

ELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR EM SÃO JOÃO DA BARRA, RJ, BRASIL

José Luiz Pontes da Silva Júnior^{@ 1}, Marcos Antonio Pedlowski²

RESUMO: Identificar áreas alagáveis nas Zonas Costeiras (ZCs) é essencial para a elaboração de planos de gestão capazes de minimizar os impactos associados à elevação do Nível Global Médio do Mar (NGMM). O objetivo deste trabalho foi projetar a vulnerabilidade e susceptibilidade à intrusão marinha em São João da Barra/RJ, considerando dois cenários previstos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) para o período 2081-2100: “otimista” (elevação do NGMM de 0.26 a 0.55 m) e “pessimista” (0.45 a 0.82 m). Através do software QGIS foi construído um banco de dados para a representação das unidades de paisagem e a ponderação de variáveis que condicionam as inundações. Dos 453.00 km² de território são-joanense até 193.01 km² (42.60%) e 253.38 km² (55.85%) podem ser inundados nos cenários “otimista” e “pessimista”, respectivamente. A elevação no intervalo 0.26-0.82 m pode tornar inundável até 16.46 km² (42.81%) dos 38.44 km² da RPPN Caruara e até 60% (11.52 km²) dos 19.20 km² do Porto do Açú. As áreas de maior vulnerabilidade ambiental concentram-se nos manguezais. As regiões mais afetadas economicamente nos dois cenários são aquelas onde vivem os agricultores familiares. Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que devido às suas configurações geológicas e ambientais, a ZC são-joanense é vulnerável à elevação do NGMM, com maiores reflexos sobre áreas urbanas e rurais de baixa altitude e em ecossistemas naturais. Até 2100 o município poderá perder mais da metade de sua área territorial e caso não sejam tomadas ações de contingenciamento, haverá grandes perdas econômicas e ambientais.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Cidade Litorânea, Intrusão Marinha, Suscetibilidade, Vulnerabilidade.

ABSTRACT: Identifying wetlands in Coastal Zones (CZs) is essential for the development of management plans capable of minimizing the impacts associated with the increase of Global Mean Sea Level (GMSL). The objective of this work was to project the vulnerability and susceptibility to marine intrusion in São João da Barra/RJ, considering two Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) scenario's for the period 2081-2100: “optimistic” (GMSL elevation from 0.26 to 0.55 m) and “pessimistic” (0.45-0.82m). Using QGIS software, a database was built for the representation of landscape units and a weighting of floods variables. Of the 453.00 km² of São João da Barra territory up to 193.01 km² (42.60%) and 253.38 km² (55.85%) can be flooded in the “optimistic” and “pessimistic” scenarios, respectively. The elevation in the 0.26-0.82 m interval can render flooding up to 16.46 km² (42.81%) of the 38.44 km² of RPPN Caruara and up to 60% (11.52 km²) of the 19.20 km² of Açú Port. The areas of greatest environmental vulnerability are concentrated in mangroves. The region most economically affected in both situations are those where family farms live. Based on the results obtained, we conclude that due to its geological and environmental configurations, São João da Barra CZ's is vulnerable to the elevation of the GMSL, with greater impacts on low urban and rural areas and in natural ecosystems. By 2100 the municipality may lose more than half of its territorial area and if contingency actions are not taken, there will be huge economic and environmental losses.

Keywords: Climate Change, Coastal City, Marine Intrusion, Susceptibility, Vulnerability.

@ Corresponding author: josepontesjr@gmail.com

1 Universidade Estadual do Norte Fluminense

2 Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Email: pedlowma@uenf.br

1. INTRODUÇÃO

Em meados dos anos 1980, a temática Mudança Climática Global - MCG se tornou um assunto de política internacional, resultando na criação de importantes organizações como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC em 1988 e tratados de proteção climática como Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - UNFCCC em 1992, o Protocolo de Kyoto em 1997 (Moreira, 2013), além de iniciativas como o Future Earth Coasts, uma rede global de pesquisadores que buscam o entendimento científico para alcançar a sustentabilidade e a adaptação às MCG nas Zonas Costeiras - ZC.

É sabido que existem as MCG atribuíveis às interferências antrópicas que alteram a composição atmosférica e a variabilidade climática vinculada às causas naturais. No entanto, no último século, a partir da revolução industrial, as atividades humanas provocaram direta e indiretamente inúmeras transformações físicas e sociais nos ecossistemas urbanos e naturais, entre elas, as MCG e a urbanização, dois fenômenos intrinsecamente ligados (Ojwang *et al.*, 2017). Os processos naturais e a qualidade de vida na Terra estão sendo afetados e influenciados pelas MCG ocasionadas por este impacto antrópico, principalmente pelo fenômeno do aquecimento global em decorrência da crescente emissão antrópica de Gases de Efeito Estufa - GEE na atmosfera nas últimas décadas (Stainforth *et al.*, 2005).

Este processo resulta no derretimento dos gelos montanhosos e polares, além do aquecimento das águas oceânicas provocando sua expansão térmica e aumentando seu volume, ocasionando a elevação do Nível Global Médio do Mar - NGMM (Marengo *et al.*, 2010). Segundo Stocker e Qin (2013), a elevação do NGMM é um fenômeno físico e geológico que naturalmente ocorreu ao longo da história da Terra, sendo influenciado por fatores complexos como movimento das placas tectônicas e MCG. Os autores argumentam que, mesmo se as causas antrópicas do aquecimento global forem interrompidas, a expansão térmica das águas demorará muito tempo para estabilizar e a elevação do NGMM continuará acarretando consequências graves e irreversíveis (e.g. erosão costeira, destruição de ecossistemas litorâneos terrestres e aquáticos, alagamento de cidades, perda de terras cultiváveis, salinização de aquíferos potáveis, aumento de migração social).

O último relatório do IPCC divulgado em 2019 comprova que a temperatura do planeta está subindo, principalmente pela

maior concentração de um dos principais GEE na atmosfera, o CO₂. A elevação do NGMM é um dos mais graves efeitos provocados por essas MCG, uma vez que modelos climáticos ao considerarem cenários de aumento da temperatura global entre 2 a 5°C preveem que o NGMM pode subir até dois metros ao final do século presente, o que afetará intensamente 70% das ZC do planeta, em prejuízo principalmente as regiões mais pobres (Schlüter *et al.*, 2020).

Nicholls e Cazenave (2010) alertam que as ZC com até 10 m de altitude, as quais representam 2% da superfície terrestre e abrigam 10% da população mundial, são as mais vulneráveis aos possíveis impactos de inundações associadas às MCG. Estimam-se prejuízos econômicos de US\$ 940 milhões anuais até o ano de 2050 caso ocorra 20 cm de elevação do NGMM nas maiores cidades da América Latina e Caribe, podendo chegar anualmente a US\$ 1 bilhão de perdas se este aumento for de 40 cm (Cazenave *et al.*, 2014). Muehe (2001) aponta que no Brasil, em caso de subida de 1m do NGMM as regiões Norte-Nordeste e Sul-Sudeste apresentarão um recuo da linha da costa variando de 100 m a 1 km e 10 m a 100 m, respectivamente. Entretanto, no Brasil ainda são escassas pesquisas científicas, políticas públicas e demais abordagens sobre cidades costeiras e MCG (Sathler *et al.*, 2018). E, a ausência de legislações específicas, como Zoneamento Ecológico Econômico Costeiro - ZEEC e estudos ambientais pode elevar ainda mais a vulnerabilidade costeira brasileira.

Os ambientes costeiros são direta e indiretamente afetados por processos naturais e impactos antropogênicos, como elevação do NGMM e crescimento da população humana. Neste sentido, as ZC merecem atenção especial, uma vez que, além de estarem mudando a uma velocidade impressionante, estão expostas a uma série de riscos relacionados ao clima. Esta vulnerabilidade costeira é alvo de importantes debates internacionais, já que devido a sua densidade urbana elevada e fragilidade ecológica à diferentes tipos de desastres naturais (e.g. tempestades fortes, ressacas, inundações e erosão), torna-se necessário estabelecer uma abordagem específica para alcançar a sustentabilidade ambiental, a qual considere os cenários futuros das questões urbanas costeiras enfrentadas pelos perigos potenciais das MCG (Polette e Lins-De-Barros, 2012). De acordo com Füssel (2007), existem diferentes definições e dimensões para o termo vulnerabilidade, mas não existe um conceito correto ou melhor do que o outro, porque isso dependerá do objetivo de cada trabalho. No presente estudo, a definição adotada é a do IPCC (2014) que remete vulnerabilidade às questões relacionadas às MCG. Neste sentido, vulnerabilidade é entendida como o

grau em que um dado sistema (*i.e.* ecológicos, geofísicos e socioeconômicos) é suscetível ou incapaz de se ajustar aos efeitos adversos das mudanças climáticas, entre os quais podem ser incluídos a variabilidade climática e os eventos meteorológicos extremos. Já a suscetibilidade é entendida enquanto a intensidade ou probabilidade de um determinado ambiente sofrer impacto devido a um perigo natural, tal como inundações (Dottori *et al.*, 2018).

Por outro lado, Pezzoli *et al.* (2013) afirmam que uma das grandes preocupações atuais da comunidade científica internacional é compreender os riscos da ocorrência de inundações de áreas costeiras que sejam causadas pela elevação do NGMM. Um maior conhecimento acerca da intrusão de águas oceânicas sobre áreas continentais permitirá o planejamento de políticas globais de resiliência e adaptação. Nesse sentido é que já foram realizados estudos sobre inundações em ZC, estuários, bacias hidrográficas, ambientes urbanos, entre outros compartimentos, que têm melhorado a capacidade de identificação de vulnerabilidade, possibilitando assim um melhor gerenciamento de riscos à desastres (Schröter *et al.*, 2018). Uma das ferramentas disponíveis para o gerenciamento de riscos é a modelagem de diferentes intensidades de inundação que consideram cenários futuros a partir das MCG, bem como os impactos decorrentes do aumento do NGMM em áreas vulneráveis (Rasmussen *et al.*, 2018; Vousdoukas *et al.*, 2018). Segundo Muehe (2001), na avaliação da vulnerabilidade da linha de costa e o recuo desta em virtude da elevação do NGMM, é necessário considerar o gradiente topográfico da plataforma continental, características geomorfológicas, variações do nível do mar (maré astronômica e meteorológica), ondulações, granulometria, cobertura vegetal, além da densidade populacional e intervenções antrópicas.

No tocante à governança costeira é importante ressaltar que portos marítimos, como o Porto do Açu em São João da Barra, possuem papel estratégico já que são responsáveis por 80% do transporte do comércio mundial ao fornecerem conexões nas cadeias de suprimentos globais, possibilitando assim o acesso a diferentes mercados. Além disso, devido a sua localização em áreas localizadas na interface oceano-continente, estes portos são vulneráveis direta e indiretamente a eventos climáticos extremos associados a elevação do NGMM, o que poderá futuramente afetar o comércio e desenvolvimento da economia global. Para enfrentar os desafios trazidos pelas MCG (*i.e.* aumento em processos de assoreamento e erosão nas vias de acesso portuário, intensificação das inundações de retroáreas portuárias), os portos precisam se adaptar por

meio de modelos de planejamento, investimento e operação que sejam mais holísticos (Becker *et al.*, 2013). Por sua vez, os municípios litorâneos com baixo gradiente topográfico, como São João da Barra, também precisam se preparar para estes cenários futuros.

Diversos portos internacionais, como o Porto de Roterdã nos Países Baixos, o Porto de Aveiro em Portugal e o Porto de Nova York nos Estados Unidos por estarem abaixo do NGMM já estão reconhecendo a extensão das inundações no contexto das MCG e se adaptando para serem resilientes diante dos impactos climáticos ocasionados pela elevação do NGMM (Christodoulou *et al.*, 2019). Ainda são pontuais e dispersos os conhecimentos sobre os impactos das MCG na costa litorânea brasileira, em especial quanto ao sistema portuário e as cidades que hospedam as megaestruturas portuárias, como é o caso de São João da Barra. Essa informação limitada e deficitária dificulta o entendimento em relação aos seus níveis de vulnerabilidade e suscetibilidade aos extremos climáticos (D'almeida e Costa, 2011).

Assim sendo, no contexto das MCG, a identificação de áreas alagáveis nas ZC é essencial para a elaboração de planos de gestão capazes de minimizar os impactos associados à elevação do NGMM. O objetivo deste trabalho foi projetar a vulnerabilidade e susceptibilidade socioambiental e econômica à intrusão marinha em São João da Barra, no norte do Estado do Rio de Janeiro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

São João da Barra possui 453.00 km² de área territorial, o que corresponde a 4.7% da área total da região Norte Fluminense e possui atualmente aproximadamente 35.000 habitantes, sendo que 20% destes ocupam a área rural (IBGE, 2020). O município está dividido em seis distritos: Sede (1^o Distrito), Atafona (2^o), Grussaí (3^o), Cajueiro (4^o), Pipeiras (5^o) e Barcelos (6^o). O território são-joanense possui uma alta diversidade de ecossistemas, que incluem restinga, manguezal, lagoas costeiras (*e.g.* lagoas de Grussaí e Iquipari), manguezais e praias, além da proximidade com o delta do Rio Paraíba do Sul, o segundo maior do Brasil (Figura 1).

O município de São João da Barra está localizado na parte mais baixa da planície Goitacá, com um gradiente topográfico variando de -1.77 a 20.60 m e a uma altitude média de seis metros acima do nível do mar (Figura 2).

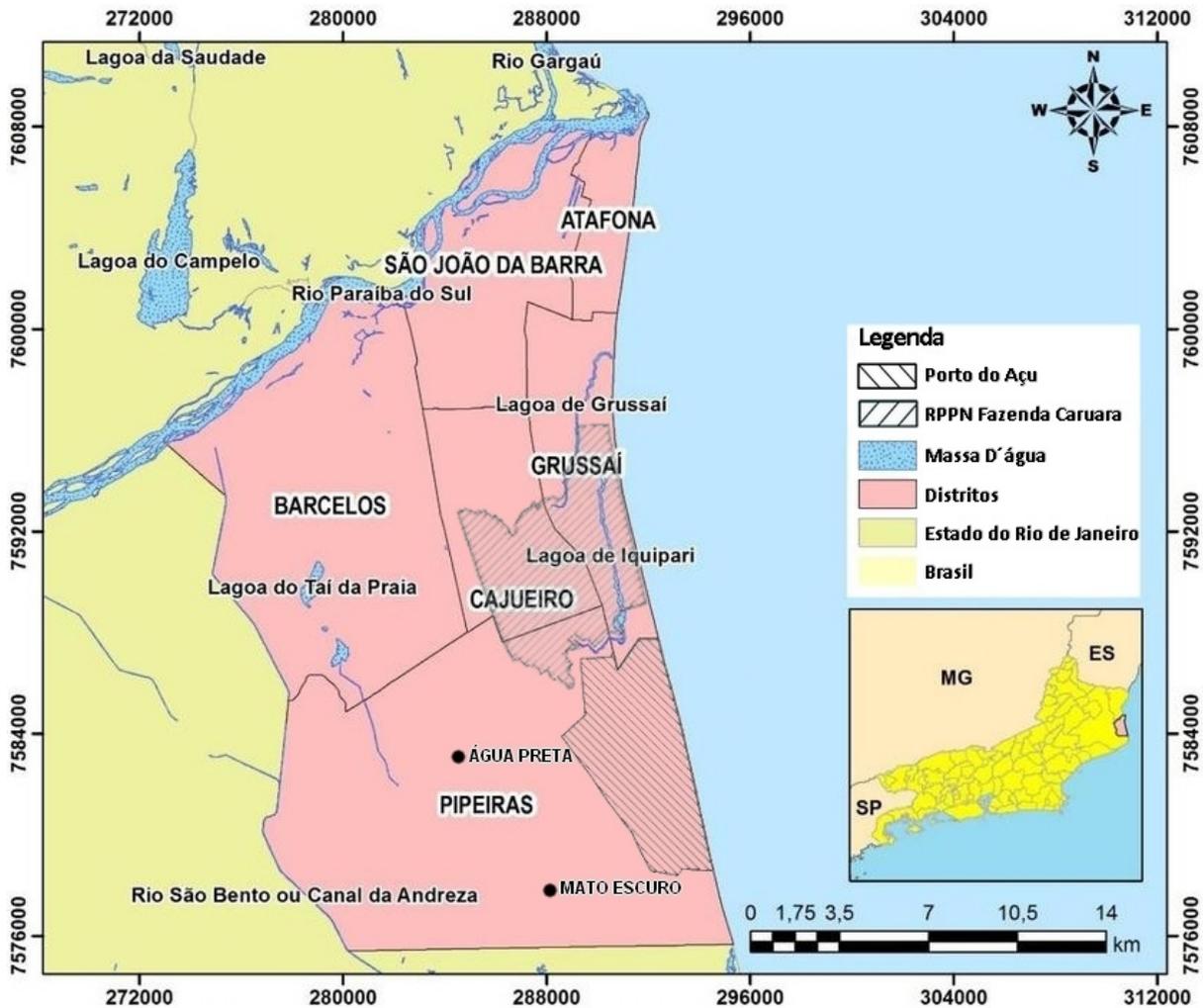


Figura 1. Situação e localização geográfica do município de São João da Barra, incluindo as áreas da RPPN Fazenda Caruara (delimitada pelo INEA), do Porto do Açú (delimitada pela Marinha do Brasil) e dos seus principais ecossistemas aquáticos (adaptado de Ecologus, 2011).

Na porção Leste do município encontram-se a maior Reserva Particular do Patrimônio Natural de restinga do Brasil, a RPPN Fazenda Caruara, e o Porto do Açú, um dos principais empreendimentos portuários do Estado do Rio de Janeiro e um dos maiores da América Latina. O 5º Distrito de São João da Barra, além de ser um dos mais populosos, é responsável por grande parte da economia do município, tanto pelos impostos gerados pelo Porto do Açú quanto pela produção da agricultura familiar em dezenas de propriedades rurais, situadas principalmente nas localidades de Água Preta e Mato Escuro (Figura 3).

Os principais procedimentos metodológicos adotados com o software QGIS foram a construção de banco de dados para a

representação das unidades de paisagem e a ponderação de variáveis que condicionam as inundações, como hipsometria e relevo. Para tal, foram utilizados arquivos vetoriais (com informações topográficas, cartográficas, hidrográficas e censitárias) e dados matriciais (TOPODATA) disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2021), Serviço Geológico do Brasil - CRM (2021), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2021) e o Instituto Estadual do Ambiente - INEA (2021).

Após a obtenção dos polígonos da área de interesse utilizando o banco de dados ATLAS 2008 disponibilizado pelo INPE, foram criados no QGIS os bancos de dados e os projetos para cada um dos mapas temáticos. As etapas metodológicas incluíram

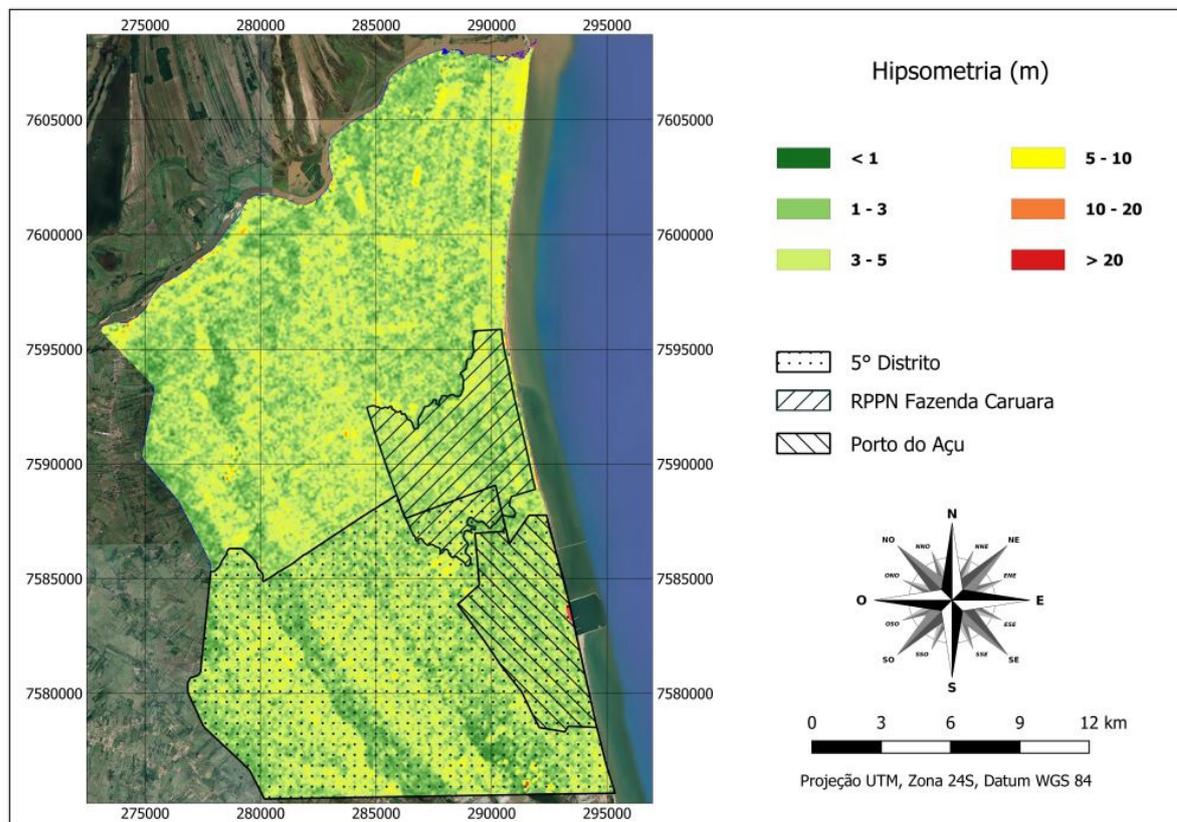


Figura 2. Mapa hipsométrico de São João da Barra, RJ, demonstrando a separação da zona terrestre e marítima, com destaque para as áreas do 5º Distrito, da RPPN Fazenda Caruara e do Porto do Açú.

a extração de curvas de nível a partir de imagens TOPODATA, o recorte de imagens raster TOPODATA com interseção do vetor referente ao município de São João da Barra, e a atribuição de *buffer* nas curvas de nível. As imagens fornecidas gratuitamente pela Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas - DGI/INPE foram georreferenciadas em projeção UTM, zona 24S e Datum WGS 84. A área no terreno capturada na imagem é identificada pelo número da órbita e do número do ponto dentro de cada órbita. A órbita/ponto da região Norte Fluminense é a 216/75. As imagens foram editadas, recortadas e os seus contrastes ajustados para uma melhor visualização e interpretação dos dados gerados ao longo do processamento. Os dados de altimetria foram obtidos pelo projeto TOPODATA, que, por sua vez, é uma melhoria da missão Suttle Radar Topography Mission - SRTM, cujos dados foram coletados pela nave espacial Endeavour entre 11 e 22 de fevereiro de 2000 sob a coordenação da National Imagery and Mapping Agency - NIMA e da National Aeronautics and Space Administration -

NASA. No modelo hipsométrico criado foram atribuídas cinco classes temáticas, sendo as cotas mínima e máxima de -1.77 e 20.60 m, respectivamente.

Após a importação dos arquivos vetoriais do limite de São João da Barra e dos arquivos dos padrões de relevo e da hidrografia/drenagem do município, as imagens classificadas em formato matricial foram convertidas para o formato vetorial. A escolha de arquivos vetoriais ao invés do uso da malha raster na elaboração dos mapas ocorreu pelo fato das estruturas matriciais serem relativamente simples, objetivando tornar a análise mais eficiente para este estudo. Além disso, como as imagens de satélites são naturalmente matriciais, isso permitiu a integração e comparação entre imagens e dados de Sistema de Informações Geográficas - SIG. A partir dos dados vetoriais foi possível efetuar a interseção dos vetores de hidrografia/drenagem e setores censitários com os limites do município. As curvas de nível foram extraídas de acordo com pares de cotas altimétricas (0.26 m a 0.55 m; 0.45 m a 0.82 m;



Figura 3. Setores do 5º distrito de São João da Barra: A) Porto do Açú; B) RPPN Fazenda Caruara cercada pelas Lagoas de Grussaí e Iquipari; C) propriedade agrícola-familiar em Água Preta; D) área urbana de Mato Escuro (A e B - Prefeitura de São João da Barra, 2021; C e D - arquivos pessoais, 2019).

0.55 m; 0.82 m), cada qual com cores distintas para facilitar a visualização. Seguindo a metodologia adotada por Silva *et al.* (2020), a partir das curvas de nível foi gerado um *buffer* (área de influência) de 500m para amenizar possíveis erros não condizentes com a realidade do terreno pelo fato de o pixel da imagem raster de altimetria ter uma área de 900 m² (30 m x 30 m). As áreas de cada classe (áreas suscetíveis à inundação, relevo e renda) e dos *buffers* foram obtidas através da ferramenta “Calculadora”, sendo que o valor do m³ foi estimado transformando o valor do km² para m² e multiplicando pelo valor da respectiva cota altimétrica.

No mapa de vulnerabilidade ambiental, as porcentagens mais elevadas foram consideradas os padrões de relevo mais vulneráveis à elevação do NGMM. Especificamente para o mapa de vulnerabilidade econômica, a partir das informações disponibilizadas no arquivo vetorial de “setores censitários” considerando a variável “renda por domicílio” foi criada adicionalmente uma coluna na tabela de atributos,

considerando as menores rendas como as mais vulneráveis à inundação. Além disso, devido à ausência de valores de renda por domicílio que não foram coletados pelo IBGE a determinados setores censitários, uma sexta classe denominada “sem dados” foi criada, sendo que as cores de cada uma das classes variam das rendas menores (mais vulneráveis) às rendas maiores (menos vulneráveis).

O método aqui utilizado para representar a inundação costeira é denominado de “modelo de inundação estática” ou “modelo *bathtub*” (Schmid *et al.*, 2014). Esta modelagem contempla apenas duas variáveis para o mapeamento de áreas potencialmente inundáveis: (i) a elevação altimétrica da área de interesse adjacente ao mar, representada pelo Modelo Digital do Terreno - MDT; e (ii) um valor de nível de inundação, neste caso a elevação do NGMM. Assim sendo, este modelo considera que as cotas situadas abaixo do NGMM são inundadas.

Para delimitar as áreas suscetíveis e vulneráveis à inundação no município de São João da Barra, incluindo a RPPN Caruara

e o Porto do Açú, foram utilizados os dados disponíveis no 50 Relatório de Avaliação - AR5 publicado pelo IPCC em 2014, os quais são organizados em cenários específicos sobre o aumento do NGMM denominados Representative Concentration Pathways - RCP. Portanto, considerando os futuros cenários de elevação do NGMM divulgados pelo IPCC para o período 2081-2100, os mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade têm como referência dois cenários de inundação: “otimista” e “pessimista” (Tabela 1).

Tabela 1. Cenários previstos pelo IPCC quanto à elevação do NGMM para o período de 2081 a 2100.

Cenários	Período 2081-2100	
	Variação provável (m)	Média (m)
RCP 2.6 (“otimista”)	0.26-0.55	0.40
RCP 4.5	0.32-0.63	0.47
RCP 6.0	0.33-0.63	0.48
RCP 8.5 (“pessimista”)	0.45-0.82	0.63

3. RESULTADOS

O mapeamento hipsométrico do município revelou que as maiores cotas altimétricas, ou seja, aquelas acima de 10 m, representam apenas 0.97 km² (0.002%) da área total do território sanjoanense, sendo que o relevo com altitude de até 3 m corresponde a 448.22 km² (98.94%) da área territorial. No cenário “otimista” para o período de 2081-2100, considerando uma elevação do NGMM de 0.26 e 0.55 m a área total suscetível à inundação dos 453.00 km² de território são-joanense corresponde a 146.00 km² (32.20%) e 193.00 km² (42.60%), respectivamente. Neste cenário, o volume de água inundada varia de 37 a 106 mi m³. Enquanto que, no cenário “pessimista” a elevação entre 0.45 e 0.82 m inundaria de 179 km² (39.51%) a 253 km² (55.85%) de área territorial, com uma variação de 80 a 207 mi m³ para o mesmo período (Figura 4).

Em ambos os cenários, a maior suscetibilidade de inundação ocorre na região sul de São João da Barra. Entretanto, no cenário “pessimista”, a inundação atingirá principalmente a

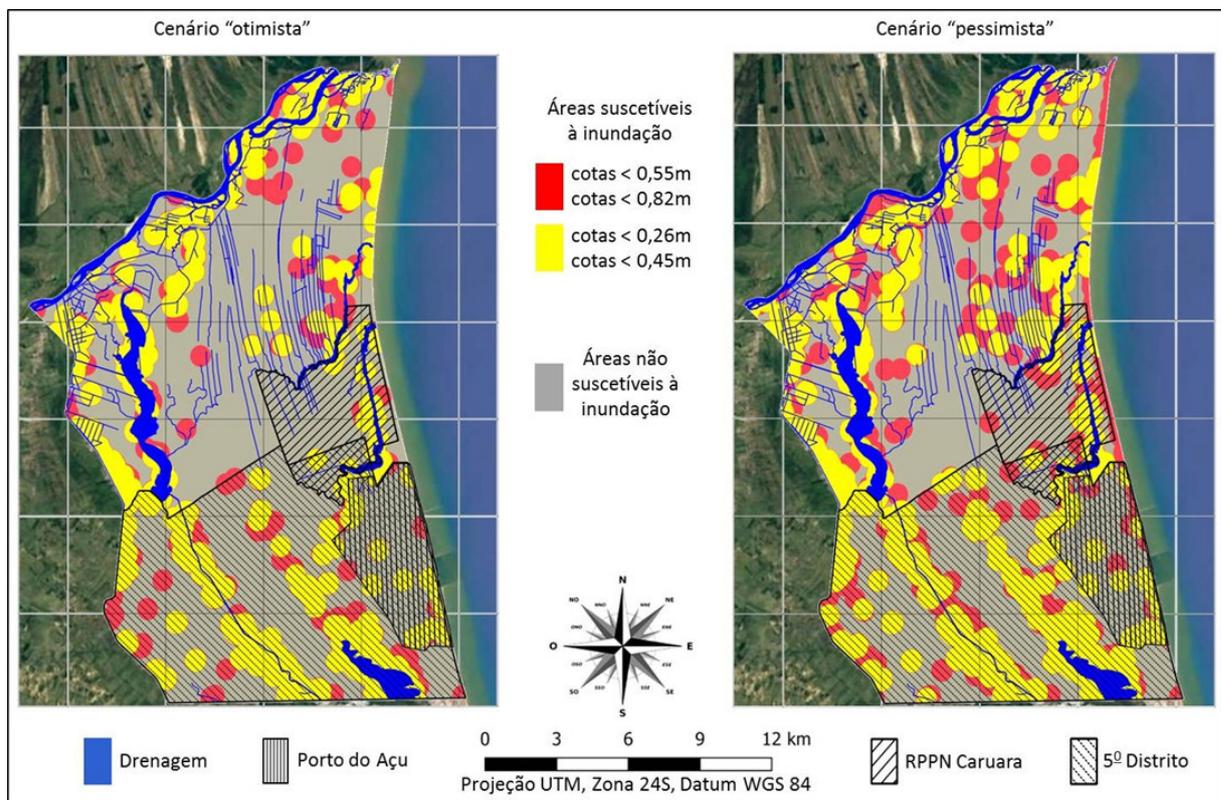


Figura 4. Susceptibilidade a inundação nos cenários “otimista” e “pessimista”.

faixa litorânea e áreas próximas a corpos hídricos, impactando as áreas urbanas e rurais, o Porto do Açú, e a RPPN Caruara. A elevação no intervalo 0.26-0.82 m pode inundar até 104.10 km² (55.66%) da área total do 5º Distrito (187.01 km²) e tornar 16.46 km² (42.81%) do território da RPPN Caruara (38.44 km²) suscetível a inundações (Tabela 2). Nos cenários “otimista” e “pessimista”, o Porto do Açú perderia entre 49.58 (9.52 km²) e 60.00% (11.52 km²) de sua área total de 19.20 km², respectivamente.

As áreas de maior vulnerabilidade ambiental estão concentradas nos manguezais e várzeas, as quais estão localizados em menores altitudes quando comparados com outros padrões de relevo, tal como a restinga (Figura 5). A elevação do NGMM entre 0.26 e 0.82 m atingirá até 1.46 km² da área de mangue são-joanense, o que corresponde um aporte de volume de água de 0.80 mi m³ em 98.00% da área territorial deste ecossistema. E apesar de ser menos vulnerável aos impactos das inundações, a restinga teria entre 33.10 e 48.62% de sua área inundada nos cenários “otimista” e “pessimista”, respectivamente (Tabela 3).

De acordo com os setores censitários elencados pelo IBGE, o rendimento mensal dos domicílios de São João da Barra varia de 6.520 00 a R\$ 855.058 00, sendo que as menores concentrações de renda destes setores estão localizadas principalmente no 5º Distrito de São João da Barra, a região do município que será a mais afetada pela elevação do NGMM (Figura 6). A elevação de até 0.55 m prevista no cenário “otimista” tornará o setor censitário de 200.001 00 a

R\$ 400.000 00 o mais vulnerável economicamente à inundações, uma vez 39.39 mi m³ de água atingirão 74.03 km², o que corresponde a 13.63% do território sanjoanense. No cenário “pessimista”, este setor continuará sendo o mais vulnerável, uma vez que a elevação do NGMM de 0.82 m acarretará um aporte de volume de água de 73.14 mi m³ que inundará 89.20 km². O setor censitário acima de R\$ 800.000 00 será o menos vulnerável em ambos os cenários de inundações (Tabela 4).

4. DISCUSSÃO

Os mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade de São João da Barra indicam que o agravamento decorrente da inundações terá reflexos sobre as áreas de baixa altitude urbanas e rurais, assim como também em ecossistemas, sendo que o mangue será o mais afetado. Aumentos do NGMM em um período de 100 anos entre 8-9, 9-12 e acima de 12 cm podem ser compensados pelos manguezais, provocarem estresse neste ecossistema e causarem perda ecossistêmica, respectivamente (Ellison e Stoddart, 1991). Para Field (1995), o aumento do NGMM será o principal fator a influenciar na distribuição deste ecossistema futuramente, mas que a variação deste efeito e o restabelecimento do manguezal dependerão principalmente das condições locais de disponibilidade do aumento de sedimentos. O manguezal são-joanense deverá subir nestes cenários, porém, tudo dependerá da relação entre inundações e capacidade de colonizar as novas áreas da penetração da cunha salina.

Tabela 2 - Áreas suscetíveis e não suscetíveis à inundações do município de São João da Barra, da RPPN Caruara e do 5º Distrito nos cenários “otimista” e “pessimista”.

Cenários	Áreas	Cotas	Município		RPPN		5º Distrito	
			km ²	m ³	km ²	m ³	km ²	m ³
Otimista	Suscetíveis	< 0.55m	193.00	106.15 mi	10.76	5.91 mi	85.32	46.76 mi
		< 0.26m	146.00	37.96 mi	9.17	2.38 mi	66.06	17.17 mi
	Não suscetíveis	< 0.55m	260.00	-	28.08	-	101.69	-
		< 0.26m	307.00	-	29.67	-	120.95	-
Pessimista	Suscetíveis	< 0.82m	253.00	207.46 mi	16.46	13.49 mi	104.10	85.36 mi
		< 0.45m	179.00	80.55 mi	9.82	4.41 mi	80.93	36.41 mi
	Não suscetíveis	< 0.82m	200.00	-	21.98	-	82.91	-
		< 0.45m	274.00	-	28.68	-	106.08	-
Área total de cada recorte territorial		-	453.00	-	38.44	-	187.01	-

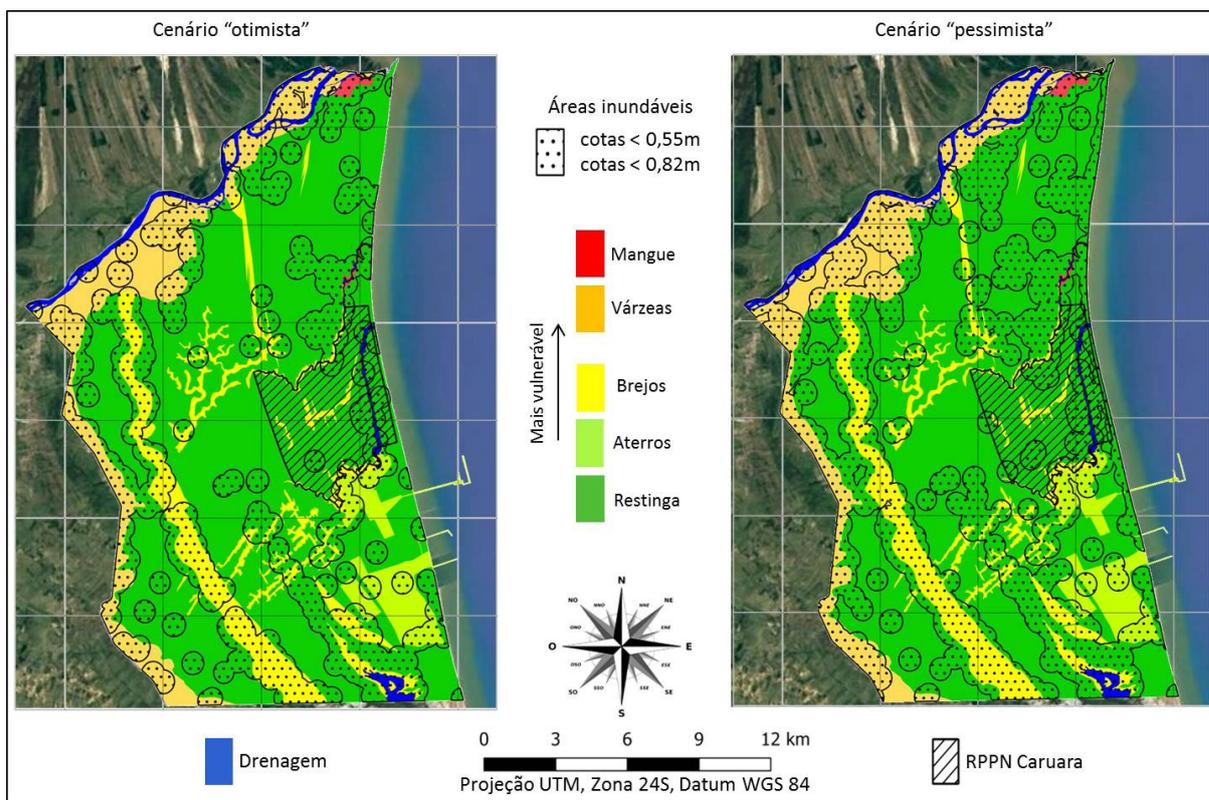


Figura 5. Vulnerabilidade ambiental à inundação nos cenários “otimista” e “pessimista”.

Tabela 3. Relevos suscetíveis e não suscetíveis à inundação do município de São João da Barra nos cenários “otimista” e “pessimista”.

Cenários	Área inundável	Padrão de Relevo					Território municipal	
		Mangue	Várzeas	Brejos	Aterros	Restinga	Inundável	Não inundável
Otimista	km ²	1.46	36.70	35.86	9.52	109.46	193.00	260.00
	m ³	0.80 mi	20.18 mi	19.72 mi	5.23 mi	60.20 mi	106.15 mi	-
	%	97.99%	72.12%	70.76%	49.58%	33.10%	-	-
Pessimista	km ²	1.46	42.12	37.10	11.52	160.80	253.00	200.00
	m ³	0.80 mi	34.53 mi	30.42 mi	9.44 mi	131.85 mi	207.06 mi	-
	%	97.99%	82.77%	73.20%	60.00%	48.62%	-	-
Área total de cada relevo (km²)		1.49	50.89	50.68	19.20	330.74	453.00	

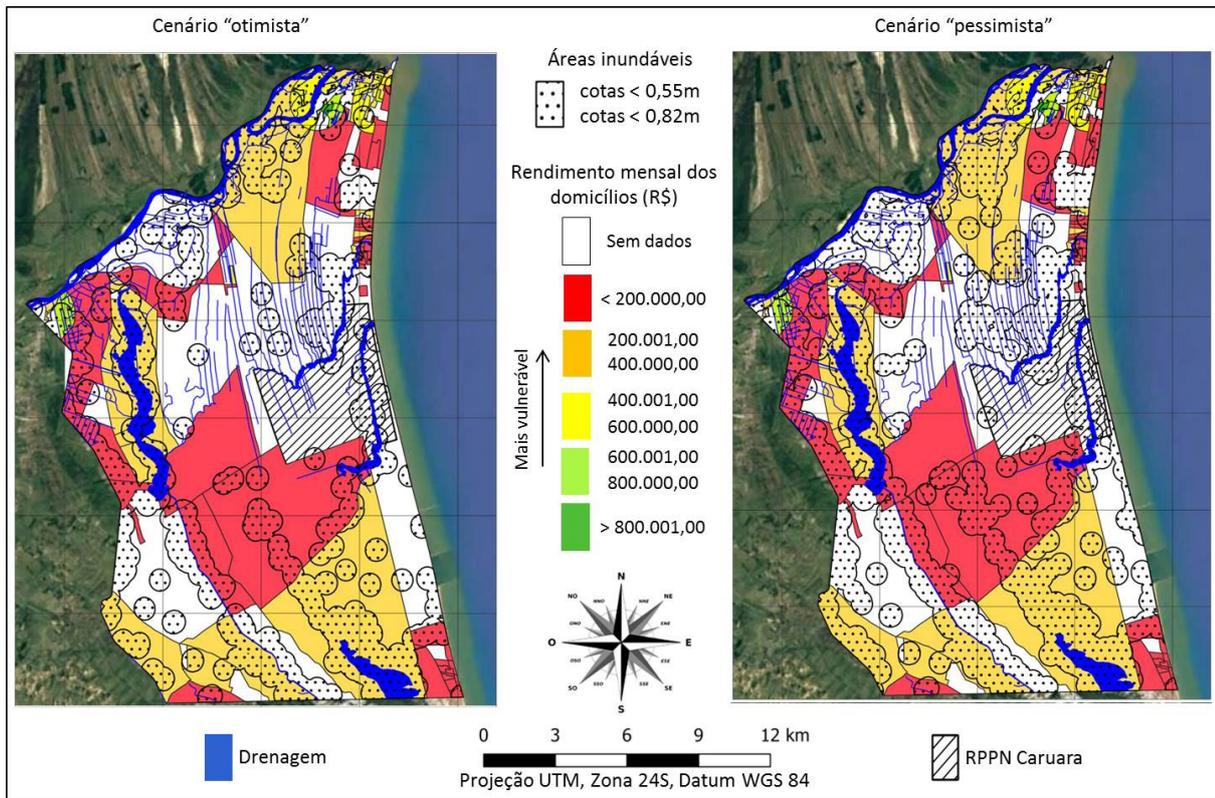


Figura 6. Vulnerabilidade econômica a inundação nos cenários "otimista" e "pessimista".

Tabela 4 - Áreas suscetíveis e não suscetíveis à inundação de acordo com os setores censitários de São João da Barra nos cenários "otimista" e "pessimista".

Cenários	Área inundável	Rendimento Mensal dos Domicílios (R\$)					
		Sem dados do IBGE	< 200.000 00	200.001 00 a 400.000 00	400.001 00 a 600.000 00	600.001 00 a 800.000 00	> 800.001 00
Otimista	km ²	69.33	41.96	74.03	5.36	2.17	0.15
	m ³	38.13 mi	23.07 mi	39.96 mi	2.94 mi	1.94 mi	0.08 mi
	%	36.68%	36.05%	53.57%	81.58%	83.14%	68.18
Pessimista	km ²	97.70	57.94	89.20	5.64	2.37	0.15
	m ³	79.71 mi	47.51 mi	73.14 mi	4.62 mi	1.94 mi	1.23 mi
	%	51.69%	49.40%	64.97%	85.84%	90.80%	68.18
Área de cada Setor Censitário (km²)		189.02	116.39	138.19	6.57	2.61	0.22

Como consequência da elevação do NGMM até 2100, São João da Barra pode perder mais da metade de sua área territorial. Apesar de na presente pesquisa ter sido feita a sobreposição das cotas de inundação às cotas altimétricas do município, não foram consideradas as interações entre água e fatores biofísicos (e.g. tipo de sedimento, solo, estruturas rígidas), bem como os efeitos da água através dos corpos hídricos (e.g. Lagoas de Grussaí e Iquipari). Importante ressaltar que, extensões de áreas consideráveis do Porto do Açu e da RPPN Caruara ficarão inundadas, e caso não sejam tomadas ações imediatas para impedir esse cenário haverá uma grande perda econômica e ambiental para o município. Nos mapas de suscetibilidade as regiões mais afetadas economicamente são aquelas onde vivem os agricultores familiares, grupo social já afetado pelos processos de desapropriações de terras (para implantação do Porto do Açu) e pela salinização de águas doce (obtidas em poços artesianos e no Canal de Quitingute utilizadas para irrigação de suas lavouras) e de solos ocorrida a partir do transbordo de água salgada depositada no aterro portuário na construção do canal de navegação.

Ainda não existem no Brasil planos estratégicos voltados à mitigação e adaptação de cidades costeiras às inundações associadas às MCG, aumentando assim a vulnerabilidade socioambiental e econômica dessas regiões litorâneas diante destes cenários futuros (Sathler *et al.*, 2018). E São João da Barra devido às suas configurações geológicas e ambientais (e.g. baixa altitude, ZC exposta à dinâmica oceânica, processos erosivos, ecossistemas sensíveis como mangues, brejos e restingas) e por não possuir tais planos estratégicos, é uma destas regiões altamente vulneráveis à elevação do NGMM. Apesar dessa lacuna, diversos estudos vêm sendo realizados nas últimas décadas sobre o tema.

Montanari (2015) ao avaliar os impactos econômicos do aumento do NGMM no município de Florianópolis/SC estimou prejuízos de 63 bilhões de reais e perdas de 31 mil postos de trabalhos, a partir do cenário “pessimista” do IPCC para o ano de 2100 (i.e. elevação de 1 m). Alcoforado (2017), também utilizando os cenários do IPCC, identificou para o ano de 2100 uma inundação entre 274 e 291 km² da planície estuarina do Rio Piranhas-Açu no Estado do Rio Grande do Norte. E assim como em São João da Barra, Braun e Aumond (2021) verificaram que na cidade de Joinville/SC, as localidades mais impactadas pela elevação do NGMM são as áreas urbanas, rurais e ecossistema de mangues. Silva *et al.* (2020), além de utilizarem como cotas de inundação as projeções do IPCC também introduziram as oscilações da maré astronômica e de ondas por galgamento

como variáveis adicionais à simulação de elevação extrema do NGMM nas cidades de Imbé e Tramandaí, no litoral norte do Rio Grande do Sul. Os autores observaram que uma variação de inundação entre 60 (para cota de subida de nível de 2.07 m) e 90% (para cota de 4.3 m) da área territorial dessas cidades. Marengo *et al.* (2010) apontam que outras cidades brasileiras de médio e grande porte, como Rio de Janeiro/RJ, Santos/SP, Recife/PE, Vitória/ES, Paranaguá/PR, Maceió/AL, Salvador/BA, Belém/PA, Fortaleza/CE e São Luis/MA já sofrem com a elevação do NGMM. Rosman *et al.* (2007) também incluiu outros cenários associados a eventos extremos (e.g. ciclones extratropicais sobre a costa, chuvas intensas e ações de ondas) e identificou que as zonas potencialmente inundáveis em função da elevação do NGMM estimados pelo IPCC entre 0.23 e 0.58 m para os próximos 100 anos seriam Rio de Janeiro, Recife, Salvador, Fortaleza, Vitória e Porto Alegre. Estes dados foram corroborados no primeiro relatório da Avaliação Nacional sobre MCG cujas projeções indicam inundações costeiras mais preocupantes no litoral do Nordeste, Sul e Sudeste (PBMC, 2014).

Apesar de ser uma alternativa simples e amplamente utilizada na identificação e mapeamento de áreas costeiras inundadas, o modelo utilizado no presente trabalho apresenta algumas limitações (Schimid *et al.*, 2014) e exige certas precauções quanto aos resultados gerados. Devido ao fato de ser uma abordagem estática, que não considera a direção do fluxo de água, o modelo *bathtub* assume que os efeitos da inundação são instantâneos (Paprotny e Terefenko, 2017). Desta forma, uma de suas desvantagens comparada a outras metodologias, tais como as modelagens hidrodinâmica e hidráulica, é justamente a não inclusão da conectividade hidráulica, já que apenas os valores de cota altimétrica são tomados de referência (Gallien *et al.*, 2014). Neste caso, o deslocamento do fluxo entre as células não é previsto, mas sim uma distribuição uniforme da água nas cotas inferiores ao nível de referência. Poppenga e Worstell (2015) enfatizaram que a ausência dessa conectividade pode excluir áreas potencialmente sujeitas à inundações, criando áreas desconectadas e subestimando o valor inundável. Além disso, barreiras topográficas que podem restringir o fluxo de água e a dinâmica costeira (e.g. ondas, marés, ondas de tempestades, mudança na circulação oceânica que podem aumentar o NGMM) também não são levadas em consideração (Seenath *et al.*, 2016). Segundo Sanders (2017) e Vousdoukas *et al.* (2016), diferentemente da abordagem hidrodinâmica, o modelo estático pode superestimar as consequências das inundações, uma vez que também não leva

em consideração as defesas contra inundações e o papel da fricção, inércia e armazenamento na dinâmica de inundações. No entanto, esse método de avaliação possui vantagens ao facilitar a identificação visual de áreas mais suscetíveis as inundações diretamente da elevação do NGMM, fornecendo uma projeção do cenário mais favorável (Seenath *et al.*, 2016). Frequentemente, a representação de áreas inundáveis em estudos feitos em regiões costeiras ocorre em forma de linhas ou faixas. Apesar de no presente artigo o procedimento metodológico considerar linhas e não células individuais, essas linhas não percorreram o território sanjoanense de forma ampla. Consequentemente, houve a formação de linhas circulares em pontos bem específicos e, após a inclusão do *buffer*, as áreas inundáveis apresentaram uma abrangência circular.

Os resultados obtidos mostram que em São João da Barra, os possíveis impactos da elevação do NGMM seriam: (i) alterações na qualidade da água de aquíferos, estuários e lagoas; (ii) estabelecimento de processos erosivos e/ou variação da intensidade erosiva que já ocorre em Atafona e na Praia do Açú; e (iii) perdas econômicas devido a inundações das áreas do Porto do Açú, áreas urbanas e áreas agropecuárias do município. Diante deste cenário, algumas medidas podem ser adotadas para tanto reduzir os riscos e consequências de extremos climáticos quanto adquirir e melhorar aspectos de adaptação, aprendizagem e resiliência do meio ambiente e dos grupos sociais afetados, dentre elas: (i) implementação de GC integrada entre Estado, município e Porto do Açú; (ii) desenvolvimento de infraestrutura urbana (*e.g.* sistemas de informação e prevenção de ressacas, monitoramento costeiro, adequação do zoneamento do PD e definição de áreas inaptas para edificação, construção de diques e barreiras artificiais); (iii) gestão integrada dos recursos naturais (*e.g.* bacia hidrográfica, ZC); e (iv) adoção de políticas preventivas e reativas e medidas de mitigação.

A literatura científica aponta que a elevação do NGMM não será abrupta, e sim, ocorrerá de modo paulatino (Cazenave *et al.*, 2014; Rasmussen *et al.*, 2018; Voudoukas *et al.*, 2018). Do mesmo modo, os cenários de inundações do IPCC não consideram flutuações de marés, fato que pode aumentar a amplitude e energia deste evento com as MCG. Portanto, a cada década a possibilidade é que as inundações temporárias e/ou permanentes atingirão um maior número de pessoas e cidades costeiras (Nicholls e Cazenave, 2014). Por isso, deve-se considerar que os resultados obtidos neste estudo podem ser ainda mais significativos.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que (i) devido às suas configurações geológicas e ambientais (baixa altitude, exposição à dinâmica oceânica, processos erosivos e ecossistemas sensíveis), a ZC são-joanense é vulnerável a eventos climáticos extremos associados à elevação do NGMM; (ii) o agravamento decorrente da inundações terá reflexos sobre áreas de baixa altitude urbanas e rurais e em ecossistemas naturais; (iii) como consequência desta elevação, até 2100 o município de São João da Barra poderá ter mais da metade de sua área territorial ocupada pelo mar; e (iv) caso não sejam tomadas ações de contingenciamento, o resultado será a ocorrência de grandes perdas econômicas e ambientais.

Finalmente, esta pesquisa contribui para um maior conhecimento do processo de intrusão marinha em áreas continentais que deverão ocorrer em função das MCG, oferecendo ainda prognósticos de cenários futuros com identificação dos impactos socioambientais e econômicos associado. Estes cenários poderão subsidiar decisões e auxiliar gestores públicos e de empreendimentos portuários marinhos os espaços costeiros à luz das transformações que serão causadas pela elevação do NGMM decorrentes das MCG.

REFERÊNCIAS

- Alcoforado, A. V. C. (2017). Índice de vulnerabilidade costeiro e risco de inundações em cenários de mudanças climáticas no estuário do Rio Piranhas-Açu com utilização de imagens de sensores. 107 p., Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- Becker, A. H.; Acciaro, M.; Asariotis, R.; Cabrera, E. A. (2013). Note on climate change adaptation for seaports: a challenge for global ports, a challenge for global society. *Climatic Change*, 120: 683. <http://doi.org/10.1007/s10584-013-0843-z>
- Braun, S.; Aumond, J. J. (2021). Simulação de elevação do nível do mar na cidade de Joinville (SC). In: Arquitetura e urbanismo: patrimônio, sustentabilidade e tecnologia. Atena Editora (org. MIGLIORINI, J. M.). Capítulo 13: 186-198. <http://doi.org/10.22533/at.ed.18321120513>
- Cazenave, A.; Dieng, H. B.; Meyssignac, B.; Von Schuckmann, K.; Decharme, B.; Berthier, E. (2014). The rate of sea-level rise. *Nature Climate Change*, 4(5): 358-361. <http://doi.org/10.1038/nclimate2159>
- Christodoulou, A.; Christidis, P.; Demirel, H. (2019). Aumento do nível do mar nos portos: um enfoque mais amplo nos impactos. *Maritime*

- Economics & Logistics*, 21 (4): 482-496. <https://doi.org/10.1057/s41278-018-0114-z>
- Companhia de Pesquisa de Recursos Mineirais - CRM. Carta de Suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação do município de São João da Barra. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21676>> acesso em: 20 jan. 2021.
- D'almeida, M. R.; Costa, L. F. (2011). Uma revisão crítica sobre cidades e mudança climática: vinho velho em garrafa nova ou um novo paradigma de ação para a governança local? *Revista de Administração Pública*, 45(3): 611-641. <http://doi.org/10.1590/S0034-76122011000300004>
- Dottori, F.; Martina, M. L. V.; Figueiredo, R. (2018). A methodology for flood susceptibility and vulnerability analysis in complex flood scenarios. *Journal of Flood Risk Management*, 11: 632-645, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12234>
- Ecologus Engenharia Consultiva. (2011). Relatório de Impacto Ambiental - RIMA. Infraestruturas do Distrito Industrial de São João da Barra, 124p.
- Ellison, J. C.; Stoddart, D. R. (1991). Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: Holocene analogues and implications. *Journal of Coastal Research*, 7(1): 151-165. <http://www.jstor.org/stable/4297812>
- Field, C. D. (1995). Impact of expected climate-change on mangroves. *Hidrobiologia*, 295: 75-81. http://doi.org/10.1007/978-94-011-0289-6_10
- Füssel, H. M. (2017). Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17: 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002>
- Gallien, T. W.; Sanders, B.; Flick, R. (2014). Urban coastal flood prediction: Integrating wave overtopping, flood defenses and drainage. *Coastal Engineering*, 91: 18-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.04.007>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2020) Pesquisa de Informações Básicas Municipais - MUNIC. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/brasil/pesquisa/1/74454?ano=2018>> Acesso em: 13 nov 2020.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2021). Setores censitários do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios__divisoes_intramunicipais/2020/Malha_de_setores_\(kml\)_por_municipios](http://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios__divisoes_intramunicipais/2020/Malha_de_setores_(kml)_por_municipios)> Acesso em: 20 fev. 2021.
- Instituto Estadual do Ambiente - INEA. (2021). Hidrografia. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/geoineamunicipios>> Acesso em: 02 fev. 2021
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. (2021). Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>> Acesso em: 02 fev. 2021.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2014). Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core writing team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. 151 p., Geneva, Switzerland.
- Marengo, J. A.; Schaeffer, R.; Zee, D. M. W.; Pinto, H. S. (2010). Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. 76p., Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável - FBDS, Rio de Janeiro, Brasil
- Montanari, F. (2015). Estimativa dos impactos econômicos do aumento do nível médio do mar no município de Florianópolis/SC para o ano de 2100. 125 p., Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- Moreira, H. M. (2013). A Formação da Nova Geopolítica das Mudanças Climáticas. *Sustentabilidade em Debate*, 4(1): 275-292.
- Muehe, D. (2001). Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gerenciamento. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2(1):35-44. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v2i1.6>
- Nicholls, R.; Cazenave, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, 328(5985): 1517-1520. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1185782>
- Ojwang, L.; Rosendo, S.; Celliers, L.; Obura, D.; Mui, A.; Kamula, J.; Mwangi, M. (2017). Assessment of Coastal Governance for Climate Change Adaptation in Kenya. *Earth-s Future*, 5(11): 1119-1132. <http://doi.org/10.1002/2017EF000595>
- Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC. (2014). Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. 464 p., COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Paprotny, D.; Terefenko, P. (2017). New estimates of potential impacts of sea level rise and coastal floods in Poland. *Natural Hazards*, 85(2): 1249-1277. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2619-z>
- Pezzoli, A.; Alfredini, P. (2013). Impacts of Climate Changes on Management Policy of the Harbors, Land Areas and Wetlands in the Sao Paulo State Coastline (Brazil). *Journal of Climatology & Weather Forecasting*, 1(2): 1-7. <http://doi.org/10.4172/2332-2594.1000101>
- Polette, M.; Lins-De-Barros, F. (2012). Os desafios urbanos na zona costeira brasileira frente às mudanças climáticas. *Revista Iberoamericana de Manejo Costero Integrado - COSTAS*, 1(1): 165-180. ISSN 2304-0963

- Prefeitura Municipal de São João da Barra. (2021). Disponível em: <www.sjb.rj.gov.br> acesso em: 29 jan. 2021.
- Poppenga, S.; Worstell, B. (2015). Evaluation of airborne Lidar elevation surfaces for propagation of coastal inundation: the importance of hydrologic connectivity. *Remote Sensing*, 7(9): 11695-11711. <https://doi.org/10.3390/rs70911695>
- Rasmussen, D. J.; Bittermann, K.; Buchanan, M. K.; Kulp, S.; Strauss, B. H.; Kopp, R. E.; Oppenheimer, M. (2018). Extreme sea level implications of 1.5 °C, 2.0 °C, and 2.5 °C temperature stabilization targets in the 21st and 22nd centuries. *Environmental Research Letters*, 13(1): 1-12. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/aaac87>
- Rosman, P. C. C.; Neves, C. F.; Muehe, D. E.; Valentini, M. (2007). Estudo de Vulnerabilidades no Litoral do Estado do Rio de Janeiro devido às Mudanças Climáticas. 100 p., Relatório PENO-9501. Fundação Coppetec, Rio de Janeiro, Brasil.
- Sanders, B. F. (2017). Hydrodynamic modeling of urban flood flows and disaster risk reduction. In: Oxford research encyclopedia of natural hazard science. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.127>
- Sathler, D.; Paiva, J. C.; Batista, S. (2018). Mudanças Climáticas: planejamento urbano e governança ambiental nas sedes das principais regiões metropolitanas e integradas de desenvolvimento do Brasil. *Caderno de Geografia*, 29(56): 262-286. <http://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2019v29n56p262>
- Schlüter, A.; Assche, K. A.; Hornidge, A. K.; Văidianu, N. (2020). Land-sea interactions and coastal development: An evolutionary governance perspective. *Marine Policy*, 112. <http://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103801>
- Schmid, K.; Hadley, B.; Waters, K. (2014). Mapping and portraying inundation uncertainty of bathtub-type models. *Journal of Coastal Research*, 30 (3): 548-561. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00118.1>
- Schröter, K.; Lüdtke, S.; Redweik, R.; Meier, J.; Bochow, M.; Ross, L. (2018). Flood loss estimation using 3D city models and remote sensing data. *Environmental Modelling and Software*, 105(1): 118-131. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.032>
- Seenath, A.; Wilson, M.; Miller, K. (2016). Hydrodynamic versus GIS modelling for coastal flood vulnerability assessment: Which is better for guiding coastal management? *Ocean and Coastal Management*, 120: p. 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.019>
- Silva, A. F. Da.; Toldo Junior, E. E.; Van Rooijen, A.; Abreu, C. F.; Rodrigues Filho, J. L.; Rocha, R. Dos S.; Aquino, R. Dos S. (2020). Inundação costeira por elevação do nível do mar em Imbé e Tramandaí - RS. *Revista Brasileira de Cartografia*, 72(3): 541-557. <http://orcid.org/0000-0002-4549-4265>
- Stainforth, D. A.; Aina, T.; Christensen, C.; Collins, M.; Faull, N.; Frame, D. J. (2005). Uncertainty in predictions of the climate response to rising level of greenhouse gases. *Nature*, 433: 403-406. <http://doi.org/10.1038/nature03301>
- Stocker, T. F.; Qin, D. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. 3-29, Cambridge (UK): Cambridge University Press, England.
- Vousdoukas, M. I.; Voukouvalas, E.; Mentaschi, L. Dottori, F.; Giardino, A.; Bouziotas, D.; Bianchi, A.; Salamon, P.; Feyen, L. (2016). Developments in large-scale coastal flood hazard mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(8): 1841-1853. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1841-2016>
- Vousdoukas, M. I.; Mentaschi, L.; Voukouvalas, E.; Verlaan, M.; Jevrejeva, S.; Jackson, L. P.; Feyen, L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications*, 9(1): 1-12. <http://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w>