for the delimitation of flood hazard mapping.

4.4.1 Statistical analysis of Uruguay River fluviometric level records

Data from all annual maximums of fluviometric levels (m) of the Uruguay River were assembled in the river level monitoring station with the codename “ITAQUI” no. 75900000 (latitude: $-29^{\circ} 07' 39''$; longitude: $-56^{\circ} 33' 45''$), for 76 years of historical information (between 1942 and 2017). All annual maximum level records were linked to the Brazilian Geodetic System (Sistema Geodésico Brasileiro – SGB) with their respective orthometric heights. These data were obtained through the Monitoring and Alerts of Disasters System of Rio Grande do Sul (Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres – SMAD), using their website <http://www.smad.rs.gov.br/> (last access: 25 May 2018). The SMAD is a project implemented by the Environment and Sustainable Development Secretariat of Rio Grande do Sul, which is used by the civil defense and other competent organizations for monitoring and disaster warnings. Also, it is used for environmental management and monitoring of natural resources.

In statistical analysis, first the variability of attributes and the characterization of the probability distribution were verified, based on the data descriptive analysis of the annual maximum orthometric heights of the Uruguay River. This analysis sought to obtain information about the central tendency, dispersion, and separatrix (quartile and percentile). Furthermore,

the return period of maximum altimetric quotas for 2, 4, 10, 20, and 100 years were obtained. The return period (T_r), also known as recurrence interval or recurrence time, was employed as the time which a specific hydrological event can be matched or exceeded in any given year (McCuen, 1998). In the present study, the return period (T_r), in years, was defined by the following equation, where p is the probability that a hydrological event be matched or exceeded (Tanguy *et al.*, 2017):

$$Tr = \frac{1}{p}$$

Then, the Mann–Kendall sequential test (Mann, 1945; Kendall, 1975) was applied to evaluate the temporal serial behavior of annual maximum orthometric height data of the Uruguay River. The Mann–Kendall test is a robust, sequential, and non-parametric statistical method used to determine if a specific data series has a temporal tendency towards statistically significant changes. Among its advantages, it does not require normal distribution of data and is only slightly influenced by abrupt changes or non-homogenous series (Zhang *et al.*, 2009). In recent years, with growing concerns over environmental degradation and about the implications of greenhouse gases on the environment, researchers and practitioners have frequently applied the non-parametric Mann–Kendall test to detect trends in recorded hydrologic time series such as water quality, streamflow, and precipitation time series (Yue and Wang, 2004). Although it has no influence on the flood hazard mapping, the Mann–Kendall test was applied to investigate if the elevation of the Uruguay River is showing any upward or downward trend.

4.4.2 Delimitation of flood hazards areas

4.4.2.1 Digital Elevation Model (DEM) calibration

A digital elevation model (DEM) is a set of digital data describing elevation values of Earth ground surface (or any other surface) which contains additional information about the character of this surface and interpolation algorithm, which is best for approximation (modeling) of the real topography (Szypuła, 2017). A DEM is a complete representation of a land surface, which means that heights are available at each point in the area of interest (Hengl and Evans, 2009). In this study, the SRTM DEM was taken as the topographic model. However, it was submitted to the calibration process for adjustment to the local reference geodetic system. The DEM calibration is a mandatory pre-processing adoption that provides improvement of

both DEM vertical accuracy and linking to the geodetic system (Araújo *et al.*, 2018). This study adopted the SRTM calibration method suggested by Araújo *et al.* (2018). These authors used control points of high vertical accuracy linked to the Brazilian Geodetic System (in Portuguese Sistema Geodésico Brasileiro – SGB) for calibrating the DEMs.

The GCPs were considered as the orthometric altimetry points acquired from high-accuracy geodesy. A grid with 700 GCPs was constructed using data from two databases (Figure 4.1): (i) 3 points from the High Accuracy Altimeter Network (Rede Altimétrica de Alta Precisão – RAAP) of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE); and (ii) 697 points with orthometric heights linked to SGB through relative GNSS leveling, called UNIPAMPA points.

The RAAP–IBGE was created using the high-accuracy geometric leveling technique, allowing the determination of geodetic stations with an altitude value that was referenced with the mean sea level (MSL) in Imbituba-SC. These stations are known as level references (Referencias de Niveis – RRNN) and were set up throughout Brazil along highways and railways at around 3 km intervals, in the first survey, and nowadays at around 2 km intervals. Currently, the Brazilian network has approximately 68 000 RRNN available at the Geodetic Database (Banco de Dados Geodesicos – BDG), which can be accessed at the Brazilian Open Data website (Portal Brasileiro de Dados Abertos – PBDA), through the following link: http://dados.gov.br/dataset/cged_bdg_rn (last access: 5 May 2018). For this study, three points from RAAP that were inside the study area and in a good conservation state were used.

The database with 697 control points from the Federal University of Pampa (UNIPAMPA) was acquired with GNSS receivers on the field through a high-accuracy post-processed kinematic (PPK)³ mode and linked to SGB (Silva *et al.*, 2017). These high-accuracy control points had a mean altimetric error of 0.006 ± 0.0007 m.

All 700 control points were standardized to the horizontal datum SIRGAS2000, the Universal Transverse Mercator coordinate system (UTM, Zone: 21J/Southern Hemisphere), and the MAPGEO2010 geodetic model. Lastly, the orthometric height values were exported in a shapefile format with the ArcMap 10.1 software (ESRI, 2011).

The DEM used in this study was obtained through a SRTM image with a spatial resolution of 1 arcsec (approximately 30 m at the Equator), 16 bits radiometric resolution, a geographic coordinate system, WGS1984 horizontal datum, and a EGM96 vertical datum

³ **Erratum:** Instead of PPK, the "Stop and Go" method was used (5 minutes for each point). Stop and go is a semi-kinematic method, also known as pseudo-static, can be understood as an intermediate stage between static and kinematic.

(Earth Gravitational Model, 1996). These data were acquired at the Earth Data servers (NASA), using the interface developed by Derek Watkins (<http://dwtkns.com/srtm30m/>, last access: 10 March 2018). The advantage of this interface is the availability of SRTM scenes with excellent void correction processes, which are empty spaces where no elevation value can be determined. These voids cause significant problems for using the DEM from SRTM images, especially on hydrological modeling applications that require continuous flow surfaces. The “S30W057” scene was downloaded and the orthometric height values of pixels were extracted from the control point grid and exported in table form for statistical analysis purposes.

To evaluate and calibrate the DEM of the study area, a matrix was constructed with the orthometric height values of control points and the SRTM image. This dataset was subjected to linear regression analysis, with ground control point values as a dependent variable and SRTM data as an independent variable, which is a common procedure found in the literature for DEM calibration (e.g., Gorokhovich and Voustianiouk, 2006; Forkuor and Maathuis, 2012). Then, the DEM obtained from the SRTM image was calibrated using the model proposed by the linear regression. Subsequently, both DEMs (the original and calibrated) were subjected to descriptive statistical analysis and comparison between the mean of orthometric height variation (ΔH) and the root mean square error (RMSE) value, as proposed by Araújo *et al.* (2018). In all statistical analyses, a significance value of 5 % (Zar, 2010) was adopted and they were performed on R software v.3.4.1 (R Development Core Team, 2017).

4.4.2.2 Determining classes of flood hazard mapping

To determine the classes of flood hazard mapping, a descriptive analysis of the orthometric height temporal series (annual maximum fluvial levels records) of the Uruguay River was performed (minimum, maximum, quartile, and percentile). The determination of the classes was closely linked to the probability of occurrence of the annual maximum fluvial height of the Uruguay River. At this stage, five classes of flood hazard were determined, as described in Table 4.1.

Table 4.1 Classes of flood hazard for mapping.

Classes	Altimetric river quota used as indicator
Extremely high flood hazard	< Median
High flood hazard	$\geq$ Median and third quartile
Moderate flood hazard	third quartile and < 95%
Low flood hazard	$\geq$ 95% and < Maximum quota
Non-floodable	> Maximum quota

Through map algebra, using the previously calibrated DEM, all classes were mapped in a geographic information system (GIS) environment using ArcMap 10.1 software (ESRI, 2011).

4.4.2.3 Evaluation of the mapping of flood hazard areas

At this stage, the flood area for the 12 June 2017 was estimated using the flood model established in the previous stage. This date was picked because it was the annual maximum level day of the Uruguay River for the year 2017 in the Itaqui city area. In addition, it coincided with the CBERS-4 (China–Brazil Earth Resources Satellite) satellite multispectral imagery for the region. Among the coupled instruments in CBERS-4, the Multispectral Regular (MUX) sensor stands out, covering four spectral bands between 450 and 890 nm, with a scanning range of 120 km, and nominal spatial resolution of 20 m at nadir (Boggione *et al.*, 2014). These data were acquired freely from the National Institute of Space Research (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE) by accessing their website (<http://www.inpe.br/>, last access: 30 May 2018). The multispectral bands were subjected to a radiometric and atmospheric correction (Jensen, 2009). A hybrid color composite RGBI-765NDWI, based on a red–green–blue intensity color system, was generated in order to identify the flood area, using ERMAPPER v7.1 software (ERDAS, 2008). The normalized difference water index (NDWI) was elaborated using the following algorithm proposed by McFeeters (1996):

$$NDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{NIR}}{\rho_{green} + \rho_{NIR}}$$

Where, ρ_{green} corresponds to the reflectance of the green band (CBERS-4 band 6; 520 – 590 nm); and ρ_{NIR} corresponds to the reflectance of the infrared band (CBERS-4 band 8; 770 – 890 nm) of sensor CBERS-4/ MUX.

Finally, a visual comparison of the modeled flood area vs. identified flood area on satellite image was performed.

4.5 Results and discussion

In this work the use of geoprocessing techniques was extremely important to reach the results. We use the following techniques:

- Geographic information system (GIS) was the technique most used throughout the work. All data were used to implement a robust GIS.
- Digital cartography was used during the elaboration of the maps.
- Digital image processing (DIP) was the technique applied to improve the visualization of the historical flooding from the CBERS-4 MUX satellite images.
- Precision geodesy was used during the calculation of the points of land controls and the linkage of the river level to the Brazilian Geodetic System.
- Geostatistical techniques were used during the evaluation and calibration of the digital elevation model.

The results achieved in this study are systematically presented and discussed below.

4.5.1 Analysis of maximum annual fluviometric level of the Uruguay River

The annual maximum level records of the Uruguay River for the last 76 years have an amplitude of 9.78 m, with a maximum of 57.23 m and a minimum of 47.76 m. Furthermore, the values of mean and median were 51.97 and 51.56 m, respectively (Figure 5). For these data, the p value associated with the Mann–Kendall test is statistically significant, suggesting the presence of a statistically significant upward trend in the annual maximum level records of the Uruguay River (positive tau statistic = 0.167; two-sided p value = 0.03351), as shown in Table 4.2. Furthermore, it is essential to mention that, during the last 3 years, two occurrences of a flood altimetric quota for a return period of 20 years were observed (2014 and 2017). The return period values for 2, 4, 10, 20, and 100 years are presented on Table 3.

According to research found in the literature, the Uruguay basin presented a positive trend in precipitation and streamflow during the late twentieth century (Pasquini and Depetris, 2007; Barros *et al.*, 2008; Abreu *et al.*, 2018). Abreu *et al.* (2018) concluded that anthropogenic climate change has increased the risk of the extreme rainfall in this catchment by at least 2 times, with a median increase of about 5 times. It is important to emphasize that the Uruguay River has large flow variation, from the occurrence of great floods, which affect riverside populations, to lack of water for human consumption and other necessities. The catchment of Uruguay basin has a fast-hydrologic response in which flood occurrence is more dependent on meteorology than on initial conditions of soil moisture and flow (Tucci *et al.*, 2003). Physical characteristics of the Uruguay River basin, such as the strong slope of the drained terrain, river channel morphology, and the soil, in conjunction with low water retention and deforestation of

the main river and tributary banks for the extraction of wood and/or agricultural use, assist in the surface drainage after intense rains, flooding, erosion, and silting of river beds (BID, 2008).

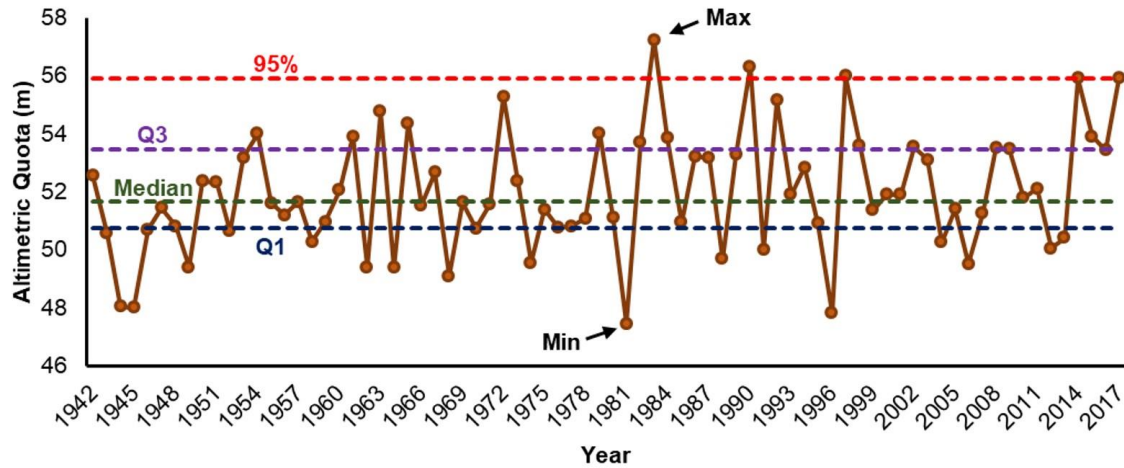


Figure 4.5 Annual fluviometric maximum level records of the Uruguay River in Itaquí.

Table 4.2 Results of Mann Kendall test.

Summary	
Kendall's tau statistic	0.167
Two-sided p-value	0.03351
Kendall Score (S)	475
Denominator (D)	2848.5
Variance of Kendall Score	49713.67

Table 4.3 Probability of the fluviometric level being matched or exceeded.

Tr: Flood return period.

Probability (p)	Tr (years)	Altimetric river quota (m)
0.5	2	51.66
0.25	4	53.45
0.1	10	54.58
0.05	20	55.92
0.01	100	57.24

4.5.2 Delimitation of flood hazards areas

Using the 700 GCPs, it was possible to evaluate and calibrate the DEM from the SRTM image. The linear regression analysis showed strong correlation between the ground control points and the SRTM altimetry data, generating a highly robust model with $R^2 = 0.81$ and $p < 0.001$ (Figures 4.6 and 4.7). The SRTM calibration and correction model based on control points was determined as $y = 0.7031x + 13.913$.

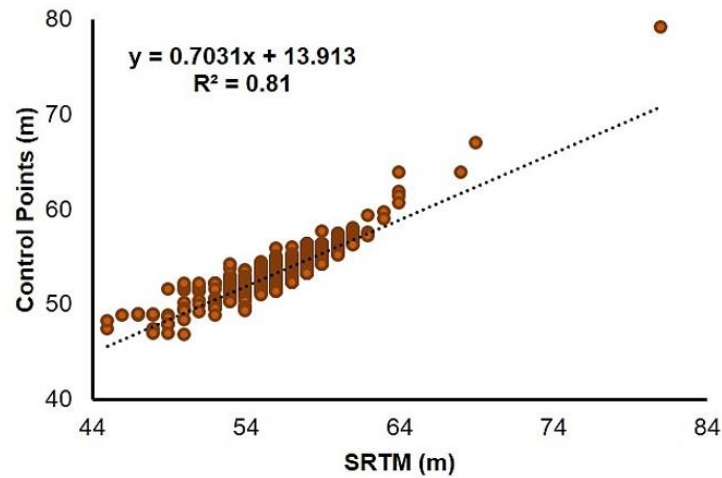


Figure 4.6 Linear regression analysis of SRTM image vs ground control points (GCPs).

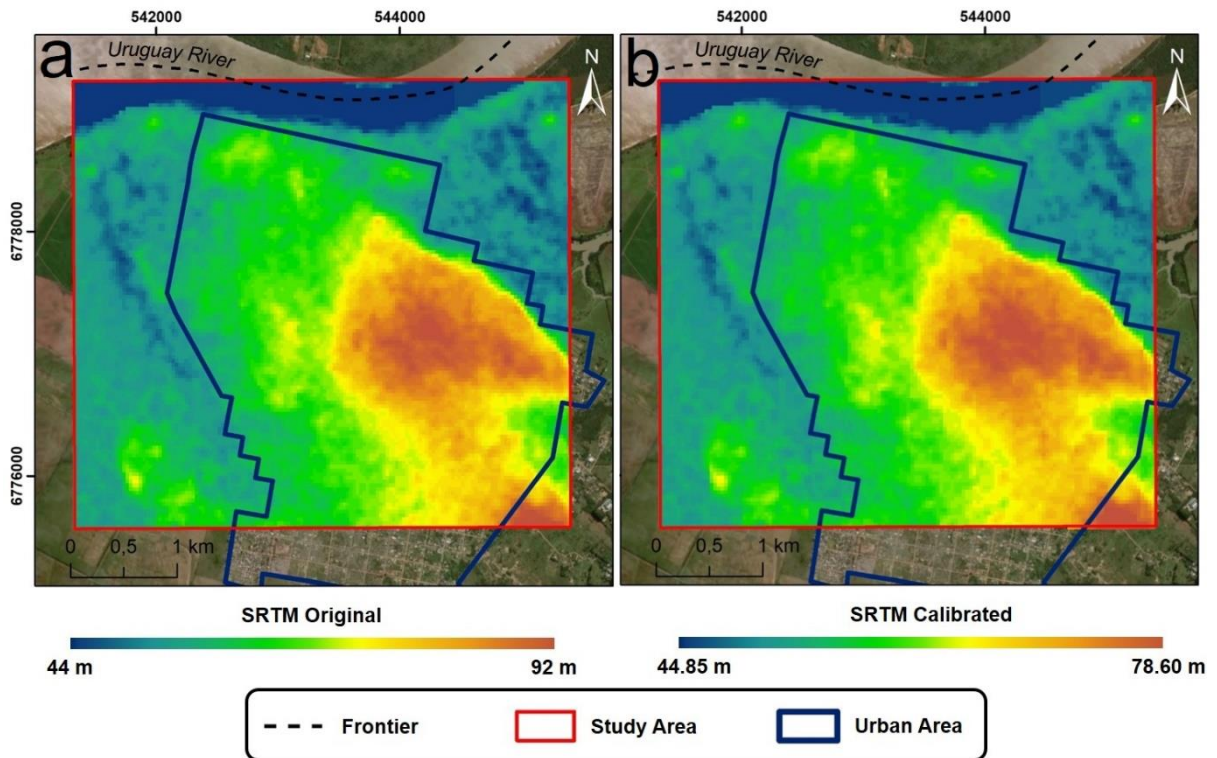


Figure 4.7 Digital elevation model (DEM): (a) SRTM original; (b) SRTM calibrated.

Comparing the error evaluators, it was already expected that the calibrated SRTM mean of the orthometric height variation (ΔH) would be zero (Table 4.4). According to Araújo *et al.* (2018) this happens due to the DEM plan being perfectly adjusted to the GCP network plan after calibration, linking the MDE calibration to the Brazilian Geodetic System (SGB). In relation to the RMSE of the original SRTM (non-calibrated SRTM), a RMSE of 3.14 m was found from comparison to the GCPs. This accuracy is approximately 2 times greater than what

was reported in the original SRTM specifications (6.20 m for South America). Araújo *et al.* (2018) found a similar value (3.10 m) when evaluating the DEM from SRTM at regional-scale analysis for the Piranhas–Açu River basin, in northeastern Brazil. When calibrating the SRTM, an extreme improvement of the RMSE was verified, where the adjusted value of 1.00 m was found. In this way, a 68.15 % decrease of RMSE value for the calibrated SRTM compared to the non-calibrated SRTM was found (Table 4.4).

Table 4.4 Indicators of DEM errors in relation to GCPs.

DEM	Mean of ΔH (m)	RMSE (m)
SRTM _{Original}	-2.84	3.14
SRTM _{Calibrated}	0.00	1.00

Assuming that the calibrated SRTM is linked to the SGB, it was possible to apply the five flood hazard classes to the altimetric model, as shown in Table 4.5. After the spatialization of the classes it was possible to observe the flood behavior in the study area (Figure 4.8).

Table 4.5 Classes of flood hazard mapping in Itaqui, southern Brazil.

Class	Altimetric river quota used as indicator
Extremely high flood hazard	< 51.66
High flood hazard	51.66 ----- 53.45
Moderate flood hazard	53.45 ----- 55.92
Low flood hazard	55.92 ----- 57.24
Non-floodable	> 57.24

Mapping results of the flood hazard classes helped to identify areas with greatest potential for damage to the population in the study area. In general, there was a river gradient upstream from the urban city center, mainly around the north and west neighborhood outskirts of the urban area, with greater emphasis on the Cerrinho Dois Umbus, Centro, Ponte Seca, Varzea, Enio Sayo, and Capelinha neighborhoods (Figure 4.8).

The methodological approach and resulting flood hazard map highlighted flood-prone areas throughout the municipality of Itaqui that have the potential of being exposed to flooding events, inflicting suffering on the population and substantial material damage. Figure 4.9 illustrated the boundaries of the Uruguay River flooded area for a 100-year return period ($T_r = 100$ years), obtained from the proposed model, also indicating flood-prone areas. This return period shows the same flood pattern that occurred in July 1983 when Itaqui suffered its worst

historical flood (altimetric level = 57.24 m). According to Saueressig and Robaina (2015), the water level reached the Marechal Deodoro Square, the courtyard of the Itaquí prison (Figure 4.9), and most of the neighborhoods bordered by the Olaria stream.

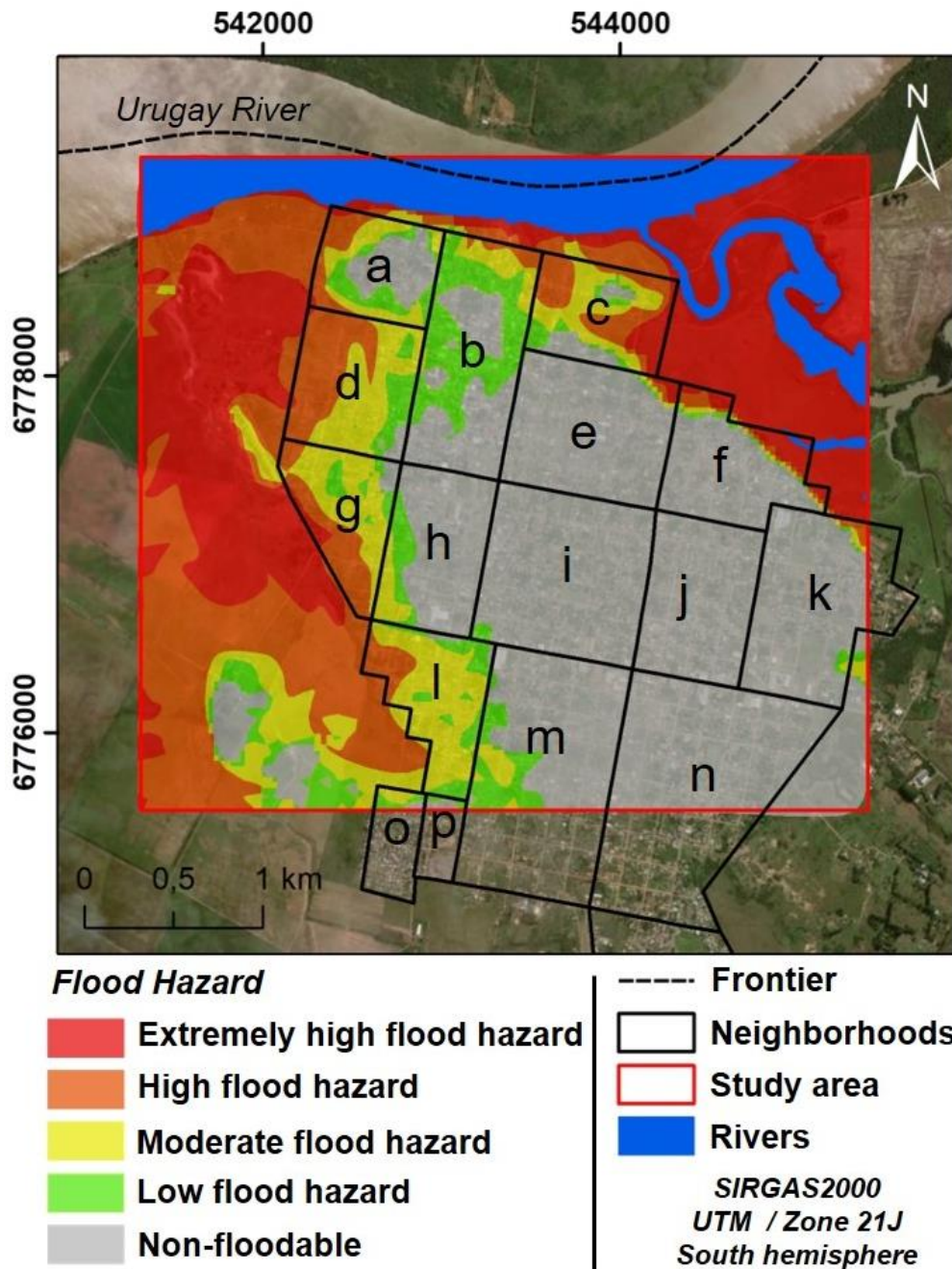


Figure 4.8 Flood hazard map of Itaquí, Rio Grande do Sul, southern Brazil. Neighborhoods: (a) Cerrinho Dois Umbus; (b) Centro; (c) Ponte Seca; (d) Varzea; (e) Cidade Alta; (f) Cohab; (g) Enio Sayago; (h) Estacao; (i) Capelinha; (j) Dr. Ayub; (k) Jose da Luz; (l) Vinte e Quatro de Maio; (m) Chacara; (n) Cafifas; (o) Vila Nova; and (p) Uniao.

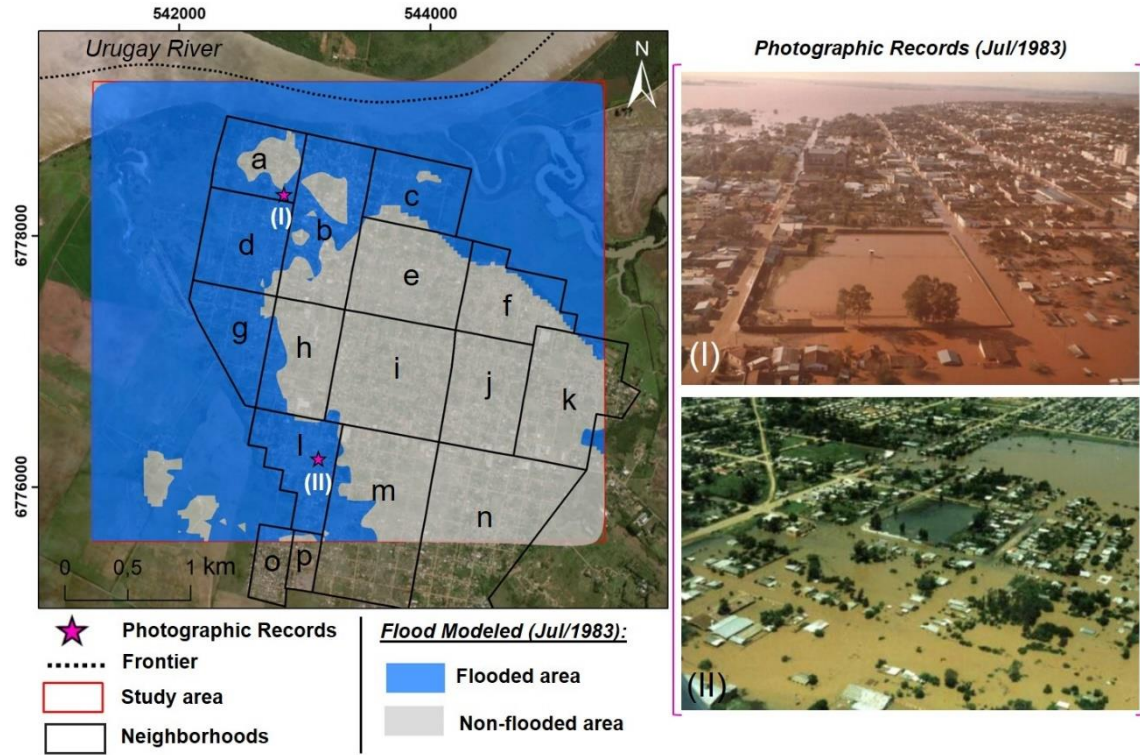


Figure 4.9 The worst historical flooding of the Uruguay River basin (July 1983) has been used here as a base for a simulated flood event in Itaquí. Neighborhoods: (a) Cerrinho Dois Umbus; (b) Centro; (c) Ponte Seca; (d) Várzea; (e) Cidade Alta; (f) Cohab; (g) Enio Sayago; (h) Estacao; (i) Capelinha; (j) Dr. Ayub; (k) Jose da Luz; (l) Vinte e Quatro de Maio; (m) Chacara; (n) Cafifas; (o) Vila Nova; and (p) Uniao. Photographic records: (I) the courtyard of the prison of Itaquí (Flores and Flores, 1983; Saueressig e Robaina, 2015); (II) the neighborhood of Vinte e Quatro de Maio (Boeira, 1983; Saueressig, 2012).

Geoprocessing techniques were successfully used to visualize the extent of flooding and also to produce a significant improvement in forecasting flood hazard maps, but can be also employed to establish a decision-based support system through a partnership between scientists, territorial planners, and policy makers (Wiles and Levine, 2002; Sole *et al.*, 2007; Korah and López, 2015; Demir and Kisi, 2016; Sahoo and Sreeja, 2017). The hybrid color composite RGBI-765NDWI also highlighted suspended sediment in the water column of the Uruguay River and its tributaries. The result is a scene with intrinsic differences in water color with regard to water quality and it therefore benefits from precise demarcation between the inundated and relatively dry areas, i.e., “flooded” and “non-floodable” classes, respectively. Comparison between the flood simulation model for the 12 June 2017 annual maximum level record and the CBERS-4 MUX satellite image for the same date showed that similar spatial behavior was verified in both flooded areas (Figure 4.10). A similitude is prominent between the result of the flood modeling and the real flooded area based only on visual analysis (Figures 10a and 10b, respectively).

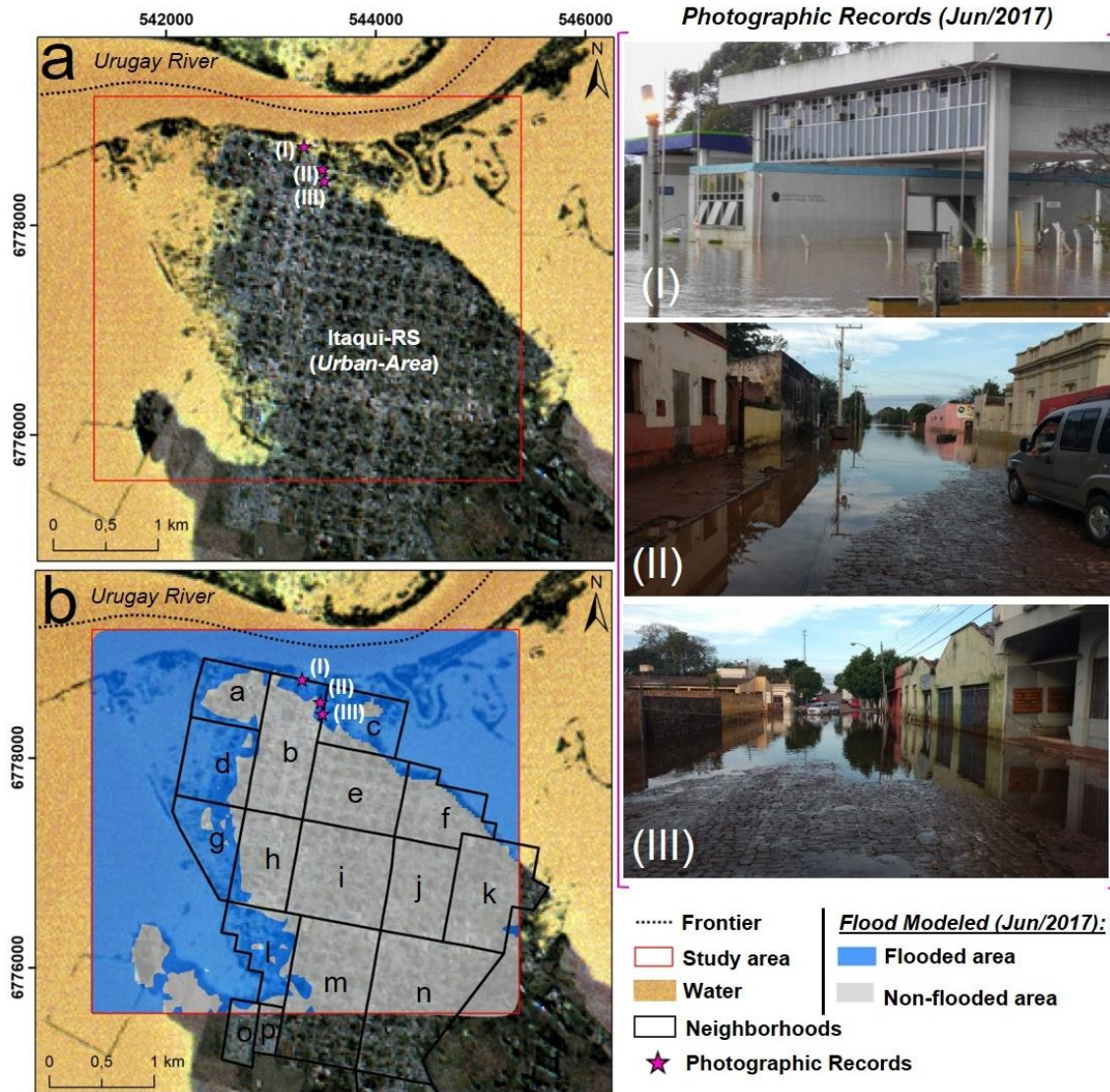


Figure 4.10 The 2017 historical flooding of the Uruguay River basin: (a) CBERS-4 MUX satellite image showing the extent of the floods in the Itaqui city area on 12 June 2017 (hybrid color composition: RGBI-765NDWI); and (b) simulated flood event in Itaqui for the same satellite imaging date. Neighborhoods: (a) Cerrinho Dois Umbus; (b) Centro; (c) Ponte Seca; (d) Varzea; (e) Cidade Alta; (f) Cohab; (g) Enio Sayago; (h) Estacao; (i) Capelinha; (j) Dr. Ayub; (k) Jose da Luz; (l) Vinte e Quatro de Maio; (m) Chacara; (n) Cafifas; (o) Vila Nova; and (p) Uniao. Photographic records: (I) the Federal Revenue Customs Building; (II) Osvaldo Aranha street (Silva, 2017); (III) Borges do Canto street (Silva, 2017).

Mukolwe (2016) emphasized that supporting strategies for flood hazard mitigation, or even a sufficient understanding of the application of their spatial distribution, is a relevant enterprise for assisting government management and risk planning. In practice, the methodological strategy and the resulting models presented in this study can be used for the operational real-time phase of flood monitoring during seasonal flood events in the Uruguay River basin. Such a methodological approach based on control by the local civil defense will allow residents to be evacuated from the areas that will be affected. Thus, the communities who

reside in “volantes houses” can be moved to places further from the flood hazard area, and those who reside in masonry houses can be removed and sheltered, in addition to reducing damage costs by minimizing losses of belongings.

4.6 Conclusions

A large part of the city of Itaquí is in floodplain area of the Uruguay River, as are many of the riverside cities of the study area (Saueressig, 2012). The floods in these regions are intimately linked to the rise of the river level. Therefore, in the case under study, the river level altimetry is the main driver of the flood hazard.

Flood hazard maps are crucial for planning and intervention in flood-prone areas. The results of the Itaquí case study can mainly be applied to characterizing hazards and supporting the implementation of flood risk management plans and flood risk maps for river basins and coastal areas, thus improving the overall availability of such risk management tools. An equivalent methodological approach could be helpful, for instance, in preparing urban charts to identify areas more suitable to occupation in the municipality. In cases where the areas are already occupied, like in some locations of the Itaquí city center, the result could be useful for defining and implementing the necessary measures that address potentially damaging events.

In Brazil, only a few studies involve mapping to assess potential flood damage. Spatial details of the hazard indicators are a valuable tool for flood risk management since the map provides a more direct and fast assessment than other methods. The methodology and materials applied to Itaquí proved effective in identifying flood hazard areas using free DEM from SRTM images that were calibrated based on a post-processed high-precision GNSS database, historic river level gauge data, and geoprocessing techniques, as basic information.

It is worth mentioning that the methodological approach applied to the Itaquí is adequate to be replicated to other municipalities, in particular those of riparian and coastal communities. The flood hazard mapping methodology could be particularly useful for regions with a good historic time series of fluvimetric level gauge data. In general, the most limiting factors to be considered for adopting these methodological approaches are currently the availability of high-accuracy altimetry points, the GCPs, for calibrating the free DEM from the SRTM scene in regions impacted by a series of flood events. Such a procedure involves a large amount of time, both for the collection of local GCP data and also for postprocessing data treatment. However, depending on the geographic location, IBGE level references (RRNN) can be used as GCPs.

This flood hazard mapping in digital format can be used as a database to assist governmental stakeholders, e.g., civil defense, in partnership with other sectors of civil society

for implementation of flood risk management plans that are more adaptable to local restrictive environmental constraints. Thus, composing these plans can be more flexible, easily modifiable, and updatable in accordance with the distinguishing physiographic and socioeconomic setting of the river basin.

In this distinct case study, the scenario modeling for the 1983 and 2017 flooding events were compared with a real flood of 12 June 2017 and high visual similarity was established between them. The study area generally covers residential areas. Considering the results of this case study, it is crucial to advise the Itaqui policy makers and politicians that a planned public policy should be implemented to relocate part of the urban population that occupy areas of high flood hazard. However, the removal process of inhabitants to other areas without hazard, or even less risk, is complex and requires a multidisciplinary strategy. It is already known that the population will suffer historical, social, and cultural impacts that will make the planning more difficult to be entirely applied. Therefore, it is necessary that people have decent housing, with adequate infrastructure and basic sanitation, reducing their exposure and vulnerability to risk adversity. Furthermore, it is necessary for communities to understand the importance of these changes, not only for the population's health but also for the Itaqui economy and sustainability.

This paper also demonstrates that well-applied technical measures based on geotechnologies, such as remote sensing, GIS, and high-accuracy geodesy, give results in return that can be very effective in urban and rural management with low-cost investments, highlighting the unique features of a given locality, especially floodplains and flat low-lying areas. This methodological approach is very effective for mitigating flooding damage in coastal and riparian areas. It can be valuable in reducing strategic monitoring costs and the operational expenses of providing assistance to population affected by severe flooding events and their consequences.

4.7 Acknowledgments

The authors express special thanks to the Secretary of Environment and Sustainable Development of Rio Grande do Sul for providing river level gauge data. We also thank the reviewers of the *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)* journal for their many insightful comments.

4.8 References

Abreu, R. F., Cunningham, C., Rudorff, C. M., Rudorff, N., Abatan, A. A., Dong, B., Lott, F. C., Tett, S. F. B., and Sparrow, S. N.: Contribution of anthropogenic climate change to

- April–May 2017 heavy precipitation over the Uruguay river basin, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 12, 1–5, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D18-0102.1>, 2018.
- Alaghmand, S., Abdullah, R. B., Abustan, I., and Vosoogh, B.: GISbased River Flood Hazard Mapping in Urban Area (A Case Study in Kayu Ara River Basin, Malaysia), *Int. J. Eng. Technol.*, 2, 488–500, 2010.
- ANA – Agência Nacional de Águas: Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras, Edição Especial, Brasília-DF, p. 163, available at: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioeshidrograficas2014.pdf> (last access: 10 June 2018), 2015.
- APFM – Associated Programme on Flood Management: Integrated flood management tools series: Flood Mapping, Issue 20, available at: https://library.wmo.int/pmb_ged/ifmts_20.pdf (last access: 11 June 2018), 2013.
- Araújo, P. V. N., Amaro, V. E.; Alcoforado, A. V. C., and Santos, A. L. S.: Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil, *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 41, 351–364, https://doi.org/10.11137/2018_1_351_364, 2018.
- Arrighi, C., Brugioni, M., Castelli, F., Franceschini, S., and Mazzanti, B.: Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modelling and census data, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1375–1391, <https://doi.org/10.5194/nhess13-1375-2013>, 2013.
- Bariani, C. J. M. V. and Bariani, N. M. V.: Distribuição espacial mensal de variáveis físicoquímicas em cursos hídricos de Itaquí, RS, *Geografia Ensino & Pesquisa*, 17, 167–181, <https://doi.org/10.5902/2236499410780>, 2013.
- Barros, V. R., Doyle, M. E., and Camilloni, I. A.: Precipitation trends in southeastern South America: Relationship with ENSO phases and with low-level circulation, *Theor. Appl. Climatol.*, 93, 19–33, <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0329-x>, 2008.
- BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento: Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável da Região da Bacia do Rio Uruguai (Parte Brasileira), Diagnóstico da Região da Bacia Uruguai, Relatório Final do Componente 1, 555 pp., available at: http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/informes/pdfs/Relatorio_Diagnostico_VersaoFinal.pdf (last access: 10 June 2018), 2008.

- Boggione, G. A., Pereira, G., Cardozo, F. S., and Fonseca, L. M. G.: Avaliação de imagens simuladas da câmera MUX do satélite CBERS-4 aplicadas à análise ambiental, *Bol. Ciênc. Geod.*, sec. Artigos, 20, 590–609, 2014.
- Chen, J., Hill, A. A., and Urbano, L. D.: A GIS-based model for urban flood inundation, *J. Hydrol.*, 373, 184–192, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.021>, 2009.
- Cook, A. and Merwade, V.: Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping, *J. Hydrol.*, 377, 131–142, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>, 2009.
- Costa, S. B. and Lourenço, R. W.: Geoprocessing applied to the assessment of environmental noise: a case study in the city of Sorocaba, São Paulo, Brazil, *Environ. Monit. Assess.*, 172, 329–337, <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1337-3>, 2011.
- Demir, V. and Kisi, O.: Flood Hazard Mapping by Using Geographic Information System and Hydraulic Model: Mert River, Samsun, Turkey, *Adv. Meteorol.*, 2016, 4891015, <https://doi.org/10.1155/2016/4891015>, 2016.
- Dhiman, R., VishnuRadhan, R., Eldho, T. I., and Inamdar, A.: Flood risk and adaptation in Indian coastal cities: recent scenarios, *Appl. Water Sci.*, 9, 1–16, <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0881-9>, 2019.
- EB – Exército Brasileiro: 1º Regimento de Cavalaria Mecanizado, Seção de Comunicação Social, Apoio as famílias atingidas pela enchente, 2017.
- Elnazer, A. A., Salman, S. A., and Asmoay, A. S.: Flash flood hazard affected Ras Gharib city, Red Sea, Egypt: a proposed flash flood channel, *Nat. Hazards*, 89, 1389–1400, <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3030-0>, 2017.
- ERDAS – Earth Resource Data Analysis System: ER Mapper: User’s guide, Norcross, GA, USA, 278 pp., 2008.
- ESRI – Environmental Systems Research Institute: ArcGIS Desktop: Release 10, Redlands, CA, USA, 2011.
- Forkuor, G. and Maathuis, B.: Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models over Two Regions in Ghana – Implications for Hydrological and Environmental Modeling, in: *Studies on Environmental and Applied Geomorphology*, edited by: Piacentini, M. and Miccadei, E., IntechOpen, <https://doi.org/10.5772/28951>, 2012.
- Gallien, T. W., Kalligeris, N., Delisle, M. P. C., Tang, B. X., Lucey, J. T. D., and Winters, M. A.: Coastal Flood Modeling Challenges in Defended Urban Backshores, *Geosciences*, 8, 1–24, <https://doi.org/10.3390/geosciences8120450>, 2018.

- Gorokhovich, Y. and Voustianiouk, A.: Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics, *Remote Sens. Environ.*, 104, 409–415, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.012>, 2006.
- Gupta, A. K.: Flood Disaster Mitigation and Management: A Synthesis and Key Lessons, *Disast. Dev.*, 3, 163–175, 2009.
- Hengl, T. and Evans, I. S.: Mathematical and digital models of the land surface, in: *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*, edited by: Hengl, T. and Reuter, H. I., Elsevier, 31–64, [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00002-0), 2009.
- IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 151 pp., 2014.
- Jensen, J. R.: Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres, Tradução da Segunda Edição, Parêntese Editora, São José dos Campos, 598 pp., 2009.
- Jongman, B.: Effective adaptation to rising flood risk, *Nat. Commun.*, 9, 1986, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04396-1>, 2018.
- Joshi, P. M., Sherasia, N. K., and Patel, D. P.: Urban flood mapping by geospatial technique a case study of Surat City, *IOSR J. Eng.*, 2, 43–51, 2012.
- Kendall, M. G.: Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London, 1975.
- Komi, K., Neal, J., Trigg, M. A., and Diekkrüger, B.: Modelling of flood hazard extent in data sparse areas: a case study of the Oti River basin, West Africa, *J. Hydrol.: Reg. Stud.*, 10, 122–132, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.03.001>, 2017.
- Korah, P. I. and López, F. M. J.: Mapping Flood Vulnerable Areas in Quetzaltenango, Guatemala using GIS, *J. Environ. Earth Sci.*, 5, 132–142, 2015.
- Liu, W. and Yamazaki, F.: Review article: Detection of inundation areas due to the 2015 Kanto and Tohoku torrential rain in Japan based on multi-temporal ALOS-2 imagery, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1905–1918, <https://doi.org/10.5194/nhess18-1905-2018>, 2018.
- Mann, H. B.: Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245–259, <https://doi.org/10.2307/1907187>, 1945.
- McCuen, R. H.: Hydrologic Analysis and Design, 2nd Edn., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998.

- McFeeters, S. K.: The use of the normalized difference water index (ndwi) in the delineation of open water features, *Int. J. Remote Sens.*, 17, 1425–1432, <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>, 1996.
- Mistry, N. J.: Urban Floods: Case Study of Surat, *Disast. Dev.*, 3, 139–161, 2009.
- Mukolwe, M. M.: Flood hazard mapping: uncertainty and its value in the decision-making process, CRC Press, Balkema, 150 pp., 2016.
- Noman, N. S., Nelson, E. J., and Zundel, A. K.: Review of automated floodplain delineation from digital terrain models, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 127, 394–402, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:6\(394\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:6(394)), 2001.
- Ouma, Y. O. and Tateishi, R.: Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment, *Water*, 6, 1515–1545, <https://doi.org/10.3390/w6061515>, 2014.
- Ovando, A., Tomasella, J., Rodriguez, D. A., Martinez, J. M., Siqueira-Junior, J. L., Pinto, G. L. N, Passy, P., and Vauchel, P.: Extreme flood events in the Bolivian Amazon wetlands, *J. Hydrol.: Reg. Stud.*, 5, 293–308, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.004>, 2016.
- Pasquini, A. I. and Depetris, P. J.: Discharge trends and flow dynamics of South American rivers draining the Southern Atlantic seaboard: An overview. *J. Hydrol.*, 333, 385–399, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.005>, 2007.
- Patel, D. P., Ramirez, J. A., Srivastava, P. K., Bray, M., and Han, D.: Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5, *Nat. Hazards*, 89, 93–130, <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2956-6>, 2017.
- R Development Core Team: R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, available at: <http://www.R-project.org/>, last access: 28 December 2017.
- Sahoo, S. N. and Sreeja, P.: Development of Flood Inundation Maps and Quantification of Flood Risk in an Urban Catchment of Brahmaputra River, *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Pt. A*, 3, A4015001, <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000822>, 2017.
- Sanders, B. F.: Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling, *Adv. Water Resour.*, 30, 1831–1843, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.02.005>, 2007.
- Sarhadi, A., Soltani, S., and Modarres, R.: Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis, *J. Hydrol.*, 458–459, 68–86, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.039>, 2012.

- Saueressig, S. R.: Zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana de Itaqui-RS, MS Dissertation, Federal University of Santa Maria, Santa Maria-RS, Brazil, 101 pp., available at: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/9362> (last access: 25 April 2018), 2012.
- Saueressig, S. R. and Robaina, L. E. S.: Zoneamento das Áreas de Risco a Inundação da Área Urbana de Itaqui (RS), *Boletim Gaúcho de Geografia*, 42, 672–687, 2015.
- Savage, J., Bates, P., Freer, J., Neal, J., and Aronica, G.: The impact of scale on probabilistic flood inundation maps using a 2D hydraulic model with uncertain boundary conditions, in: *Vulnerability, Uncertainty and Risk: quantification, Mitigation, and Management (ICVRAM Proceedings, 13–16 July 2014, Liverpool)*, American Society of Civil Engineers, Liverpool, UK, 279–289, <https://doi.org/10.1061/9780784413609.029>, 2014.
- Silva, R. M.: Proposta de metodologia para definição de um modelo digital de elevação para monitoramento de áreas de inundação, MS Dissertation, Federal University of Pampa, AlegreteRS, Brazil, 145 pp., available at: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/riu/2198> (last access: 25 April 2018), 2017.
- Silva, R. M., Moreira, V. S., and Lopes, A. B.: Geodetic method to obtain a digital elevation model associated to the Brazilian Geodetic System, *Int. J. Eng. Tech. Res.*, 7, 14–17, 2017.
- Sinnakaudan, S. K., Ghani, A. A., Ahmad, M. S. S., and Zakaria, N. A.: Flood risk mapping for Pari River incorporating sediment transport, *Environ. Model. Softw.*, 18, 119–130, [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(02\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(02)00068-3), 2003.
- Sole, A., Giosa, L., and Copertino, V.: Risk flood areas, a study case: Basilicata region, *WIT T. Ecol. Environ.*, 104, 213–228, <https://doi.org/10.2495/RM070211>, 2007.
- Speckhann, G. A., Chaffe, P. L. B., Goerl, R. F., Abreu, J. J., and Flores, J. A. A.: Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model, *Hydrolog. Sci. J.*, 63, 87–100, <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1409896>, 2017.
- Szypuła, B.: Digital Elevation Models in Geomorphology, in: *Hydro-Geomorphology*, edited by: Shukla, D. P., IntechOpen, <https://doi.org/10.5772/intechopen.68447>, 2017.
- Tanguy, M., Chokmani, K., Bernier, M., Poulin, J., and Raymond, S.: River flood mapping in urban areas combining Radarsat-2 data and flood return period data, *Remote Sens. Environ.*, 198, 442–459, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.042>, 2017.

- Tucci, C. E. M., Clarke, R. T., Collischonn, W., Silva Dias, P. L., and Oliveira, G. S.: Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin, *Water Resour. Res.*, 39, 1181, <https://doi.org/10.1029/2003WR002074>, 2003.
- Wiles, J. J. and Levine, N. S.: A combined GIS and HEC model for the analysis of the effect of urbanization on flooding: the Swan Creek watershed, Ohio, *Environ. Eng. Geosci.*, 8, 47–61, <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.8.1.47>, 2002.
- Yue, S. and Wang, C.: The Mann–Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series, *Water Resour. Manage.*, 18, 201–218, <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>, 2004.
- Zar, J. H.: *Biostatistical Analysis*, 5th Edn., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 944 pp., 2010.
- Zhang, W., Yan, Y., Zheng, J., Li, L., Dong, X., and Cai, H.: Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China, *Global Planet. Change*, 69, 35–47, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.07.003>, 2009.



Capítulo 5 – Mapeamento de área de inundação por marés, frentes aos cenários de mudanças climáticas: estudo de caso em um estuário tropical do semiárido brasileiro (3º Artigo⁴)

Tidal flood area mapping fronts the climate change scenarios: case study in a tropical estuary of Brazilian semiarid

Paulo Victor do Nascimento Araújo^{1, 2}, Venerando Eustáquio Amaro¹; Leonlene de Sousa Aguiar¹, Caio Cortez de Lima³ & Alexandre Bernardino Lopes⁴

¹Postgraduate Program in Geodynamics and Geophysics (PPGG), Federal University of Rio Grande do Norte, P.O. Box 1524, Natal-RN, 59078-970, Brazil

²Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Norte, Macau-RN, 59500-000, Brazil

³Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 59015-000, Brazil

⁴Center of Sea Studies, Federal University of Parana, P.O. Box 61, Curitiba-PR, 83225-976, Brazil

Emails: paulo.araujo@ifrn.edu.br; venerando.amaro@gmail.com; leonlene@gmail.com; caioc.lima@hotmail.com.br; ablopesrp@yahoo.com.br

Abstract

Previous studies on tidal flood mapping are mostly with continental and/or global scale approaches. Besides, the few works on local scale perception are concentrated in Europe, Asia, and North America. Here we present a case study approaching a flood risk mapping methodology against climate change scenarios in a region with a strong environmental and social appeal. The study site is an estuarine cut in the Brazilian semi-arid, covering part of two state conservation units, which has been in recent years suffering severe consequences from flooding by tides. In this case study, high geodetic precision data (LiDAR DEM), together with robust tidal return period statistics and data from current sea level rise scenarios were used. We found that approximately 118.26 km² of the estuary understudy is at high risk, extremely high risk and urgently in need of mitigation measures. This case study can serve as a basis for future management actions as well as a model for applying risk mapping in other coastal areas.

Keywords: Sea Level, flood hazard, flood risk, LiDAR, GIS.

⁴ Artigo a ser submetido ao periódico “*Natural Hazards and Earth System Sciences*” (ISSN 1684-9981).

5.1 Introduction

Climate change has been associated with various environmental and socioeconomic damages worldwide, with global mean sea level rise (SLR) being one of the main associated phenomena (Nicholls and Cazenave, 2010; IPCC, 2014; Busman *et al.*, 2016; Dangendorf *et al.*, 2019; Bamber *et al.*, 2019). During the last quarter-century, the global mean SLR has occurred at an accelerating rate, averaging about +3 mm/year, threatening coastal communities and ecosystems worldwide (Nerem *et al.*, 2018; Bamber *et al.*, 2019).

The changes produced by rising and falling the mean sea levels have important implications for the dynamics and morphology of coastal environments, and it is in these environments that a considerable part of the world's population lives (Neumann *et al.*, 2015). Besides, it has been causing flooding of natural habitats and coastal infrastructures and consequently causing environmental and socioeconomic impacts of varying magnitude (Dwarakisha *et al.*, 2009; IPCC, 2014; Murray *et al.*, 2019). Decades ago, the flooding usually happened only during a powerful or localized storm now can happen when a steady breeze or a change in coastal current overlaps with high tide (NOAA, 2019).

In Brazil, the current panorama of coastal flooding is extremely worrying (Losada *et al.*, 2013). The Brazilian Panel on Climate Change (PBMC) systematized data and information indicating that the different regions of Brazil are already experiencing changes in their characteristic climates (PBMC, 2014). These changes are expected to affect the country's natural, human, infrastructure and production systems in a non-uniform manner (Brasil, 2016). The country stands out as the seventh largest nation in the world by coastal population and the seventh largest proportion of the coastal zone in the low-lying area (Mcgranahan *et al.*, 2007). About 25% of the Brazilian population lives in the coastal zone and has lately been suffering from the damage caused by the relative rise in sea level (SMC-Brasil, 2018). Approximately 60% of the natural events that hit Brazil from 1948 to 2006 with harmful consequences to the population were related to flooding and/or sea advances (Brasil, 2016). These data, combined with scenarios of rising sea level trends (Easterling *et al.*, 2000), warn of the need for (local scale) projections for the next decades, to support the preparation and planning to respond to increasing threat related to sea level rise. Climate risk adaptations involving large infrastructure investments represent difficult decisions and require an accurate information base (Hall *et al.*, 2019; Kulp and Strauss, 2019).

Coastal flooding is becoming more frequent and expensive with sea level rise (SLR) (Herdman *et al.*, 2018). The 5th report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) presented climate scenarios called Representative Concentration Pathway (RCP)

(IPCC, 2014). Each RCP was built for the global scale and considers for the projection of relative elevation of MSL the historical evolution of several factors, such as gas emission, the concentration of effect gases, among others. Although in all scenarios the projected increase in MSL is a maximum of 1m for the year 2100, they have been prepared for global and continental scale. Many studies have analyzed the risk arising from these flood scenarios across the low-lying coastal zone (altitude up to 10m) (Nicholls *et al.*, 2007; Dwarakish *et al.*, 2009; Nicholls and Cazenave, 2010; Nicholls *et al.*, 2011; Boori *et al.*, 2012; Busman *et al.*, 2016). However, the lack of work on the theme in focus in the South American region and especially in Brazil is striking. Therefore, the objective of this work was to carry out a tidal flood risk mapping, given the current scenarios of rising sea level trends, adopting as a case study the Piranhas-Açu Estuary, the northern portion of the state of Rio Grande do Norte, Brazil.

5.2 Study area

The tropical watershed of the Piancó-Piranhas-Açu River is located in northeastern Brazil and is the largest basin of the Northeast East Atlantic Hydrographic Region, with a total area of 43,683 km². Its territory is divided between the states of Paraíba (60%) and Rio Grande do Norte (40%). Fully inserted in very hot and semi-arid climate territory, the basin presents concentrated rainfall in a few months of the year (rainy late to autumn) and a pattern of strong interannual variability, characterized by alternation between years of above average, regular and consecutive years of below-average values resulting in prolonged droughts and low water availability. Like the other rivers in the basin, the Piancó-Piranhas-Açu river is an intermittent river in natural conditions, and it rises in Serra de Piancó, in the state of Paraíba, and flows into the Atlantic Ocean on the northern coast of the state of Rio Grande do Norte, forming in its low course the Piranhas-Açu Estuary, is considered the most important river of the RN (Nascimento, 2009; ANA, 2016). Its perpetuation occurs through two regularization reservoirs built by the National Department of Drought Works (DNOCS): Curema/Mãe d'Água, in the State of Paraíba, and Armando Ribeiro Gonçalves, in the state of Rio Grande do Norte. These reservoirs correspond to the main water sources in the basin, which are also responsible for meeting external water demands, which are associated with adjacent basins. It should be noted that the basin will soon also be the recipient of water from the São Francisco River Basin Integration Project (SFIP).

The study area covers the entire Piancó-Piranhas-Açu estuary. This area of approximately 536 km² is an estuarine section comprising parts of 4 municipalities of the

northern coast of the state of Rio Grande do Norte (Porto do Mangue, Carnaubais, Pendencias, and Macau) (Figure 5.1).

This area is represented by a semi-arid climate, according to Nimer (Nimer, 1972), and it falls into the BSw'h category according to the Köppen classification (Köppen, 1948). The daily temperatures vary from 26°C to 30°C (with a mean temperature of 26.8°C), and the average relative air humidity is 70%. The pluviosity ranges from 1,300 to approximately 2,000 mm y⁻¹ (IDEMA, 1999; Barbosa *et al.*, 2018a). In geomorphological terms, there is a wide fluvial-marine plain that constitutes the Coastal Strip (Barbosa *et al.*, 2018b, Costa *et al.*, 2020). The number and extent of various channels present along adjacent large river plains reveal the great influence of oceanic waters on this stretch of the continent, with tidal action being one of the major natural forces responsible for hydrographic control.

In this region, the local tide is semidiurnal, with two high and two low tides, where the average level set as a reference is 1.39 m above the reduction level (RL), as established by the Hydrography and Navigation Directorate (DHN) of the Brazilian Navy. It has mean semidiurnal high tides of 2.34 m above reduction level, mean quadrature of high tides of 2.21 m, average low tide of 0.43 m of tidal seas below mean level of squared low seas of 0.56 m (Matos *et al.*, 2019; DHN, 2018). As for the marine currents, the region is under the influence of the Southern Equatorial Current that acts throughout the northern coast of Brazil (Diniz *et al.*, 2017).

In general terms, this coastal region has a mosaic of ecosystems marked by mangrove forests, exposed and sheltered sandy ocean beaches, barrier island systems and short-term high-sedimentary dynamic tidal channels (Grigio *et al.*, 2006; Amaro *et al.*, 2012; Santos and Amaro, 2013; Busman, *et al.*, 2016). The industrial sector of the area under study comprises essentially mineral exploration, especially salt, oil, and gas. The extraction of oil and natural gas is a very important activity in the basin and economy of the state of Rio Grande do Norte, due to the royalties generated (IDEMA, 2005). Aquaculture and artisanal fishing also play a part in the local economy, as well as irrigated agriculture, shrimp farming, salt marshes and, more recently, typical wind industry infrastructure.

There are two noteworthy state conservation units in the study area: Ponta do Tubarão State Sustainable Development Reserve (RDSEPT) and the Rosado Dunes Environmental Protection Area (APADR). RDSEPT was created through State Law No. 8.349 of July 18, 2003, and its objectives are to safeguard the traditional way of life, to ensure activities based on sustainable exploitation of natural resources, traditionally developed over generations and adapted to local ecological conditions and which play a fundamental role in protecting nature and maintaining biological diversity. APADR was recently created by State Decree No. 27,695 of

February 21, 2018, and aims to protect biological diversity, discipline the occupation process and ensure the sustainable use of the natural resources of the respective area.

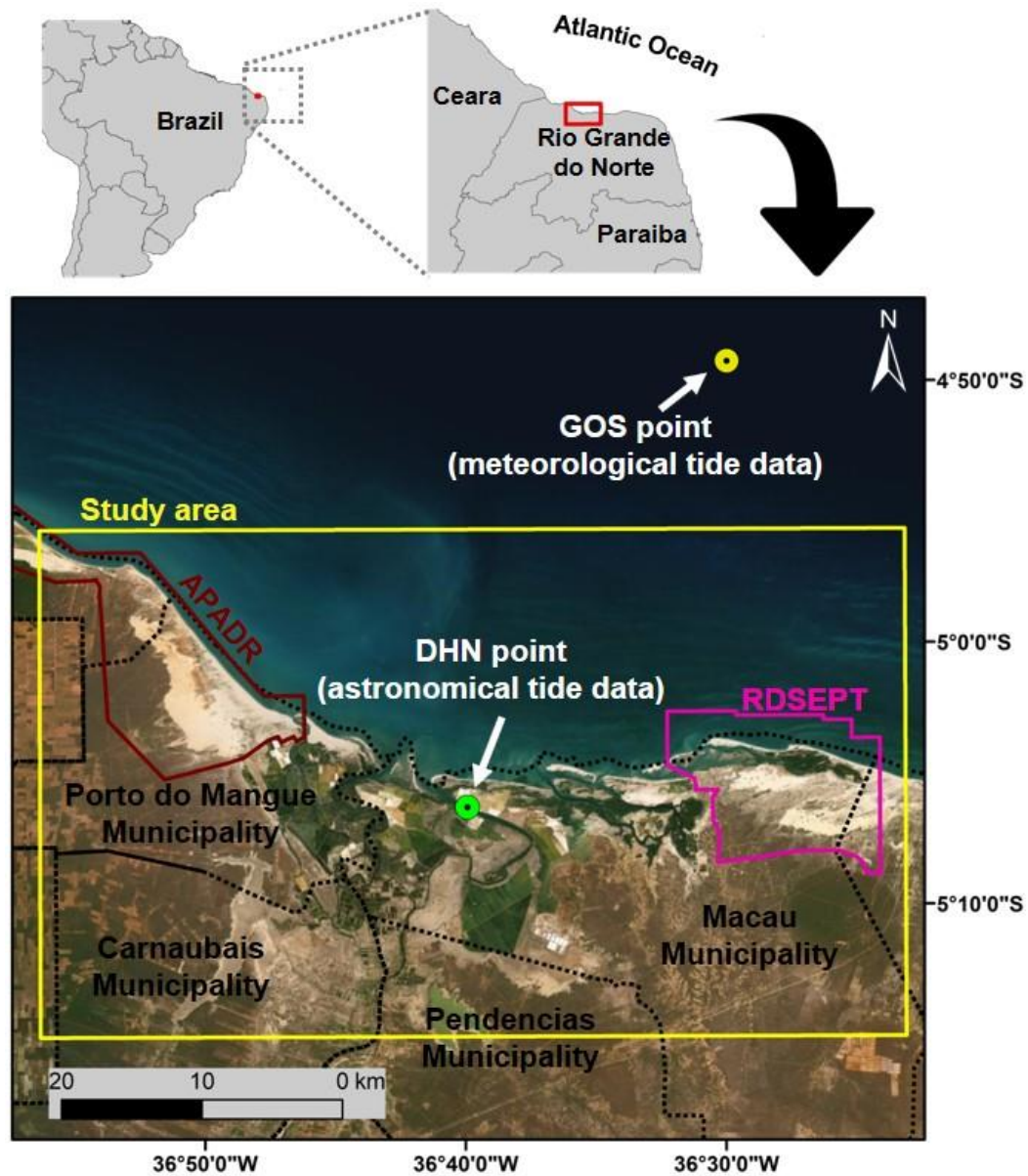


Figure 5.1 Location of the study area. The yellow rectangle represents the delimitation of the study area: Piancó-Piranhas-Açu estuary and its surroundings. The pink polygon highlights the boundary of the Ponta do Tubarão State Sustainable Development Reserve (RDSEPT), while the burgundy polygon delimits the Rosado Dunes Environmental Preservation Area (APADR).

Historically, although the Piranhas-Açu Estuary has suffered from some drastic river flooding in the last decade (2004, 2008 and 2009) as a result of extreme rainfall events (Medeiros and Zanella, 2019; Medeiros, 2019), it has been suffering lately with the effects of tidal flooding. Frequently, due to the effects of the sea, streets and houses are invaded by water,

bringing negative consequences to several communities of the northern coast of Rio Grande do Norte (Figure 5.2). The current facts, allied to the local disordered occupation, the environmental and economic importance of the region, and, finally, the scenarios of sea level rise, make this region an area of great appeal for the development of scientific works, to subsidize information for decision-making on climate change adaptations.

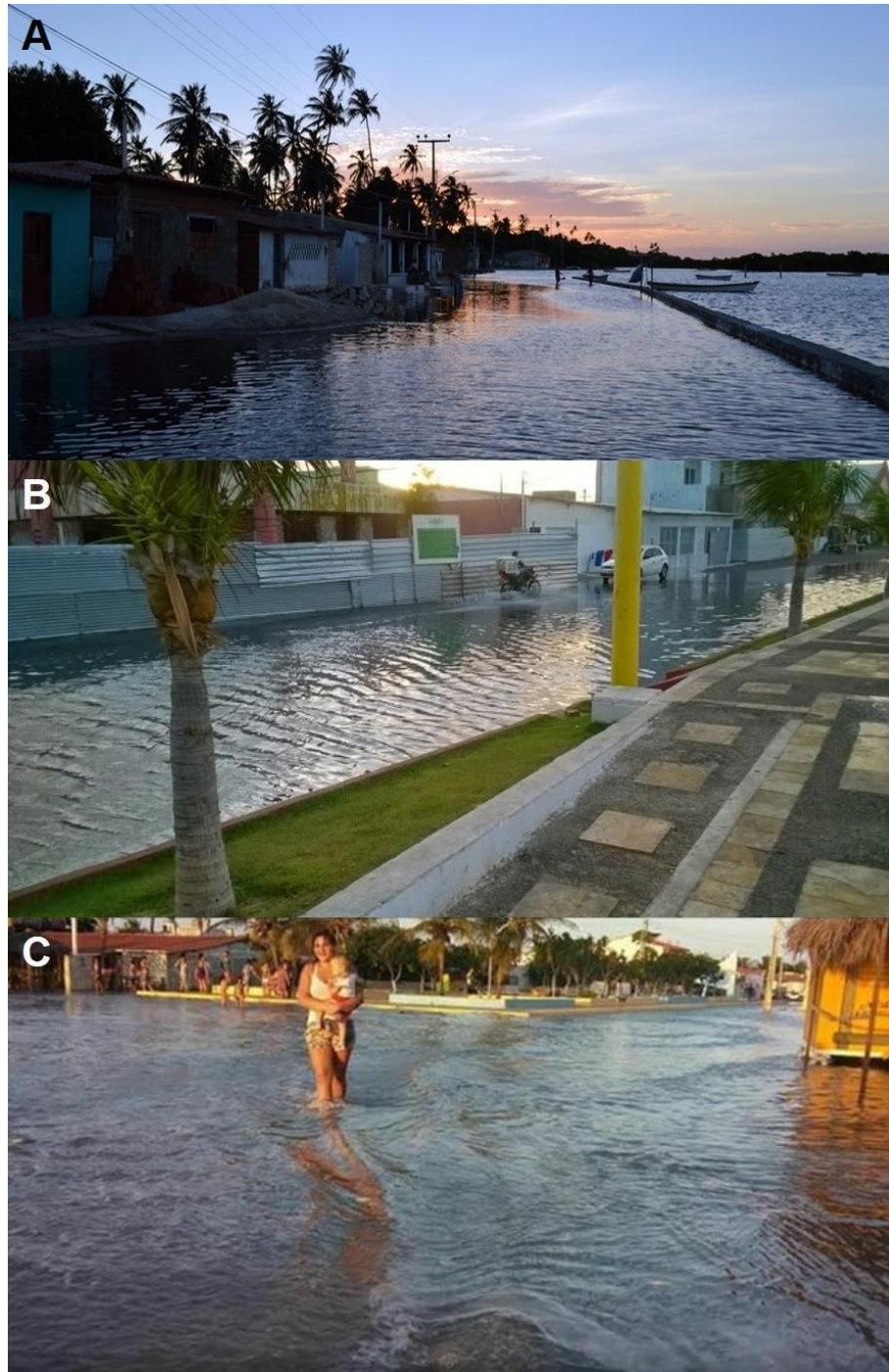


Figure 5.2 Tidal flooding events in north coastal of Rio Grande do Norte State. A: Diogo Lopes community, Macau City, Jan 03, 2015 (Tiago Ezequiel); B: Guamare City, Feb 19, 2015 (Unknown author); C: Galinhos City, Mar 09, 2016 (Unknown author).

5.3 Material and methods

Tidal flood risk mapping was performed using data on the meteorological tide, astronomical tide and a high-resolution LiDAR Digital Elevation Model (DEM), both calibrated for the study area. Data were subjected to statistical analysis and return period calculations. The 20-year return period was adopted as the base reference quota for this study and allied with the projections found in the literature on the global sea level rise for the coming years. Finally, flood risk mapping was performed based on flood scenarios and the vulnerability of land use and occupation.

5.3.1 Tide database

For this study, sea level variation was represented by the sum of the meteorological and astronomical tide (SMC-Brasil, 2018).

5.3.1.1 Meteorological tide (MT)

The MT or storm surge (also known as *non-astronomical sea level*) is the result of atmospheric forcing such as wind pressure or sea level pressure variations. To compose the local MT historical series, the maximum annual tide level was obtained from the data from point 19 (Lat. 4,821 ° W / Long. 36,500 ° S) (Figure 5.1) from the GOS (Global Ocean Surge) database of the SMC-Brasil project (SMC-Brasil, 2018). This database is a selection of regional reanalysis series, located along the Brazilian coast, built with a forced numerical simulation with atmospheric pressure fields and winds and validated for the region. Each of the series has a duration of 60 years (1948-2008) with a time interval of 1 hour (SMC-Brasil, 2018).

5.3.1.2 Astronomical tide (AT)

The AT is defined as the set of regular sea level rise and fall motions over 12 or 24 hours, produced by the gravitational effects of the Earth-Moon-Sun system. Other celestial bodies in the solar system are also attractive, yet small when compared to and considered by the moon and sun. Tide description and prediction at a given location can be done by harmonic tidal analysis (Pugh, 1987). For this study, the maximum annual astronomical tide level was used from the astronomical tide forecast data released by the Brazilian Navy's Directorate of Hydrography and Navigation (DHN), linked to the Port of Macau tidal gauge station (Lat. 4 ° 49 ' 05" S / Long 37 ° 02 ' 04" W) (Figure 1), during the period 1998 to 2018. These data were available through tables showing the maximum and minimum daily values of astronomical tidal heights.

5.3.1.3 Statistical analyzes of tide database

The Mann–Kendall sequential test (Mann, 1945; Kendall, 1975) was applied to evaluate the temporal serial behavior of annual maximum of meteorological tide and astronomical tide. The Mann–Kendall test is a robust, sequential, and non-parametric statistical method used to determine if a specific data series has a temporal tendency towards statistically significant changes. Among its advantages, it does not require normal distribution of data and is only slightly influenced by abrupt changes or non-homogenous series (Zhang *et al.*, 2009). In recent years, with growing concerns over environmental degradation and about the implications of greenhouse gases on the environment, researchers and practitioners have frequently applied the non-parametric Mann–Kendall test to detect trends in recorded hydrologic time series such as water quality, streamflow, and precipitation time series (Yue and Wang, 2004; Araújo *et al.*, 2019). Although it has no influence on the tidal flood risk mapping, the Mann–Kendall test was applied to investigate if the elevation of tides is showing any upward or downward trend.

Then, the data was submitted for fit extreme value of gumbel distribution function (Gumbel, 1958). Extreme value statistics are used primarily to quantify the stochastic behavior of a process at unusually large (or small) values. Particularly, such analyses usually require estimation of the probability of events that are more extreme than any previously observed. Many fields have begun to use extreme value theory, and some have been using it for a very long-time including meteorology, hydrology, finance and ocean wave modeling to name just a few (Gilleland and Katz, 2016). The Gumbel Distribution also is known as Type I extreme value distribution, or Fisher-Tippett type I distribution, has the function of accumulated probabilities given by the equation:

$$F_X(x) = P\{X < x\} = e^{-e^{-y}}$$

Being x the ratio y a reduced variable Gumbel given by:

$$y = \frac{x - \beta}{\alpha}$$

Where α and β are characteristic parameters of the Gumbel line; α represents meter of scale and β the position parameter. The payback period (T_r) in years can be obtained by the equation:

$$x(Tr) = \beta - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right]$$

In this work, the 20-year return period (Tr20) was adopted as the starting reference for flood hazard mapping at present. All statistical analyses were performed using R software (R Development Core Team, 2019). The packages used were “Kendall” and “extRemes”, for Mann – Kendall sequential test and fit extreme value of Gumbel distribution function, respectively.

5.3.2 Adjustment of Reduction Level to the Brazilian Geodetic System

The astronomical tidal information provided by DHN is all linked to the so-called Reduction Level (RL), which is the altimetric reference system for bathymetric depth measurement adopted by the Brazilian Navy (MB). This reference system assigns the average low tides of spring to a measurement reference made at the local level. Thus, the establishment of the local sea level found in the nautical charts and information provided by the Brazilian Navy has its own framework aimed at knowledge of the seabed relief for navigators’ safety (CHM, 2019a, 2019b). Therefore, it is a different altimetric reference than the official geodetic reference system adopted by the country (Matos, 2005; Ramos & Krueger, 2009).

Therefore, to standardize the altimetric reference of this work, Imbituba's Datum Vertical was adopted, linked to the Brazilian Geodetic System (SGB). For this purpose, a level reference point was traced over approximately 50 minutes employing a two-frequency GNSS receiver (L1 / L2) near the port of Macau (Figure 5.3). This landmark, codenamed RN-2 (DHN), was deployed during the construction of the respective navigational station by the Brazilian Navy. After the screening, the GNSS data were submitted to coordinate adjustment post-processing to the MAPGEO2015 geoidal model and obtained its SGB-linked orthometric altitude, through the Precise Point Positioning of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE-PPP). IBGE-PPP is a free online service for GNSS (Global Navigation Satellite System) data post-processing that makes use of the GPS Precise Point Positioning (CSRS) program developed by the Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada. It allows users with GPS and/or GLONASS receivers to obtain coordinates referenced to SIRGAS2000 (Geocentric Reference System for the Americas) and ITRF (International Terrestrial Reference Frame) through precise processing.

Finally, the reduction level (RL) orthometric altitude was obtained by mathematical subtraction operations at the RN-2 (DHN) level reference orthometric altitude:

$$H(RL) = H(RN) - 4.046m = 2.92m - 4.046m = -1.126m$$

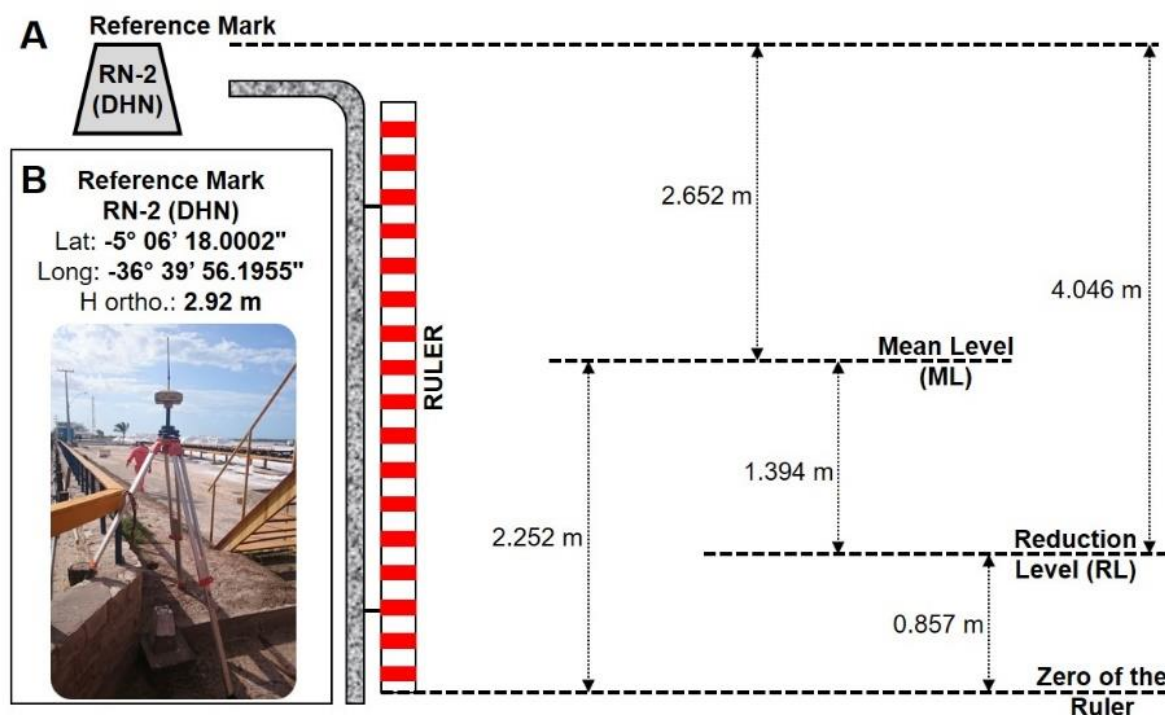


Figure 5.3. Scheme illustrating the differences in quotas between the references adopted by the Brazilian Navy: (A) Reference Mark RN-2 (DHN); (B) Coordinates of Reference Mark RN2-(DHN).

5.3.3 LiDAR Digital Elevation Model

An airborne LiDAR DEM was used, with 1m horizontal spatial resolution and coverage for the entire local area. This DEM was built by PETROBRAS, granted in terms of technical cooperation between the said institution and the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN) and made available by the Graduate Program in Geodynamics and Geophysics (PPGG), utilizing a confidentiality agreement. The survey took place between February and September 2012, through integrated aero photogrammetry. In this aerial survey, a model ALS60 equipment manufactured by Leica Geosystems was used. The average point density was 4.2 per m^2 , with a frequency of 200,000 pulses per second (200 kHz) and a 26° aperture angle (FOV). The operating frequency adopted was 160.2 kHz, with 65 Hz profiling frequency and an average aircraft speed of 190 km / h. The average point spacing was 0.41 m (in the flight direction) and 0.80 m in the transverse flight direction. The geodetic reference system adopted for planimetry was SIRGAS2000. For altimetry, the geoidal model MAPGEO2015 was used. The geometric altitude was converted to orthometric altitude to leave all in the same altimetric

reference (All linked to the Brazilian Geodetic System). The altimetric RMSE of this product, obtained during the evaluation and calibration process (Araújo *et al.*, 2018), was 0.1704 m.

5.3.4 Scenarios for mean sea level rise (MSL)

Sea level rise has been widespread in the international community as one of the impacts related to climate change, where most estimates are projected by the year 2100. For this work we adopted 3 scenarios of sea level rise at a global and regional level, to incorporate the predictions of average sea level rise until the year 2100. The forecast scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (RCP 4.5 = 0.53m and RCP 8.5 = 0.74m) (Church *et al.*, 2013) and IBGE ($\Delta\text{MLS} = 2.1\text{mm/year}$) (IBGE, 2016).

5.3.5 Tidal Flood Risk Mapping

For this work we adopted as a quantitative risk, the likelihood of harmful consequences or expected losses (dead, injured, destroyed and damaged buildings, etc.) occurring as a result of interactions between a natural hazard and conditions of local vulnerability (UNDP, 2004). The formula proposed by Wisner *et al.* (2011), where the same concept was one of the references of the fifth IPCC report (IPCC, 2014):

$$\text{Risk map} = \text{Hazard map} \times \text{Vulnerability map}$$

Where, *Hazard map* is the likelihood of the process occurring with magnitude M (destructive potential) and *Vulnerability map* (physical vulnerability) is the degree of damage or loss to the exposed environment as a result of the impact and as a function of magnitude M .

For hazard mapping flooding was assigned 4 classes based on the scenarios under study, in addition to the current flooding (table 5.1). Each class represented the quota resulting from the sum of:

- + Projection of MSL elevation to 2100;
- + Meteorological tide (Tr_{20});
- + Astronomical tide linked to SGB (Tr_{20});
- + RMSE of DEM.

Table 5.1. Attributed value to hazard map.

Scenario	Value	Hazard
Present	5	High
IBGE	4	Moderate
IPCC RCP 4.5	3	Low
IPCC RCP 8.5	1	Extremely Low

For the construction of the flood vulnerability mapping, the land use and occupation mapping of the region under study was first elaborated. The existing mapping in the literature, proposed by Lima (2016), was updated and expanded through the interpretation of the color image (RGB), vectoring the units in the 1:10,000 scale. Then, the land use and occupation mapping vector file were transformed into a raster file, with a spatial resolution of 1m, due to the spatial resolution of the altimetric data (DEM data). Finally, the raster file was reclassified with vulnerability values, in scores from 1 (least vulnerable) to 5 (most vulnerable), assigned to each use and coverage category (Table 5.2).

Table 5.2. Attributed value to vulnerability map.

Category	Value	Vulnerability
Urban area	5	Extremely High
Oil Exploitation	5	Extremely High
Wind farm	5	Extremely High
Shrimp farm	4	High
Salt pond	4	High
Agriculture area	3	Moderate
Wetlands	2	Low
Caatinga	2	Low
Mangrove	2	Low
Sand banks	1	Extremely Low
Exposed soil	1	Extremely Low
Lagoon	0	No vulnerability
River/Ocean	0	No vulnerability

After obtaining the flood hazard and vulnerability maps, the risk map was obtained using the risk equation mentioned above. The risk was classified into 5 cassettes, according to the values in table 5.3.

Table 5.3. Risk map value range.

Risk	Value Range
Extremely High	> 20 and ≤ 25
High	> 15 and ≤ 20
Moderate	> 10 and ≤ 15
Low	> 5 and ≤ 10
Extremely Low	> 0 and ≤ 5

5.4 Results and discussion

The flood quota reached on a beach is a particularly complex phenomenon, both in the number of elements involved in the flooding process and in the interaction between these elements. However, it was possible to robustly model the complexity of tidal flooding that occurred in the Piranhas-Açu Estuary, as well as the risk in its probabilistic potential for the coming years.

5.4.1 Tidal behavior and return period

The effect of AT and MT on the coast is observed as a variation of sea level or free surface and it is at this level that waves propagate (SMC-Brasil, 2018). From the GOS data and DHN data applied in this work, it was possible to observe the tidal behavior in the tropical Piancó-Piranhas-Açu estuary (Figure 5.4).

The meteorological surge or storm surge is a sea level fluctuation caused by weather effects mainly derived from wind and variations in pressure fields. Throughout the 61 years of data from the GOS point, the maximum annual quota of the meteorological tide presented an average of 12cm and an amplitude of 14cm, with a maximum of 22cm and a minimum of 8cm, in the years 1964 and 1958, respectively. When applying the Mann-Kendall test, no statistically significant trend ($\text{Tau} = -0.123$; $p = 0.16147$) was observed in the dataset.

The astronomical tide is the result of the interaction of the gravitational forces of Earth, Moon and the Sun, being completely predictable. With the DHN data set provided by the Brazilian Navy, it was observed that the maximum annual astronomical tide quota presented an average of 2.80 m and a 13 cm amplitude, with a maximum of 2.84 m and a minimum of 2.71 m. In the same study, when the Mann-Kendall test was applied, no statistically significant trend was observed ($\text{Tau} = 0$; $p = 1$), showing a steady pattern.

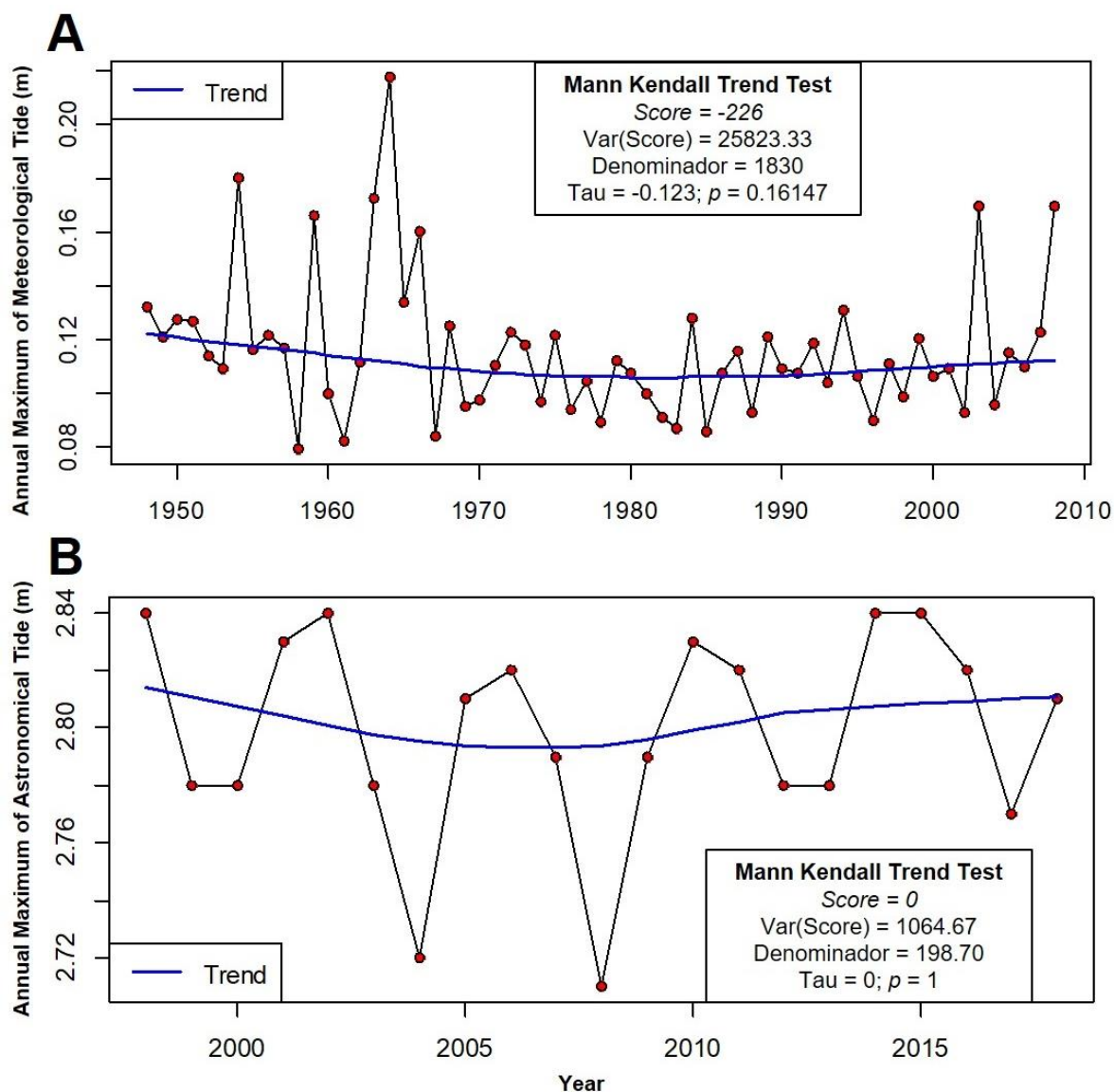


Figure 5.4 Annual tide maximum level temporal series: A) Meteorological tide; B) Astronomical tide.

The descriptive values on the tides presented to corroborate the values found in the literature. Frota *et al.* (2016), studying the tidal behavior in the Brazilian Northeast during the period from 2009 to 2011 in buoys about 200 km from the Piranhas-Açu estuary, found that the average maximum tide height was 2.79 m, ranging from 2.23 at 3.34 m. In the same study, Frota *et al.* (2016) found that the sea level variability in the sub-FT (The non-astronomical sea level signal) represents low oscillation, with a maximum of 0.12 m. Mattos *et al.* (2019), conducted a campaign from December 2010 to February 2011 to study significant wave heights, found that the tide table of Guamaré-RN (approximately 40km East of the table of Macau-RN) had averages of 2.34 m (in syzygy tides) and 2.21 m (in quadrature tides), both above the reduction level.

Regarding the return period ($Tr_{20\text{years}}$), estimated by the Gumbel distribution function, the values of 15.90 cm and 2.90 m were found for MT and AT, respectively (Figure 5.5).

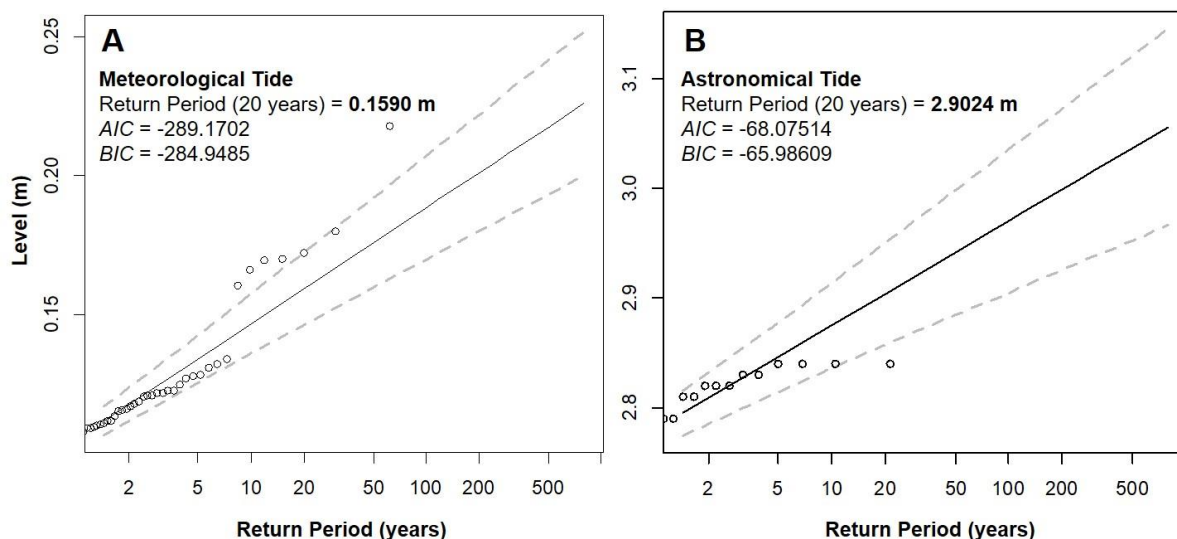


Figure 5.5 Return period graph of tide data: A) Meteorological tide; B) Astronomical tide.

By performing the geodetic tracking of the DHN RN-2 framework, the ruler was adjusted to the Brazilian Geodetic System (SGB) and in this, the Reduction Level (RL) orthometric altitude, represented by the value of -1.126 m (Figure 5.3). Thus, the orthometric altitude of the maximum astronomical tide quota for the 20-year return period was 1.777 m, which served as a start for flood models.

5.4.2 Tidal flood hazard and vulnerability maps

It was possible to produce the four classes tidal flood hazard map for the study area based on the mean sea level projection values for the year 2100 (Table 5.4). In this product, the use of the astronomical tide quota linked to the Brazilian Geodetic System (SGB) was of paramount importance, thus ensuring that all input variables for flood hazard mapping were in the same geodetic framework.

After the spatialization of the classes in a GIS environment, the spatial behavior of the tidal flood hazard throughout the Piranhas-Açu estuary was verified (Figure 5.6a). In general, there was a positive north-south gradient, with a predominance of the flood class of the present scenario (high hazard). The high hazard class represented 257.60 km² of the estuary flood hazard, while the moderate hazard, low hazard, and extremely low hazard classes represented 286.26, 338.67 and 359.42 km², respectively.

Table 5.4. Tidal flood quotas in the scenarios under study.

Hazard Class	Projection of MSL elevation to 2100 (m)	Meteorological tide (Tr20) (m)	Astronomical tide linked to SGB (Tr20) (m)	RMSE of DEM (m)	Flood quota (m)
High	---	0.1590	1.7764	0.1704	2.1058
Moderate	0.1764	0.1590	1.7764	0.1704	2.2822
Low	0.5300	0.1590	1.7764	0.1704	2.6358
Extremely Low	0.7400	0.1590	1.7764	0.1704	2.8458

Tidal flood stains were observed inside the urban area of the city of Macau. These spots are justified by the current layout of the city's drainage system, where at high tide times seawater enters the galleries and canals, affecting the interior of the city (Figure 5.6b and Figure 5.7). Aguiar *et al.* (2019) found the same structural problem in the urban area of Areia Branca city (approximately 58 km west of Macau city). It is important to mention that the land on which the local cemetery is in the urban area of Macau is one of the few urban sectors in the city not to suffer from tidal flood scenarios.

It was found that the flood event of January 3, 2015, had an orthometric altitude of 1.73m (Figure 5.8). The same spatial pattern of tidal flooding was observed between the photographic record and the flood model proposed in this work. Thus, validating the applied flood model.

By mapping the land use and land cover, it was obtained the quantification of the areas of the mapped units (table 5.5 and Figure 5.9), highlighting the Caatinga area, which corresponded to 657.18 km².

Table 5.5. Area of land cover and land use categories.

Category	Area (km ²)	Vulnerability	Area (km ²)
Urban area	7.84	Extremely High	40.17
Oil Exploitation	27.37		
Wind farm	4.96		
Shrimp farm	34.19	High	165.13
Salt pond	130.94		
Agriculture area	115.10	Moderate	115.10
Wetlands	174.74	Low	883.84
Caatinga	657.18		
Mangrove	51.91		
Sand banks	29.86	Extremely Low	117.61
Exposed soil	87.75		
Lagoon	24.22	No vulnerability	873.20
River/Ocean	848.97		

Regarding the vulnerability map, it was observed that 66.86% (883.84km²) of the vulnerable areas had low flood vulnerability (table 5.5 and Figure 5.10). However, it is important to note that 16% of vulnerable areas have High and Extremely High vulnerability, corresponding to an area of 205.30 km².

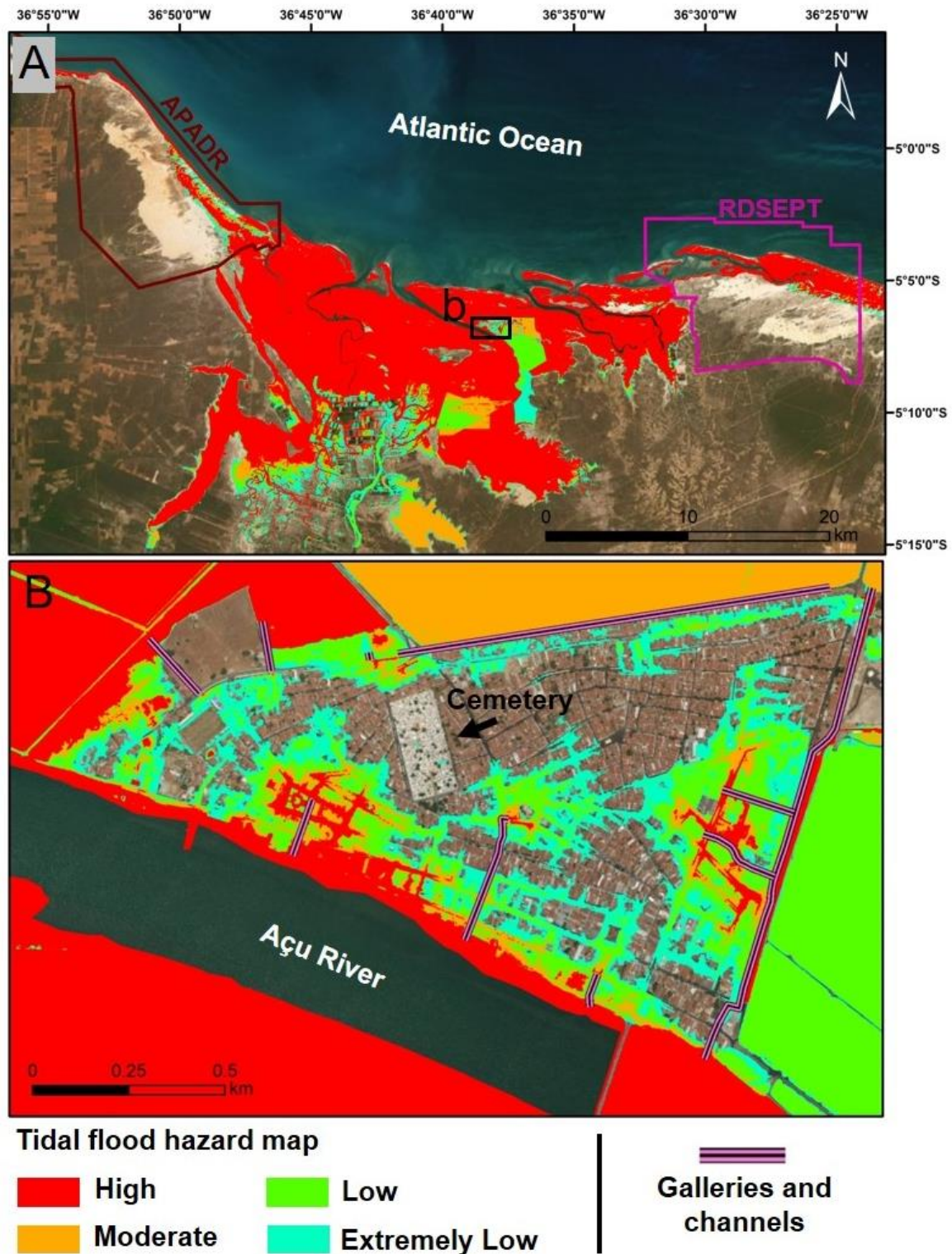


Figure 5.6 Tidal flood hazard map.

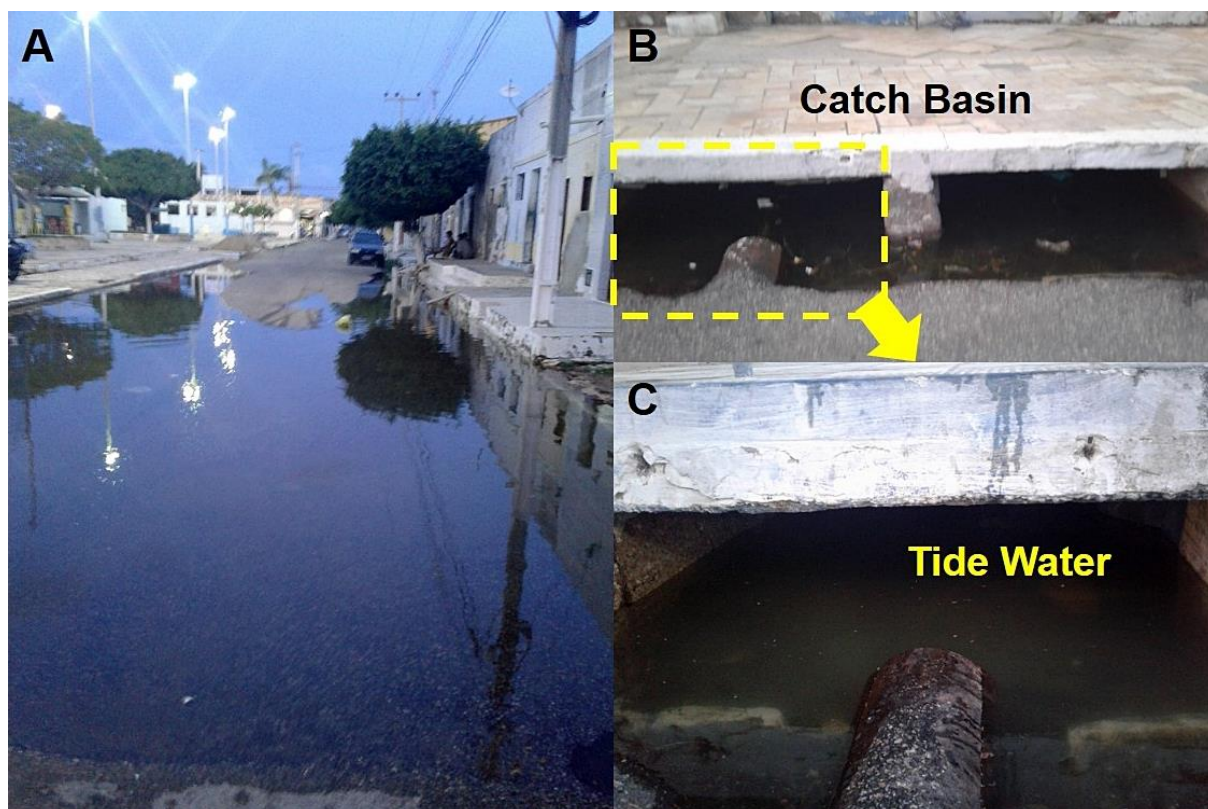


Figure 5.7 Tidal flood through the rain drainage system: A) Tidal flooding event on March 10, 2020 (Macau urban area); B) Example of local catch basin; C) Catch basin in detail.

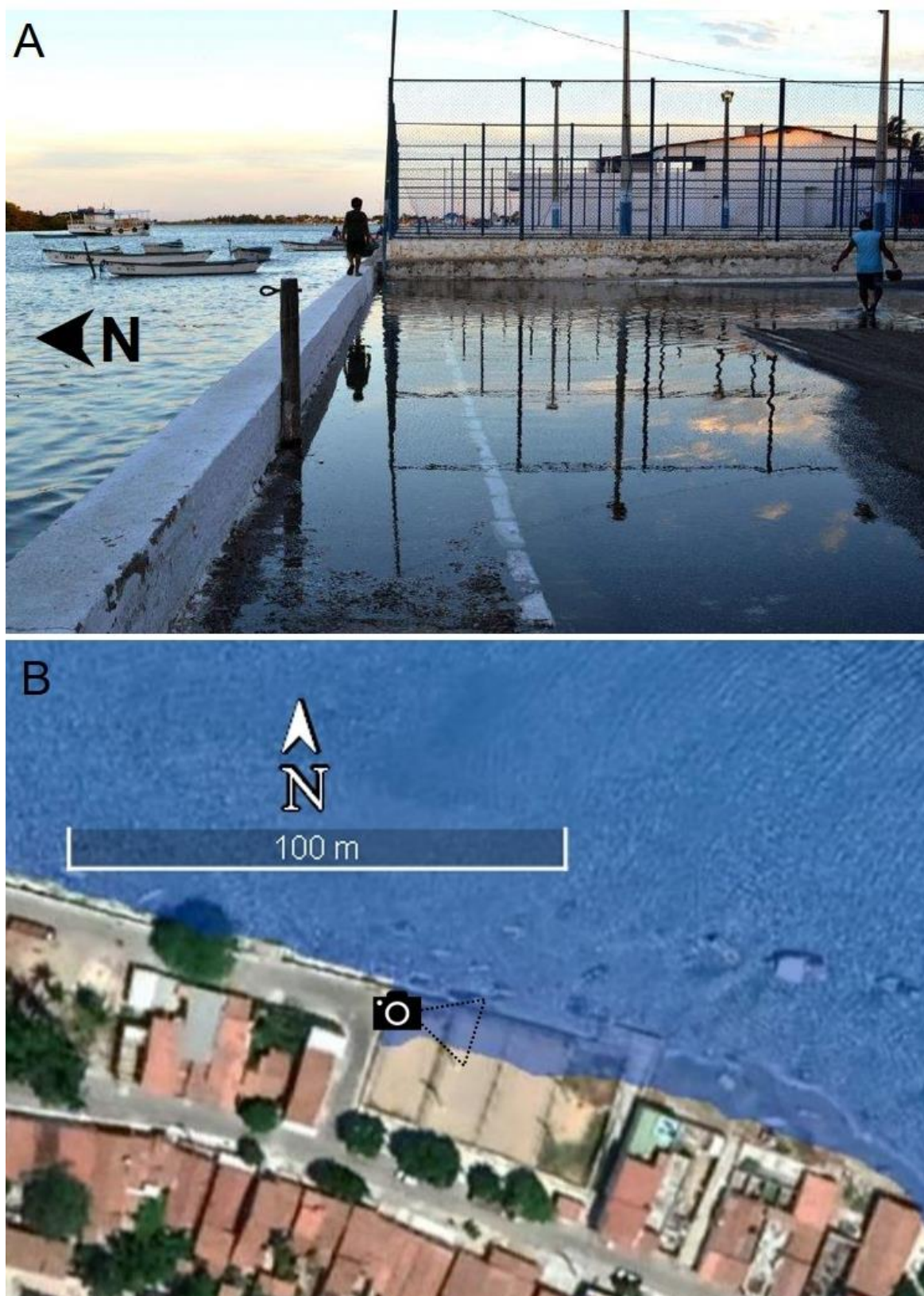


Figure 5.8 Tidal flooding events in north coastal of Rio Grande do Norte State: A) Photographic record of Diogo Lopes community, Macau City, on January 3, 2015. (Tiago Ezequiel); B) simulated flood event for Diogo Lopes community on January 3, 2015. (orthometric height of tidal flood = 1.73m).

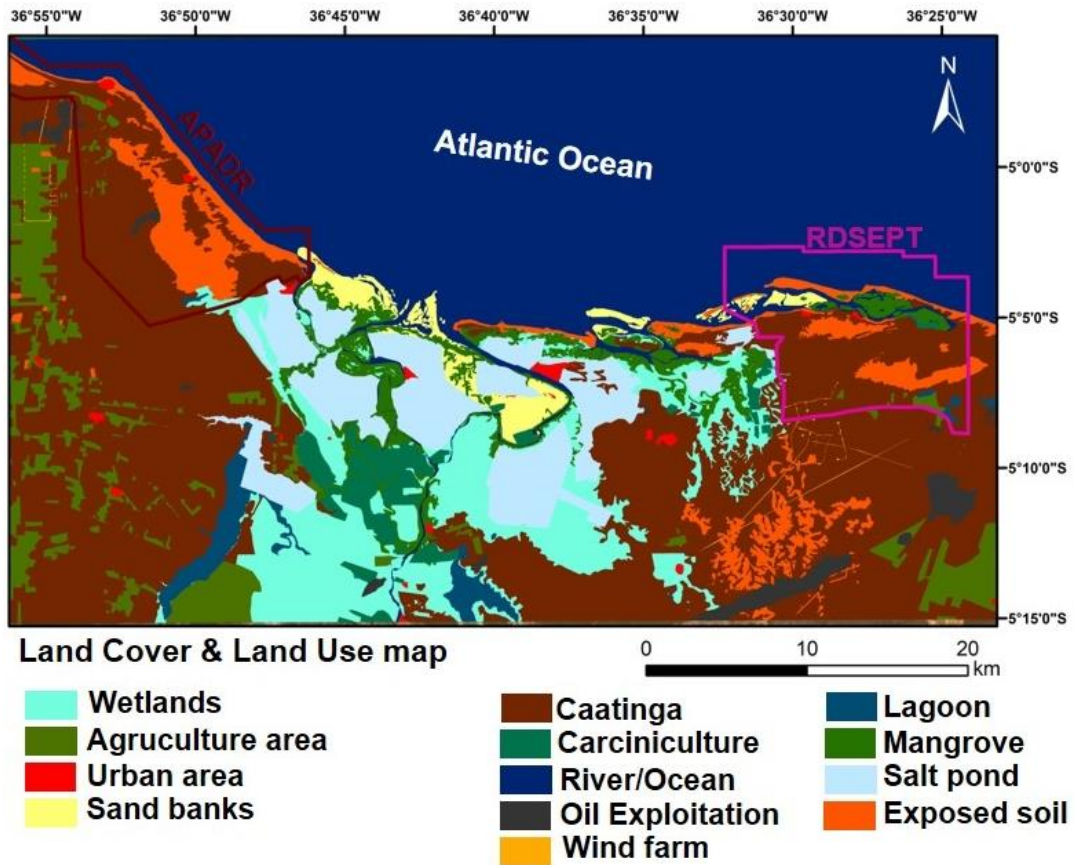


Figure 5.9 Land cover and land use map for study area.

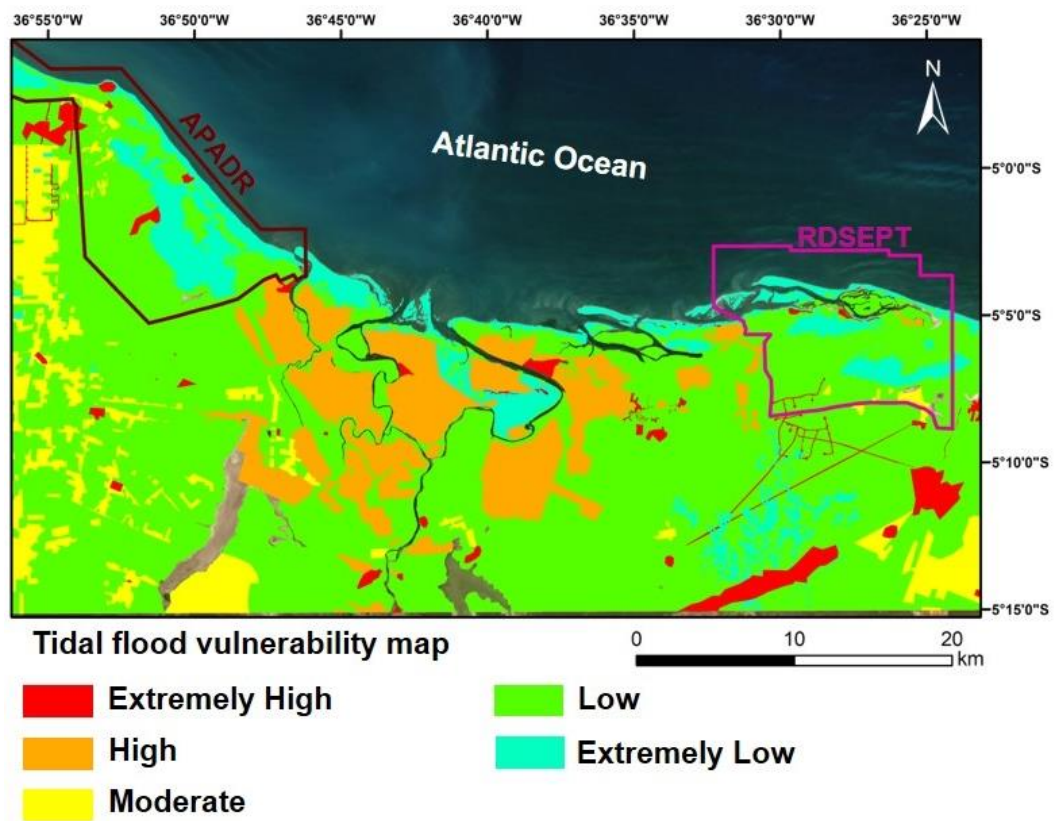


Figure 5.10 Tidal flood vulnerability map.

5.4.3 Tidal flood risk map

From the result of flood hazard and vulnerability mappings, the flood risk map was obtained (Figure 5.11).

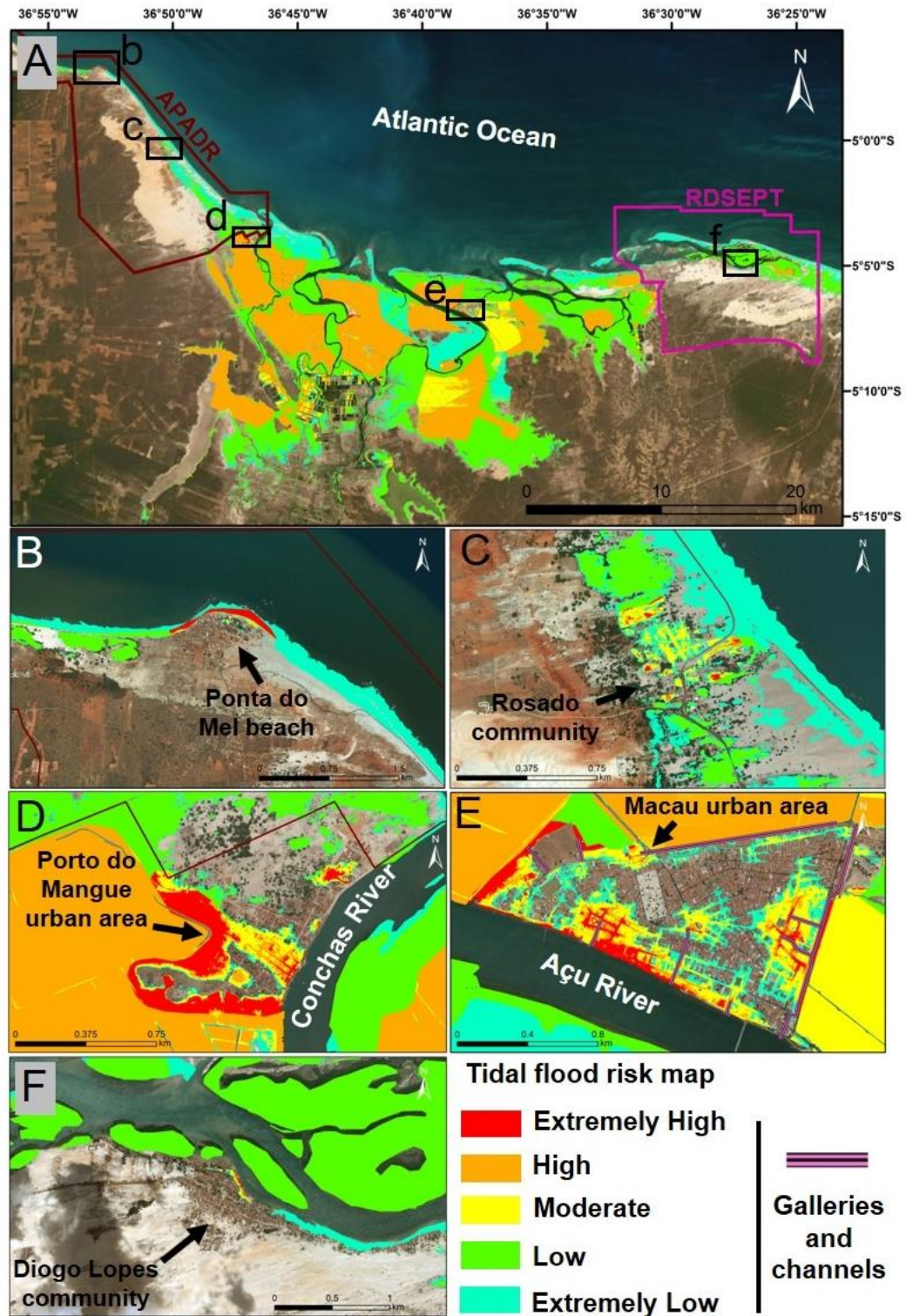


Figure 5.11 Tidal flood risk map for Piranhas Açu Estuary: A) View of entire study area; B) Ponta do Mel community; C) Rosado community; D) Porto do Mangue urban area; E) Macau urban area; F) Diogo Lopes community.

The risk areas represent a total of approximately 360km², where the 135.23km² low-risk class stands out. While the other classes represented 85.64km² (extremely low risk), 20.25km² (moderate risk), 117.73km² (high risk) and 0.53km² (extremely high-risk). Extremely high-risk environments were sections of the urban areas of the cities of Porto do Mangue and Macau, and the communities of Ponta do Mel, Rosado and Diogo Lopes (Figure 5.10).

5.5 Conclusions

The rising of the sea level by a few millimeters per year is an important variable, as loss of land in lowland areas can quickly destroy coastal ecosystems such as lagoons, lagunas, and mangroves. In addition to flooding of socio-economically and environmentally sensitive and relevant areas, the rising sea levels can change the energy balance of coastal environments, causing large variations in the sedimentary process and consequently erosion of large stretches of the shoreline. (Castro *et al.*, 2010). In the Piranhas-Açú Estuary, sea level rise was not statistically significant, we believe that the temporal scale of our meteorological tide data set (1948 to 2008) favored the masking of this phenomenon. Whereas, it has been noticeable by the local community and the news for the last 10 years only.

Possibly, tidal flooding in the region under study is closely linked to rising sea levels in recent years. Extreme tidal weather events are the main factor in flood danger. Flood hazard, vulnerability and risk maps are crucial for planning and intervention in flood prone areas. The case study results in the Piranhas-Açú Estuary can be used by local environmental management, mainly to characterize risk zones and to support the implementation of tidal flood risk management plans in this coastal area. The methodology and materials applied to this study area have proven to be effective in identifying tidal flood risk areas using high-resolution DEM that has been calibrated based on high precision GNSS, historical tidal quota data and geoprocessing techniques.

It is noteworthy that the methodological approach to the Piranhas-Açú Estuary is suitable to be replicated to other estuaries, particularly those in the Brazilian semiarid regions (estuaries with low hydrological contribution from rivers). Tidal flood risk mapping methodology may be particularly useful for regions with a good historical series of tide data. In this case study, the tide flood event modeling of 2015 was compared with the photographic records of the respective event and established high visual similarity between them.

This paper also demonstrates that well-applied geoprocessing techniques such as GIS and high precision geodesic provide results that can be very effective in environmental

management with low-cost investments, highlighting the unique features of a given locality, especially floodplains and wetlands.

5.6 Acknowledgments

The authors express special thanks to the PETROBRAS for providing Digital Elevation Model LiDAR data. We also thank the reviewers of the Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES) journal for their many insightful comments.

5.7 References

- Aguiar, L. S., Amaro, V. E., Araújo, P. V. N., and Santos, A. L. S.: 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, 267-290, http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_267_290, 2019.
- Amaro, V. E.; Santos, M. S. T.; Souto, M. V. S.: Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão. 1ª Ed, Edição dos Autores, Natal, RN, 118 pp., 2012.
- ANA - Agência Nacional das Águas: Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu, Brasília-DF, 167 pp., available at: http://piranhasacu.ana.gov.br/produtos/PRH_PiancoPiranhasAcu_ResumoExecutivo_30062016.pdf (last access: 25 June 2019), 2016.
- Araújo, P. V. N., Amaro, V. E.; Alcoforado, A. V. C., and Santos, A. L. S.: 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, 351–364, https://doi.org/10.11137/2018_1_351_364, 2018.
- Araújo, P. V. N, Amaro, V. E., Silva, M. S. and Lopes, A. B.: Delimitation of flood areas based on a calibrated a DEM and geoprocessing: case study on the Uruguay River, Itaquí, southern Brazil, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 237-250, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-237-2019>, 2019.
- Costa, L. R. F., Maia, R. P., Barreto, L. L., and Sales, V. C. C.: Geomorfologia do nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21, 185-208, <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i1.1447>, 2020.
- Bamber, J. L., Oppenheimer, M., Kopp, R. E., Aspinall, W. P. and Cookeh, R. M.: Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment, *Proceedings of*

- the National Academy of Sciences, 116, 11195-11200, <https://doi.org/10.1073/pnas.1817205116>, 2019.
- Barbosa, M. E. F., Boski, T., Bezerra, F. H. R., Gomes, M. P., Lima-Filho, F. P., Pereira, L. C., and Maia, R. P.: Late Quaternary infilling of the Assu River embayment and related sea level changes in NE Brazil, *Marine Geology*, 405, 23-37, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.07.014>, 2018a.
- Barbosa, M. E. F., Bezerra, F. H. R., Boski, T., Lima-Filho, F. P., and Valdevino, D. S.: Padrões geomorfológicos na região estuarina do Rio Assu, NE – Brasil, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19, 525-545, <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i3.1208>, 2018b.
- Boori, M. S., Amaro, V. E. and Targino, A.: Coastal risk assessment and adaptation of the impact of sea-level rise, climate change and hazards: A RS and GIS based approach in Apodi-Mossoró estuary, Northeast Brazil, *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2, 815-832, 2012.
- Brasil: Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima, estratégias setoriais e temáticas, Ministério do Meio Ambiente, Brasília-DF, v.2, 295 pp., available at: https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80182/LIVRO_PNA_Plano%20Nacional_V2_copy_copy.pdf (last access: 12 April 2019), 2016.
- Busman, D. V., Amaro, V. E. and Souza-Filho, P. W. M.: Análise Estatística Multivariada de Métodos de Vulnerabilidade Física em Zonas Costeiras Tropicais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17, 499-516, <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i3.912>, 2016.
- Castro, B. M., Brandini, F. P., Wainer, I. E. K. C. and Dottori, M.: O mar de amanhã, com as mudanças climáticas de hoje, *Ciência e Cultura*, 62, 40-42, available at: <http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v62n3/a16v62n3.pdf> (last access: 11 November 2019), 2010.
- CHM – Centro de Hidrografia da Marinha. Marinha do Brasil: Sondagem batimétrica, available at: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-lev-hidro/sondagem-batimetrica> (last access: 20 April 2019), 2019a.
- CHM – Centro de Hidrografia da Marinha. Marinha do Brasil. Maregrafia e fluviometria. available at: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-lev-hidro/maregrafia-e-fluviometria> (last access: 20 April 2019), 2019b.
- Costa, L. R. F., Maia, R. P., Barreto, L. L., and Sales, V. C. C.: Geomorfologia do nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21, 185-208, <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i1.1447>, 2020.

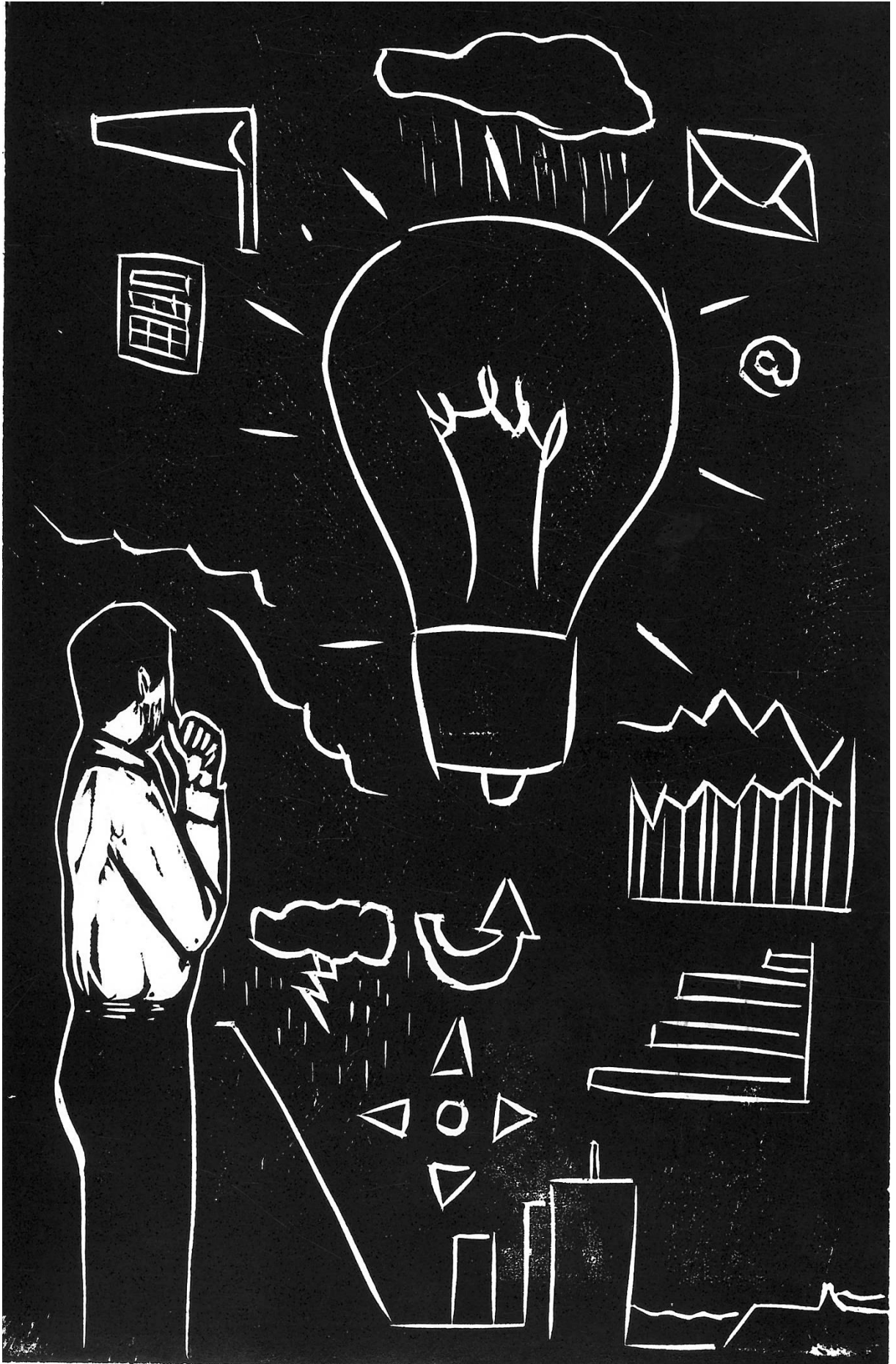
- Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F. M., Marcos, M., Piecuch, C. G., Berk, K. and Jensen, J.: Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s, *Nature Climate Change*, 9, 705-710, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8>, 2019.
- DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação: Tábuas de marés, available at: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare> (last access: 3 January 2018), 2018.
- Diniz, C. H. G., Amaro, V. E., Prudêncio, M. C. and Felipe R. F.: Representação Tridimensional de Processos de Erosão Costeira em Ilhas Barreiras Utilizando Tecnologia de Jogos, *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 40, 147-158, http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_147_158, 2017.
- Dwarakisha, G. S., Vinaya, S. A., Natesanb, U., Asanoc, T., Kakinumac, T., Venkataramanad, K., Paia, B. J. and Babitaa, M. K.: Coastal vulnerability assessment of the future sea level rise in Udupi coastal zone of Karnataka state, west coast of India, *Ocean & Coastal Management*, 52, 467-478, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.07.007>, 2009.
- Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R. and Mearns, L. O.: Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts, *Science*, 289, 2068–2074, <http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5487.2068>, 2000.
- Frota, F. F., Truccolo, E. C. and Schettini, C. A. F.: Tidal and sub-tidal sea level variability at the northern shelf of the Brazilian Northeast Region, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88, 1371-1386, <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201620150162>, 2016.
- Gilleland, E. and Katz, R. W.: extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R, *Journal of Statistical Software*, 72, 1-39, <http://dx.doi.org/10.18637/jss.v072.i08>, 2016.
- Grigio, A. M., Castro, A. F., Souto, M. V. S., Amaro, V. E., Vital, H. and Diodato, M. A.: Use of remoting sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the Municipal District of Guamaré - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil, *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 1427-1431, www.jstor.org/stable/25742990 (last access: 22 December 2019), 2006.
- Gumbel, E. J.: *Statistics of extremes*. Columbia University Press, New York, 375 pp., 1958.
- Hall, J. W., Harvey, H. and Manning, L. J. Adaptation thresholds and pathways for tidal flood risk management in London, *Climate Risk Management*, 24, 42–58, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.04.001>, 2019.
- Herdman, L., Erikson, L. and Barnard, P.: Storm Surge Propagation and Flooding in Small Tidal Rivers during Events of Mixed Coastal and Fluvial Influence, *Journal of Marine Science and Engineering*, 6, 158, <https://doi.org/10.3390/jmse6040158>, 2018.

- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG 2001/2015, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia, Rio de Janeiro, 65 pp., available at:
ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf (last access: 25 June 2019), 2016.
- IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente: Informações dos municípios de Mossoró, Grossos e Tibau, v. 24, 1-24, 1999.
- IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente: Projeto de Zoneamento Ecológico-Econômico dos Estuários do Rio Grande do Norte – ZEE/RN, Natal-RN, 35 pp., 2005.
- IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 151 pp., 2014.
- Kendall, M. G.: Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London, 1975.
- Köppen, W.: Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf, Petermanns Mitt, 64, 193-203, available at: http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1918.pdf (last access: 01 June 2019), 1918.
- Kulp, S. and Strauss, B. H.: New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding, Nature Communications, 10, 4844, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12808-z>, 2019.
- Lima, C. C.: Sensoriamento remoto aplicado à atualização de informações geoambientais e ao estudo da dinâmica da paisagem no estuário do Rio Piranhas-Açu/NE do Brasil, Monographic, Geology degree, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, 141pp., <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26748.08326>, 2016.
- Losada, I. J, Reguero, B. G., Méndez, F. J., Castanedo, S., Abascal, A. J. and Mínguez, R.: Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean, Global and Planetary Change, 104, 34–50, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.006>, 2013.
- Mann, H. B.: Nonparametric tests against trend, Econometrica, 13, 245–259, <https://doi.org/10.2307/1907187>, 1945.
- Matos, M. F. A., Amaro, V. E., Scudelari, A. C. and Bezerra, A. C. N.: Análises estatísticas de alturas significativas de ondas de série temporal de curto prazo na costa do Rio Grande

- do Norte. *Pesquisas em Geociências*, 46, e0731, <https://doi.org/10.22456/1807-9806.93246>, 2019.
- Matos, A. C. O. C.: Implementação de Modelos Digitais de Terreno para Aplicações na Área de Geodésia e Geofísica na América do Sul, Ph.D. theses, Postgraduate Program in Transport Engineering, Federal University of Sao Paulo, 335 pp., <http://dx.doi.org/10.11606/T.3.2005.tde-10102005-104155>, 2005.
- McGranahan, G., Balk, D. and Anderson, B.: The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones, *Environment and Urbanization*, 19, 17–37, <https://doi.org/10.1177%2F0956247807076960>, 2007.
- Medeiros, M. D.: Eventos hidroclimáticos extremos e vulnerabilidade socioambiental a inundações no Baixo-Açu – RN, Ph.D. theses, Postgraduate Program in Geography, Federal University of Ceara, Brazil, 209 pp., available at: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/35674> (last access: 22 December 2019), 2018.
- Medeiros, M.D. and Zanella, M.E.: Estudo das vazões e estimativas de inundações no Baixo-Açu-RN, *Geo UERJ*, 40946, 1-30, <http://dx.doi.org/10.12957/geouerj.2019.40946>, 2019.
- Murray, N. J., Phinn, S. R., DeWitt, M., Ferrari, R., Johnston, R., Lyons, M. B., Clinton, N., Thau, D. and Fuller, R. A.: The global distribution and trajectory of tidal flats, *Nature*, 565, 222-225, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0805-8>, 2019.
- Nascimento, M. C.: A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera: Alternativas sustentáveis na mitigação de impactos ambientais, MS Dissertation, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, Brazil, 187 pp., available at: ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/MiriamCN DISSERT_1-100.pdf (last access: 14 September 2019), 2009.
- Nerem, R. S., Beckley, B. D., Fasullo, J. T., Hamlington, B. D., Masters, D. and Mitchum, G. T.: Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 2022–2025, <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>, 2018.
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J. And Nicholls, R. J.: Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - a global assessment, *PLOS ONE*, 10, e0131375, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131375>, 2015.
- Nicholls, R. J. and Cazenave, A.: Sea-level rise and its impact on coastal zones, *Science*, 328, 1517-1520, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1185782>, 2010.

- Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V., Codignotto, J., Hay, J., McLean, R., Ragoonaden, S., Woodroffe, C. D., Abuodha, P. A. O., Arblaster, J., Brown, B., Forbes, D., Hall, J., Kovats, S., Lowe, J., McInnes, K., Moser, S., Rupp-Armstrong, S. and Saito, Y.: Coastal systems and low-lying areas, in: *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. and Hanson, C. E., Cambridge, UK, Cambridge University Press, 315-356, available at: <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1192&context=scipapers> (last access: 22 December 2019), 2007.
- Nicholls, R. J., Hanson, S. E., Lowe, J. A., Warrick, R. A., Lu, X., Long, A. J. and Carter, T. R.: Constructing Sea-Level Scenarios for Impact and Adaptation Assessment of Coastal Areas: A Guidance Document. Technical Guidelines of the Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 64 pp., available at: https://www.ipcc-data.org/docs/Sea_Level_Scenario_Guidance_Oct2011.pdf (last access: 5 December 2019), 2011.
- Nimer, E. Ensaio de um novo método de classificação climática: contribuição à climatologia intertropical e subtropical, especialmente do Brasil, *Boletim de Geografia*, Rio de Janeiro, 31, 141-153, 1972.
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration: 2018 State of U.S. High Tide Flooding with a 2019 Outlook, NOAA Technical Report NOS CO-OPS 090, Silver Spring, Maryland, 31p., available at: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/20691> (last access: 9 November 2019), 2019.
- PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas: Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas, Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas, edited by: Assad, E.D. and Magalhães, A. R., COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 414 pp., available at: http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/RAN1_completo_vol2.pdf (last access: 10 October 2019), 2014.

- Pugh, D. T.: Tides, surges and mean sea level: a handbook for Engineers and Scientists, John Wiley & Sons Ltd., New York, available at: <https://eprints.soton.ac.uk/19157/1/sea-level.pdf> (last access: 22 December 2019), 1987.
- R Development Core Team: R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, available at: <http://www.R-project.org/>, last access: 28 November 2019.
- Ramos, A. M. and Krueger, C. P.: Aplicação de reduções batimétricas GPS em levantamentos hidrográficos, *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 15, 615–635, available at: <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/16284/10775> (last access: 22 December 2019), 2009.
- Santos, M. S. T. and Amaro, V. E.: Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no nordeste do Brasil, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 14, 151-162, <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v14i2.298>, 2013.
- SMC-Brasil: Níveis e cota de inundação, Documento temático, Ministério do Meio Ambiente, Brasília-DF, 130 pp., https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80342/Livro_SMC_4___Niveis_e_Cota_de_inundacao.pdf (last access: 16 November 2019), 2018.
- UNDP - United Nations Development Programme: Reducing Disaster Risk: A Challenge for development, A global report, 169 pp., available at: http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat_pdf/alle_2012/2001-2005/Pelling__Maskrey_et_al_2004_-_Reducing_Disaster_Risk.pdf (last access 4 December 2019), 2004.
- Wisner, B., Gaillard, J. C. and Kelman, I.: Framing disaster: theories and stories seeking to understand hazards, vulnerability and risk, in: *The Routledge Handbook of Hazards and Disaster Risk Reduction*, edited by: Wisner, B., Gaillard, J. C. and Kelman I., London, Routledge, 18-33, available at: <https://www.routledgehandbooks.com/pdf/doi/10.4324/9780203844236.ch3> (last access: 7 November 2019), 2011.
- Yue, S. and Wang, C.: The Mann–Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series, *Water Resour. Manage.*, 18, 201–218, <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>, 2004.
- Zhang, W., Yan, Y., Zheng, J., Li, L., Dong, X., and Cai, H.: Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China, *Global Planet. Change*, 69, 35-47, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.07.003>, 2009.



Capítulo 6 – Considerações Finais

Ao final dos resultados alcançados, alguns pontos podem ser ressaltados, principalmente por seu caráter inédito e por sua elevada contribuição a comunidade científica e a toda sociedade:

No Capítulo 3, ao ser desenvolvida a metodologia de avaliação e calibração de MDE, foi proporcionado a construção do conhecimento para confecção de MDE com alta acurácia vertical, vinculado ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Em setores do Brasil, em que esse tipo de dado é escasso, pode-se utilizar as RNs do IBGE como ponto de controle de terreno (GCP) e realizar a calibração em MDE previamente construído, como por exemplo, o gratuito MDE SRTM. Essa metodologia foi extremamente eficaz, quando aplicada no estudo de caso do Capítulo 4, na modelagem de geoperigo a inundações no Rio Uruguai. Ainda se tratando do Capítulo 3, foi comprovado a importância da avaliação do MDE antes de seu uso, pois na maioria das vezes, as especificações originais (construídas geralmente a nível global ou continental), não condizem com a realidade regional ou local da área de estudo.

Sobre o Capítulo 4, a metodologia empregada para modelar as áreas de geoperigo a inundações em um setor do Rio Uruguai, também se mostrou extremamente eficaz. A combinação de um MDE calibrado, análise estatística da série temporal do nível do Rio e técnicas de geoprocessamento resultou em uma acurada metodologia para mapeamento das inundações fluviais. Cidades que sofrem deste tipo de desastre natural, e que ainda não possuem um plano de Gestão do Risco de Desastre (GRD), podem replicar ou adaptar a metodologia empregada em Itaqui-RS para o planejamento, a coordenação e a execução de ações e medidas preventivas destinadas a reduzir os riscos de desastres e evitar a instalação de novos riscos. Desastres esses que serão potencializados, principalmente pelo fato de que as máximas anuais do Rio Uruguai tendem a aumentar a sua frequência e magnitude nos próximos anos. Se tornando assim, uma metodologia aliada com a Política Nacional de Defesa Civil (MIN, 2007; MIN, 2014).

Outro fator importante na Área de Estudo II, e que merece ser exposto nesta tese, é que também, a subida do Nível Médio do Mar (NMM) se apresenta com tendência positiva na Foz do Rio Uruguai. Dados do Serviço Permanente para o Nível Médio do Mar (*Permanent Service for Mean Sea Level – PSMSL*), repositório de dados de medidores de níveis de marés usados na medição de mudanças de longo prazo no nível do mar, reforçam um aumento do NMM para a cidade de Palermo (Argentina), foz do Rio Uruguai (Figura 6.1).



Permanent Service for Mean Sea Level

PALERMO

Station Information

Station ID: 832
 Latitude: -34.566667
 Longitude: -58.4
 Coastline code: 860
 Station code: 161
 Country: ARGENTINA
 Time span of data: 1957 – 2018
 Completeness (%): 97
 Date of last update: 01 May 2019

Green Arrow: Current Station
 Yellow Marker: Neighbouring RLR Station
 Red Marker: Neighbouring Metric Station



Please note: In many cases, the station position in our database is accurate to only one minute. Thus, the tide gauge may not appear to be on the coast.

Tide Gauge Data

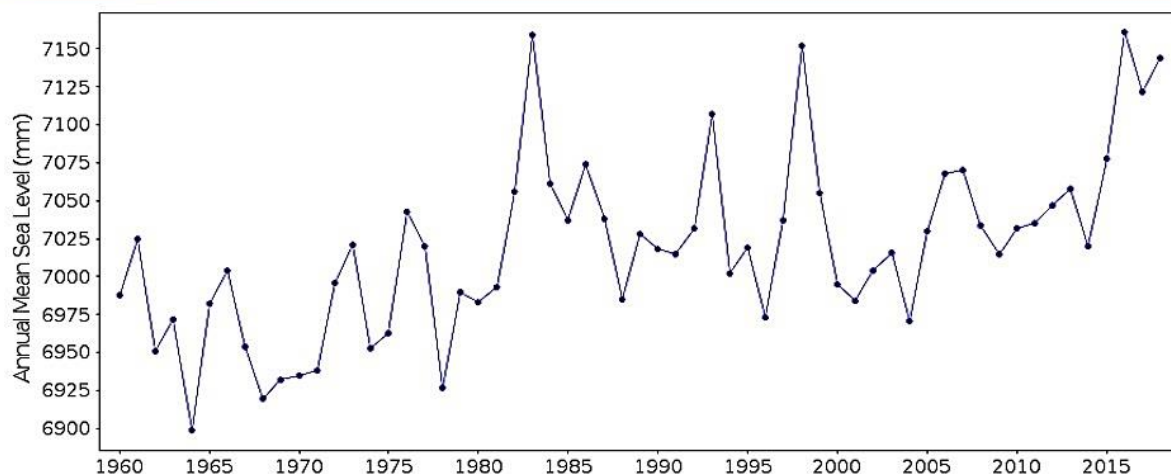


Figura 6.1 Informações sobre a estação maregráfica da Cidade de Palermo (Argentina), desembocadura da Bacia do Rio Uruguai.

A redução do risco de desastres constitui tema relativamente novo, tem uma agenda que vem progredindo nas últimas duas décadas, no que tange ao seu conteúdo e à sua concepção. Em 2005, a ONU adotou o Marco de Ação de Hyogo, com linhas prioritárias de ação, destinadas a aumentar a resiliência das nações e comunidades relativamente aos desastres (Silva, 2012). O Marco de Ação de Hyogo tem como prioridades: (i) cuidar para que a redução do risco de

desastres constitua uma prioridade nacional e local com uma sólida base institucional de aplicação; (ii) **identificar, avaliar** e monitorar os riscos de desastres e melhorar os sistemas de alerta; (iii) utilizar o conhecimento, a inovação e a educação para criar uma cultura de segurança e resiliência em todos os níveis; (iv) reduzir os fatores de risco subjacentes; (v) fortalecer a preparação em caso de desastre, a fim de assegurar uma resposta eficaz em todos os níveis. Logo, a metodologia proposta entra como uma forte aliada na identificação e avaliação dos riscos e desastres, contribuindo diretamente para o Marco de Ação de Hyogo.

Já no Capítulo 5, uma outra abordagem foi aplicada para o mapeamento de inundação (inundações por maré) no Estuário do Rio Piranhas-Açú. Esta abordagem se destaca por acrescentar no mapeamento (probabilístico) do estuário em foco, os fatores maregráficos e as projeções da elevação no Nível Médio do Mar (NMM) do último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A abordagem seguiu as diretrizes do *Manual de boas práticas para mapeamento de inundações na Europa* (EXCIMAP, 2007). Segundo o respectivo guia, os mapas de risco de inundação devem incluir eventos históricos e futuros de inundações de diferentes probabilidades, ilustrando a intensidade e magnitude do perigo em uma escala selecionada e devem levar em consideração os mapas de uso e ocupação do solo, construções e conscientização e preparação para a ocorrência dos eventos de inundação. Esses resultados são de importância como referência, tanto para futuras tomadas de gestão e manejo, como para o estudo da arte da temática abordada. Além de contribuir para o entendimento da geodinâmica externa da terra.

Apesar dos dados dos níveis maregráficos não apresentarem tendência estatisticamente positiva, as evidências apontam um agravamento na frequência e magnitude dos eventos de inundações por maré no Estuário Piranhas-Açú. Possivelmente, o ranger dos dados maregráficos disponíveis, tenham prejudicado na afirmação desta hipótese. Uma vez que o período de dados da Maré Meteorológica em estudo é de 1948 a 2008 e que, os eventos de inundações por maré foram intensificados a partir dos anos 2000 (comunicação pessoal). Logo, acredita-se que neste *gap* de dados, ocorreu uma elevação nas máximas anuais do nível da maré meteorológica, favorecendo as inundações locais. Este fenômeno aliado aos eventos extremos de altura significativa de ondas, vem também, potencializando as erosões das ilhas barreiras presentes na área de estudo I, como por exemplo a linha de costa da Praia de Camapum (Macau-RN). Em uma rápida análise visual, pode-se observar uma elevada erosão neste setor durante as últimas duas décadas (Figura 6.2). Possivelmente, comportamento similar ao que ocorreu com a antiga Ilha de Manoel Gonçalves. Acendendo assim um grande alerta para a gestão local.

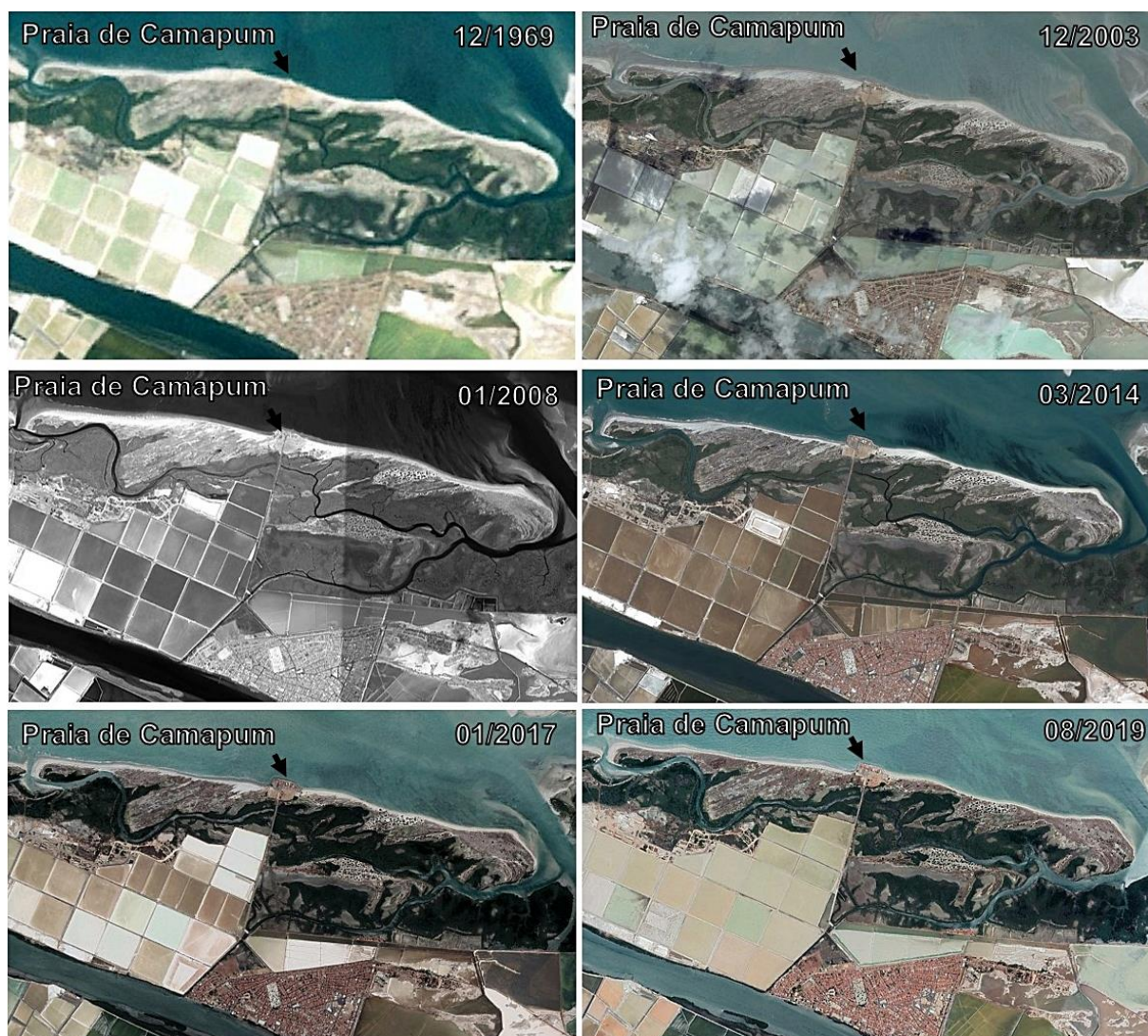


Figura 6.2 Investigação visual com imagens históricas Google Earth, sobre a região da praia de Camapum, Macau-RN.

Logo, sugere-se que a gestão pública dos municípios sob influência do Estuário Piranhas-Açú, adotem medidas para o monitoramento da cota do nível do mar para construção de uma série temporal sólida e capaz de responder fidedignamente as tendências de elevação do Nível Médio do Mar localmente. Essa medida pode ser adotada em forma de leis municipais, como por exemplo uma Política Municipal sobre Mudanças Climáticas (PMMC), obrigando a execução de ações pontuais, como a construção e manutenção de um marégrafo local. Além disso, o trabalho oferta uma base de informação e diagnóstico para o auxílio da revisão e atualização dos Planos Diretores dos municípios presentes nas áreas de estudo, como por exemplo na cidade de Macau, em que podemos constatar no seu atual Plano Diretor Participativo do Município, que parte significativa da atual Área de Expansão Urbana, encontra-se em área de risco a inundação por maré (Figura 6.3).

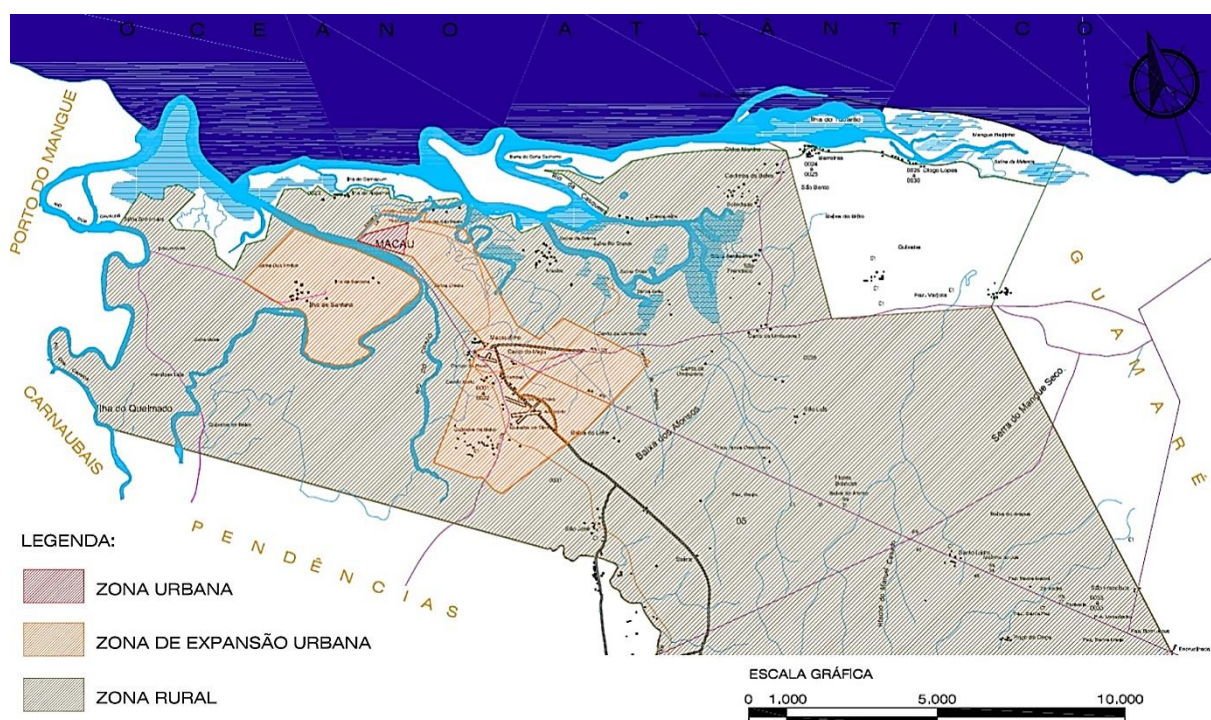


Figura 6.3 Recorte do Mapa do Macrozonamento do atual Plano Diretor Participativo do Município de Macau-RN (Lei Municipal Complementar Nº 005/2011, de 22 de dezembro de 2011).

Evidentemente que, os referenciais geodésicos padronizados se despontam como um dos elementos mais importantes nesta tese e que não podem ser deixados de lado na elaboração de uma PMMC. A régua meregráfica deve possuir um referencial sólido e padronizado com o referencial altimétrico adotado pelo Sistema Geodésico Brasileiro. Já pensando em um possível suporte, o autor que também é pesquisador e professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), vem participando de uma parceria com pesquisadores da Universidade Federal do Paraná (UFPR) na execução do projeto Rede Geodésica Digital (REDEGEO) e que já implantaram um marco geodésico na área de estudo.

O marco implantado pode ser de grande utilidade no apoio de uma possível PMMC. A REDEGEO é fruto de uma pesquisa formada por pesquisadores da Universidade Federal do Pampa (Unipampa) e da Universidade Federal do Paraná (UFPR), onde resultou na criação de um aplicativo de celular para construção e monitoramento de uma rede geodésica. A ferramenta permite que os usuários obtenham os dados referentes aos marcos geodésicos da Rede Geodésica Brasileira por leitura de um QR-code. Através de uma API do Google Maps, o aplicativo exibirá as coordenadas, localização e situação (status) dos marcos geodésicos homologados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e permite a inserção

de novos pontos por usuários previamente cadastrados. O aplicativo é disponibilizado para download nas lojas da Apple Store e Google Play. Além do App, os dados podem ser visualizados na plataforma WEB da REDEGEO (Figura 6.4). Atualmente o sistema já se encontra em funcionamento e possui ponto cadastrados nas cidades de Ariquemes-RO, Itaquí-RS, Maçambará-RS, Pontal do Paraná-PR e Macau-RN (Figura 6.5).

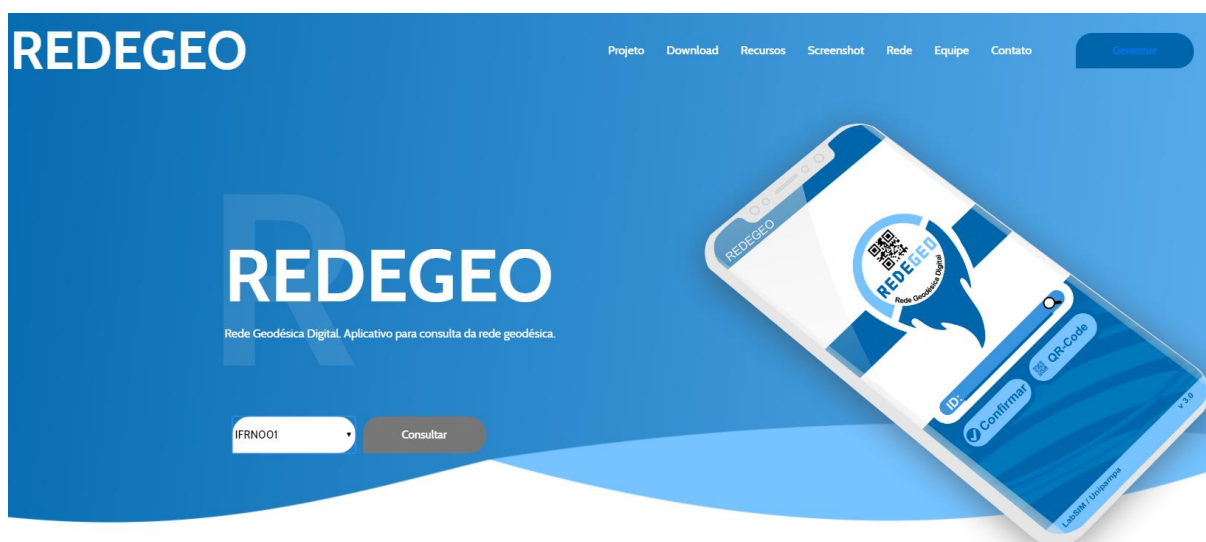


Figura 6.4 Portal Eletrônico do Projeto REDEGEO. <http://labsim.unipampa.edu.br/redegeo>.

Outra recomendação para a Área de Estudo 1, especificamente para a cidade de Macau-RN, é a necessidade urgente da implantação de um sistema de contenção das águas de marés no sistema de drenagem urbano (Figura 6.5). Esta contenção evitará a entrada das águas da maré pelo atual sistema de drenagem e contribuirá para a mitigação dos perigos a inundações em vários pontos na área urbana da cidade, apontados no Capítulo 5.

Por fim, a utilização de Geotecnologias aplicadas nas duas áreas de estudo revelou informações que tornam mais compreensível a geodinâmica superficial da terra. Esta Tese também demonstra que ferramentas e técnicas bem aplicadas baseadas em geotecnologias, como sensoriamento remoto, GIS e geodésia de alta precisão, proporcionam resultados que podem ser muito eficazes na gestão urbana e costeira com investimentos de baixo custo.

Espera-se que a geração desses novos dados contribua e estimule o desenvolvimento de novas pesquisas no Brasil e no mundo. Como sugestões para pesquisas futuras, encoraja-se a utilização de dados topobatimétricos inseridos em modelos hidrológicos robustos, com referenciais

geodésicos padronizados para estudo de possíveis eventos inundações combinadas (inundação fluvial e inundação por maré), como pode ocorrer em algum dia na Área de Estudo I. Além disso, encoraja-se o incremento de elementos sociais e bióticos minuciosos, durante as análises de vulnerabilidade local. Fatores estes que irão influenciar diretamente na resposta do georisco a inundação.



Figura 6.5 Print da descrição/localização da Estação IFRN0001 cadastrada no REDEGEO, implantada no Campus do IFRN, Campus Macau. Alt. Ortométrica: 20,26m.

Referências Bibliográficas

- Aguiar, L. S. Risco por inundação costeira na foz estuarina do rio Apodi-Mossoró/RN: aplicações de geotecnologias e simulações de mudanças climáticas. 2018. 131f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/26917>.
- Aguiar, L. S.; Amaro, V. E.; Araújo, P. V. N.; Santos, A. L. S. 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*, v. 42(1): 267-290, 2019. http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_267_290.
- Allen, M.R.; Dube, O.P.; Solecki, W.; Aragón-Durand, F.; Cramer, W.; Humphreys, S.; Kainuma, M.; Kala, J.; Mahowald, N.; Mulugetta, Y.; Perez, R.; Wairiu, M. and Zickfeld, K. Framing and Context. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.; Skea, J.; Shukla, P.R.; Pirani, A.; Moufouma-Okia, W.; Péan, C.; Pidcock, R.; Connors, S.; Matthews, J.B.R.; Chen, Y.; Zhou, X.; Gomis, M.I.; Lonnoy, E.; Maycock, T.; Tignor, M. and Waterfield, T. (eds.)]. *In Press*, 46p., 2018.
- Almeida, R. T. O. Mapeamento de perigo de inundação incorporando o indicador tempo. 2019. 46f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/27989>.
- Amaro, V. E.; Santos, M. S. T. & Souto, M. V. S. Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão. 1ª Ed, Edição dos Autores, Natal, RN, 118 pp., 2012.
- ANA – Agência Nacional das Águas. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu. Agência Nacional das Águas, Brasília-DF. 167p., 2016.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras, Edição Especial, Brasília-DF, 163p., available at: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioeshidrograficas2014.pdf> (last access: 10 June 2018), 2015.

- Araújo, P. V. N., Amaro, V. E., Silva, M. S. and Lopes, A. B.: Delimitation of flood areas based on a calibrated a DEM and geoprocessing: case study on the Uruguay River, Itaquí, southern Brazil, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 237-250, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-237-2019>, 2019.
- Arthaud, N.H. *Evolução Neoproterozoica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira. (Tese de Doutorado) – Universidade de Brasília*, 170p., 2007.
- Aziziana, A. and Brocca, L. Determining the best remotely sensed DEM for flood inundation mapping in data sparse regions. *International Journal of Remote Sensing*, v. 41 (5): 1884-1906, 2020. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1677968>
- Bamber, J. L.; Oppenheimer, M.; Kopp, R. E.; Aspinall, W. P. & Cookeh, R. M. Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 11195-11200, <https://doi.org/10.1073/pnas.1817205116>, 2019.
- Banco Mundial. *Desenvolvimento e mudança climática. Relatório sobre o Desenvolvimento Mundial*. São Paulo, SP: Editora Unesp. 440 p., 2010.
- Barbosa, M. E. F.; Boski, T.; Bezerra, F. H. R.; Gomes, M. P.; Lima-Filho, F. P.; Pereira, L. C.; Maia, R. P.: Late Quaternary infilling of the Assu River embayment and related sea level changes in NE Brazil. *Marine Geology*, v. 405(1): 23-37, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.07.014>.
- Barbosa, M. E. F.; Bezerra, F. H. R.; Boski, T.; Lima-Filho, F. P.; Valdevino, D. S. Padrões geomorfológicos na região estuarina do Rio Assu, NE - Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19(3): 525-545, 2018b. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i3.1208>.
- Bariani, C. J. M. V. & Bariani, N. M. V. Distribuição espacial mensal de variáveis físicoquímicas em cursos hídricos de Itaquí, RS, *Geografia Ensino & Pesquisa*, 17, 167–181, <https://doi.org/10.5902/2236499410780>, 2013.
- Barreto, A.M.F.; Suguio, K.; Bezerra, F.H.R.; Tatumi, S.H.; Yee, M.& Giannini, P.C.F. *Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. Geol. USP Sér. Cient.*, 4(2): 1-12, 2004.
- Berghuijs, W. R.; Aalbers, E. E.; Larsen, J. R.; Trancoso, R. & Woods, R. A. Recent changes in extreme floods across multiple continents, *Environ. Res. Lett.*, 12, 1–8, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8847>, 2017.
- BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento: *Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável da Região da Bacia do Rio Uruguai (Parte Brasileira)*, Diagnóstico da

- Região da Bacia Uruguai, Relatório Final do Componente 1, 555 pp., available at: http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/informes/pdfs/Relatorio_Diagnostico_VersaoFinal.pdf (last access: 10 June 2018), 2008.
- Brasil. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima, estratégias setoriais e temáticas, Ministério do Meio Ambiente, Brasília-DF, v.2, 295 pp., available at: https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80182/LIVRO_PNA_Plano%20Nacional_V2_copy_copy.pdf (last access: 12 April 2019), 2016.
- British Geological survey (BGS). Geology and flooding. Disponível em: <http://www.bgs.ac.uk/research/engineeringGeology/shallowGeohazardsAndRisks/flooding/research.html>. Acesso em: junho de 2018.
- Busman, D. V.; Amaro, V. E. & Souza-Filho, P. W. M. Análise Estatística Multivariada de Métodos de Vulnerabilidade Física em Zonas Costeiras Tropicais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17, 499-516, <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i3.912>, 2016.
- Costa, L. R. F.; Maia, R. P.; Barreto, L. L.; Sales, V. C. C.: Geomorfologia do nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.21(1): 185-208, 2020. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i1.1447>.
- Dangendorf, S.; Hay, C.; Calafat, F. M.; Marcos, M.; Piecuch, C. G.; Berk, K. & Jensen, J.: Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s, *Nature Climate Change*, 9, 705-710, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8>, 2019.
- DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação. Tábuas de marés, available at: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare> (last access: 3 January 2018), 2018.
- Dias, G. B; Rodrigues, J. P. B.; Coelho, F. S.; Filgueira, R. F.; Peixoto, F. S. Extração de Atributos Morfométricos da Serra Mossoró (Mossoró-RN) a Partir do Modelo de Elevação Digital (MDE). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n.06: 2239-2248, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.6.p2239-2248>.
- Diniz, C. H. G.; Amaro, V. E.; Prudêncio, M. C. & Felipe R. F. Representação Tridimensional de Processos de Erosão Costeira em Ilhas Barreiras Utilizando Tecnologia de Jogos, *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 40, 147-158, http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_147_158, 2017.
- Diniz, M. T. M.; Oliveira, G. P.; Maia, R. P.; Ferreira, B. Mapeamento Geomorfológico do Estado do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18(4): 689-701, 2017. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v18i4.1255>.

- Easterling, D. R.; Meehl, G. A.; Parmesan, C.; Changnon, S. A.; Karl, T. R. & Mearns, L. O. Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts, *Science*, 289, 2068–2074, <http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5487.2068>, 2000.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA, U.S.A. 2011.
- EXCIMAP - European exchange circle on flood mapping. Handbook on good practices for flood mapping in Europe. Water Directors, 60p., 2007.
- Fiorillo, E.; Crisci, A.; Issa, H.; Maracchi, G.; Morabito, M. & Tarchiani, V. Recent Changes of Floods and Related Impacts in Niger Based on the ANADIA Niger Flood Database. *Climate*, 6, 59; <http://dx.doi.org/10.3390/cli6030059>, 2018.
- Gama, L. F.; Seixas, A. & Souza, A. M. B. Implantação e análise de estruturas geodésicas planimétricas obtidas por GPS e estação total: Aplicações em levantamentos cadastrais urbanos. *Revista Brasileira de Cartografia*, nº 64/2: 227-247, 2012.
- Ganade de Araújo, C.E. Evolução tectônica da margem ativa Neoproterozoica do Orógeno Gondwana Oeste na Província Borborema (NE-Brasil). (Tese de Doutorado) – Universidade de São Paulo, 243p., 2014.
- Grigio, A. M.; Castro, A. F.; Souto, M. V. S.; Amaro, V. E.; Vital, H. & Diodato, M. A. Use of remoting sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the Municipal District of Guamaré - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil, *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 1427-1431, www.jstor.org/stable/25742990 (last access: 22 December 2019), 2006.
- Hall, J. W.; Harvey, H. & Manning, L. J. Adaptation thresholds and pathways for tidal flood risk management in London, *Climate Risk Management*, 24, 42–58, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.04.001>, 2019.
- Herdman, L.; Erikson, L. & Barnard, P. Storm Surge Propagation and Flooding in Small Tidal Rivers during Events of Mixed Coastal and Fluvial Influence, *Journal of Marine Science and Engineering*, 6, 158, <https://doi.org/10.3390/jmse6040158>, 2018.
- IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente: Informações dos municípios de Mossoró, Grossos e Tibau, volume 24, 1-24, 1999.
- IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente. Projeto de Zoneamento Ecológico-Econômico dos Estuários do Rio Grande do Norte – ZEE/RN. Natal-RN. 35p., 2005.

- IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 151 pp., 2014.
- Jensen, J.R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução da Segunda Edição. São José dos Campos, Parêntese Editora. 598p., 2009.
- Jha, A. K.; Bloch, R. & Lamond, J. Cidades e Inundações: Um guia para a Gestão Integrada do Risco de Inundação Urbana para o Século XXI. The World Bank, Washington, D.C. 54p., 2012.
- Köppen, W.: Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf, Petermanns Mitt, 64, 193-203, available at: http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1918.pdf, 1918.
- Kulp, S. & Strauss, B. H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding, Nature Communications, 10, 4844, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12808-z>, 2019.
- Lima, J.C.F. Evolução morfotectônica da porção centro-sul da Bacia Paraíba. (Tese de Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 124p., 2016.
- Lima, C. C. Identificação e avaliação de zonas de alagamentos urbanos na cidade de Natal, nordeste do Brasil, com o suporte de geotecnologias. 2019. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/26862>.
- Lima, C. C.; Amaro, V. E.; Araújo, P. V. N.; Santos, A. L. S. Identificação e Avaliação de Zonas de Alagamentos Urbanos, com o Suporte de Geotecnologias, na Cidade de Natal, Nordeste do Brasil. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, V. 42(2): 378-394, 2019. http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_378_394
- Losada, I. J.; Reguero, B. G.; Méndez, F. J.; Castanedo, S.; Abascal, A. J. & Mínguez, R. Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean, Global and Planetary Change, 104, 34–50, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.006>, 2013.
- Ma, R. DEM Generation and Building Detection from Lidar Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 71(7): 847-854, 2005.
- Matos, M. F. A.; Amaro, V. E.; Scudelari, A. C. & Bezerra, A. C. N. Análises estatísticas de alturas significativas de ondas de série temporal de curto prazo na costa do Rio Grande do Norte. Pesquisas em Geociências, 46, e0731, <https://doi.org/10.22456/1807-9806.93246>, 2019.

- McGranahan, G.; Balk, D. & Anderson, B. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones, *Environment and Urbanization*, 19, 17–37, <https://doi.org/10.1177%2F0956247807076960>, 2007.
- Medeiros, M. D. Eventos hidroclimáticos extremos e vulnerabilidade socioambiental a inundações no Baixo-Açu – RN, Ph.D. theses, Postgraduate Program in Geography, Federal University of Ceara, Brazil, 209 pp., available at: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/35674> (last access: 22 December 2019), 2018.
- Medeiros, M.D. & Zanella, M.E. Estudo das vazões e estimativas de inundações no Baixo-Açu-RN, *Geo UERJ*, 40946, 1-30, <http://dx.doi.org/10.12957/geouerj.2019.40946>, 2019.
- Miler, S. B. Photogrammetric Products. In McGlone, J., (Ed.), *Manual of Photogrammetry*, 5th Ed., Bethesda: ASP&RS, 983-1013, 2004.
- MIN - Ministério da Integração Nacional. Política Nacional de Defesa Civil. Brasília/DF, 82p., 2007.
- MIN - Ministério da Integração Nacional. Anuário brasileiro de desastres naturais: 2013. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Brasília: 106p., 2014.
- Moura, G. Origem, localização e extinção da Ilha de Manoel Gonçalves. In: Trindade, J. F. *Ilha de Manoel Gonçalves: Vida e Morte*. Sebo Vermelho Edições, Natal-RN, 219p., 2016.
- Nerem, R. S.; Beckley, B. D.; Fasullo, J. T.; Hamlington, B. D.; Masters, D. & Mitchum, G. T. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 2022–2025, <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>, 2018.
- Nicholls, R. J. & Cazenave, A. Sea-level rise and its impact on coastal zones, *Science*, 328, 1517-1520, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1185782>, 2010.
- Nimer, E. Ensaio de um novo método de classificação climática: contribuição à climatologia intertropical e subtropical, especialmente do Brasil. *Boletim de Geografia*. Rio de Janeiro, v. 31(277): 141-153, 1972.
- Nunez, C. Floods. National Geographic, <https://www.nationalgeographic.com/environment/natural-disasters/floods/>, 2019.
- OECD. Financial Management of Flood Risk. <https://dx.doi.org/10.1787/9789264257689-en>, 2016.
- PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas, Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de

- Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas, edited by: Assad, E.D. and Magalhães, A. R., COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 414 pp., available at: http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/RAN1_completo_vol2.pdf (last access: 10 October 2019), 2014.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, available at: <http://www.R-project.org/>, last access: 28 November 2019.
- Santos, A.L.S.; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. Geodésia de precisão aplicada à análise da evolução morfodinâmica de curto prazo na ilha barreira do corta cachorro, litoral do Rio grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(3): 425-442, 2014.
- Santos, A.L.S.; Amaro, V.E. & Santos, M.S.T. Avaliação de metodologia de aquisição de dados para representação de feições morfológicas de praias arenosas através de modelo digital de elevação. *Mercator*, 14(2): 137-155, 2015.
- Santos, M.S.T. & Amaro, V.E. Rede geodésica para o monitoramento costeiro do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. *Bol. Ciênc. Geod.*, 17(4): 571-585, 2011.
- Santos, M.S.T.; Amaro, V.E. & Souto, M.V.S. 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(5): 663-681, 2011.
- Saueressig, S. R. & Robaina, L. E. S. Zoneamento das Áreas de Risco a Inundação da Área Urbana de Itaqui (RS), *Boletim Gaúcho de Geografia*, 42, 672–687, 2015.
- Saueressig, S. R. Zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana de Itaqui-RS, MS Dissertation, Federal University of Santa Maria, Santa Maria-RS, Brazil, 101 pp., available at: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/9362> (last access: 25 April 2018), 2012.
- Silva, C. H. R. T. Desastres naturais e desenvolvimento sustentável. Senado Federal. *Boletim do Legislativo*, n 25, 6p. <http://www2.senado.leg.br/bdsf/handle/id/242665>, 2012.
- Silva, J. L. Municípios um por dia: Macau. *Diário de Natal*, 23/08/1977. Disponível em: <http://memoria.bn.br/DocReader/028711_02/23334>. Acessado em: julho de 2019.
- Silva, R. M.; Moreira, V. S. & Lopes, A. B. Geodetic method to obtain a digital elevation model associated to the Brazilian Geodetic System, *Int. J. Eng. Tech. Res.*, 7, 14–17, 2017.

- Silva, R. M. Proposta de metodologia para definição de um modelo digital de elevação para monitoramento de áreas de inundação, MS Dissertation, Federal University of Pampa, AlegreteRS, Brazil, 145 pp., available at: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/riu/2198> (last access: 25 April 2018), 2017.
- SMC-Brasil. Níveis e cota de inundação, Documento temático, Ministério do Meio Ambiente, Brasília-DF, 130 pp., https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80342/Livro_SMC_4___Niveis_e_Cota_de_inundacao.pdf (last access: 16 November 2019), 2018.
- Sminovic, S. P. Floods in a Changing Climate: Risk Management. International Hydrology Series, Cambridge, 206 pp., 2012.
- Suguio, K. Mudanças Ambientais da Terra. 1.ed. Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo, 339p., 2008.
- The Copenhagen Diagnosis. Updating theWorld on the Latest Climate Science. I. Allison, N. L. Bindoff, R. A. Bindshadler, et al., The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia. 2009.
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. Huang He floods. Encyclopædia Britannica, <https://www.britannica.com/event/Huang-He-floods>, 2016.
- The Geological Society. Flooding. Disponível em: <https://www.geolsoc.org.uk/factsheets#Flooding>, 2013. Acessado em: maio de 2018.
- Torge, W. Geodesy. Third completely revised and extended edition. [S.l.]: Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2001.
- UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Geohazard Risk Reduction. Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/special-themes/disaster-risk-reduction/geohazard-risk-reduction/>>. Acessado em: maio de 2018.
- Vasconcelos, D. L. Reativações Rúpteis de Zonas de Cisalhamento Pré-cambrianas na Margem Continental Atlântica: Bacias Sergipe-Alagoas e Pernambuco. (Tese de Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 158p., 2018.

APÊNDICE A - Sobre o Discente (Mar/2020)

Paulo Victor do N. Araújo é Bacharel em Engenharia de Pesca pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (2011), Especialista em Análise Ambiental, Especialista em Geoprocessamento, Mestre e Doutor em Geodinâmica e Geofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2014). Desenvolveu trabalhos nas áreas de recursos pesqueiros, mapeamento marinho e de inundações com o apoio de geotecnologias. Desde 2013 é docente efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), lecionando disciplinas no Curso Técnico em Recursos Pesqueiros e desenvolvendo pesquisas com o uso de geotecnologias em estudos geoambientais. Atua como pesquisador nas áreas de Recursos Pesqueiros e Geociências, com ênfase no Geoprocessamento (SIG, Sensoriamento Remoto e Processamento Digital de Imagens) e Modelagem Ambiental de Áreas Costeiras. Membro da Associação de Especialistas Latino Americanos em Sensoriamento Remoto (SELPER). Email: paulo.araujo@ifrn.edu.br.

APÊNDICE B - Sobre o Orientador (Mar/2020)

Venerando Eustáquio Amaro é Bacharel em Geologia pela Universidade Federal de Mato Grosso (1986), Mestre em Geologia Econômica pela Universidade de Brasília (1989) e Doutor em Geociências (Recursos Minerais e Hidrogeologia) pela Universidade de São Paulo em cooperação com o Laboratoire de Dynamique de la Lithosphère da Université Claude-Bernard (UMR 5570) de Lyon, França (1998). Atualmente é Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DEC/UFRN), Coordenador do Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica Marinha (GNOMO). Membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo (PPGCEP) e Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGE), todos da UFRN. Membro permanente do Programa de Formação em Geologia, Geofísica e Informática do Setor Petróleo e Gás da Agência Nacional do Petróleo (PRH-22). Membro da American Geophysical Union (AGU). Membro da Sociedade Brasileira de Geologia (SBG). Participa de projetos de cooperação internacional. Atua como pesquisador em Geociências, com ênfase nas Geotecnologias Aplicadas (Geoprocessamento, Sensoriamento Remoto, SIG, Processamento Digital de Imagens, Banco de Dados Georreferenciados, Geodésia de Precisão) e Monitoramento Ambiental de Áreas Costeiras. Email: venerando.amaro@gmail.com.

APÊNDICE C - Publicações do Discente Durante o Doutorado (Mar/2016 a Fev/2020)

1. **Araújo, P. V. N.**; Amaro, V. E.; Silva, R. M. & Lopes, A. B. Delimitation of flood areas based on a calibrated a DEM and geoprocessing: case study on the Uruguay River, Itaquí, southern Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 19, p. 237-250, 2019.
2. Aguiar, L. S.; Amaro, V. E.; **Araújo, P. V. N.** & Santos, A. L. S. Low Cost Geotechnology Applied to Flood Risk Assessment in Coastal Urban Areas in Climate Change Scenarios. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, p. 267-290, 2019.
3. Lima, C. C.; Amaro, V. E.; **Araújo, P. V. N.** & Santos, A. L. S. Identification and Evaluation of Urban Flooding Zones with the Support of Geotechnologies, in Natal City, Northeast Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, p. 378-394, 2019.
4. **Araújo, P. V. N.**; Amaro, V. E.; Alcoforado, A. V. C. & Santos, A. L. S. Vertical Accuracy and Calibration of Digital Elevation Models (DEMs) for the Piranhas-Assu River Basin, Rio Grande do Norte, Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 41, p. 351-364, 2018.
5. Aguiar, L. S.; Amaro, V. E. & **Araújo, P. V. N.** Half a Century of the Forest Code and its Consequences in Areas of Permanent Preservation in the Hyper-Saline Estuary in the Brazilian Semiarid. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 41, p. 191-210, 2018.
6. Silva, G. B.; Hazin, H. G. & **Araújo, P. V. N.** Fishing operations to catch tuna on aggregated schools at the vicinity of a data buoy in the Western Equatorial Atlantic. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 66, p. 335-338, 2018.
7. Alencar, C. E. R. D.; Vale, V. F.; Moraes, S. A. S. N.; **Araújo, P. V. N.** & Freire, F. A. M. New record of the Six-holed Keyhole Urchin, *Leodia sexiesperforata* (Leske, 1778) (Clypeasteroidea, Mellitidae), from the Brazilian coast, with an updated distribution map. *Check List, Journal of Species List and Distribution*, v. 13, p. 597-603, 2017.
8. França, N. F. C.; **Araújo, P. V. N.** & Albino, G. G. A Importância do Conhecimento Geotecnológico no Curso Técnico em Recursos Pesqueiros do IFRN. *Revista Brasileira de Educação Profissional e Tecnológica*, v. 2, p. 31-47, 2017.
9. **Araújo, P. V. N.** & Amaral, R. F. Mapping of coral reefs in the continental shelf of Brazilian Northeast through remote sensing. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 16, p. 5-20, 2016.
10. Queiroz, E. V.; **Araújo, P. V. N.**; Hammill, E. & Amaral, R. F. Morphological characteristics of rhodolith and correlations with associated sediment in a sandstone reef: Northeast Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, v. 8, p. 133-140, 2016.

...

*Boi com sede bebe lama
Barriga seca não dá sono
Eu não sou dono do mundo
Mas tenho culpa, porque sou
Filho do dono*

...

Trecho da música Filho do Dono – Petrucio Amorim