

Impactos Das Mudanças Climáticas Na Bacia Hidrográfica Do Itaqui: Avaliação Do Aumento Do Nível Do Mar

Ana Carolina Coutinho Carvalho

Universidade Federal Do Maranhão

Taíssa Caroline Silva Rodrigues

Faculdade Estadual Da Região Tocantina Do Maranhão

Resumo

O artigo aborda os impactos das mudanças climáticas na Bacia Hidrográfica do Itaqui, localizada em São Luís-MA, com ênfase no aumento do nível do mar e nas consequências decorrentes desse fenômeno. A pesquisa utilizou o modelo BR-Mangue para simular cenários futuros de elevação do nível do mar, considerando as projeções estabelecidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) até o ano de 2100. Foram analisados cinco cenários distintos de emissões de gases de efeito estufa, cada um com uma elevação projetada do nível do mar, variando entre 0,3 metros e 1,1 metros. Os resultados indicam que o aumento do nível do mar pode ter sérios impactos sobre a infraestrutura portuária, especialmente no Complexo Portuário do Itaqui, uma das principais infraestruturas da região. Além disso, o ecossistema local, composto por áreas de mangue e zonas costeiras, também estaria ameaçado por processos de erosão e intrusão salina. As comunidades que vivem próximas à bacia, muitas das quais dependem das atividades portuárias e da pesca, também seriam severamente afetadas, sendo necessário o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação. A metodologia empregada na pesquisa inclui uma análise geoespacial detalhada, que utiliza ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), combinada com modelagem baseada em autômatos celulares. Essa abordagem permite uma simulação dinâmica e abrangente dos possíveis impactos da elevação do nível do mar sobre a bacia. Este estudo oferece uma contribuição significativa para a compreensão dos desafios que áreas costeiras como a Bacia do Itaqui enfrentam devido às mudanças climáticas. Ao identificar os riscos potenciais e seus impactos, o estudo fornece subsídios essenciais para a implementação de políticas públicas e estratégias de planejamento urbano e ambiental voltadas para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Nível do Mar, Bacia Hidrográfica do Itaqui, BR-Mangue, Infraestrutura Portuária.

Date of Submission: 08-10-2024

Date of Acceptance: 18-10-2024

I. Introdução

As mudanças climáticas têm sido amplamente estudadas e discutidas no cenário científico global, sendo seus impactos em ecossistemas costeiros e áreas urbanas vulneráveis um foco central dessas análises. Uma das consequências mais preocupantes do aquecimento global é a elevação do nível do mar, que intensifica os riscos de inundações, erosão costeira e intrusão salina em áreas próximas a corpos d'água (KIRBY, 2020; SMITH, 2019). A Bacia Hidrográfica do Itaqui, localizada no município de São Luís-MA, é uma dessas regiões que enfrenta riscos significativos devido à sua proximidade com o Complexo Portuário do Itaqui, uma das principais infraestruturas portuárias do Brasil (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) tem alertado para os impactos crescentes das mudanças climáticas, especialmente nas regiões costeiras. Segundo os relatórios mais recentes do IPCC (2022), as projeções indicam um aumento significativo no nível do mar até o final do século XXI, o que pode comprometer áreas portuárias e atividades econômicas nelas estabelecidas (IPCC, 2022; SANTOS, 2020). Esses efeitos tornam-se ainda mais graves em regiões que possuem infraestrutura crítica, como o Porto do Itaqui, localizado na Baía de São Marcos, uma área altamente exposta aos efeitos das marés e à elevação dos oceanos (BEZERRA, 2014; SANTOS, 2020).

Este estudo tem como objetivo analisar os impactos do aumento do nível do mar na Bacia Hidrográfica do Itaqui, com foco na simulação de cenários climáticos recentes utilizando o modelo BR-Mangue. Este modelo permite a simulação de diversos cenários de elevação do nível do mar com base em dados de uso e cobertura da terra, altimetria e características geofísicas da bacia (BEZERRA, 2014; KIRBY, 2020). A pesquisa visa fornecer uma avaliação detalhada das implicações da elevação do nível do mar na infraestrutura portuária e nas

comunidades locais, além de propor estratégias de adaptação e mitigação para esses impactos (IPCC, 2022; GOMES, 2021).

A importância deste estudo está relacionada à necessidade de compreender os impactos locais das mudanças climáticas e fornecer subsídios para o planejamento estratégico e a tomada de decisões em longo prazo (SMITH, 2019; SANTOS, 2020). Com base nos cenários definidos pelo IPCC, este estudo analisa as possíveis variações no nível do mar e suas consequências na Bacia do Itaqui, uma região de grande importância econômica para o Brasil (BEZERRA, 2014; KIRBY, 2020). A pesquisa preenche uma lacuna significativa no conhecimento dos impactos climáticos em áreas portuárias, especialmente aquelas sensíveis a variações ambientais e climáticas (GOMES, 2021; SANTOS, 2020).

A Bacia Hidrográfica do Itaqui desempenha um papel crucial na economia regional e nacional, principalmente devido à presença do Complexo Portuário do Itaqui, que é uma das maiores estruturas portuárias do Brasil (IPCC, 2022; GOMES, 2021). Com a elevação do nível do mar projetada para as próximas décadas, o porto e a região adjacente enfrentam sérios riscos de inundações, erosão costeira e perda de áreas produtivas (BEZERRA, 2014; SMITH, 2019). Além disso, as comunidades locais que dependem das atividades portuárias e da pesca poderão sofrer os impactos socioeconômicos resultantes das mudanças ambientais (GOMES, 2021; KIRBY, 2020).

Os cenários projetados pelo IPCC indicam variações significativas no nível do mar, que podem oscilar entre 0,3 metros a 1,1 metros até o final do século XXI, dependendo dos níveis de emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2022; SANTOS, 2020). No cenário mais otimista, as elevações moderadas poderiam ser contidas por meio de estratégias de adaptação baseadas na infraestrutura natural, como a preservação dos manguezais, que desempenham um papel essencial na proteção costeira (BEZERRA, 2014; SMITH, 2019). No entanto, em cenários mais críticos, com aumentos de até 1,1 metros, seriam necessárias intervenções mais robustas, como diques artificiais e sistemas de drenagem aprimorados, para mitigar os impactos (KIRBY, 2020; GOMES, 2021).

O modelo BR-Mangue, utilizado nesta pesquisa, é uma ferramenta eficaz para simular as interações entre o aumento do nível do mar e as condições geofísicas das regiões costeiras, especialmente em áreas de mangue (BEZERRA, 2014; SANTOS, 2020). Ao integrar dados de uso da terra, altimetria e características do solo, o modelo permite prever como as mudanças climáticas afetarão o equilíbrio ambiental e socioeconômico da região (GOMES, 2021; SMITH, 2019). Isso possibilita a identificação das áreas mais vulneráveis e o planejamento de estratégias de adaptação de maneira mais precisa (BEZERRA, 2014; KIRBY, 2020).

Além dos impactos diretos na infraestrutura e nos ecossistemas, a intrusão salina é outro problema crítico associado ao aumento do nível do mar (IPCC, 2022; GOMES, 2021). A salinização dos aquíferos subterrâneos pode comprometer o abastecimento de água potável para as comunidades locais e afetar as atividades agrícolas, exacerbando os desafios sociais e econômicos enfrentados pela região (BEZERRA, 2014; SMITH, 2019). Portanto, é fundamental que as estratégias de adaptação incluam medidas para proteger os recursos hídricos e garantir a sustentabilidade das atividades humanas na região (KIRBY, 2020; SANTOS, 2020).

As áreas de manguezal da Bacia do Itaqui são particularmente importantes para a preservação ambiental, já que atuam como barreiras naturais contra a erosão costeira e são habitats cruciais para várias espécies endêmicas (BEZERRA, 2014; SMITH, 2019). No entanto, com a elevação do nível do mar, essas áreas estão em risco de serem permanentemente submersas, o que poderia causar uma perda significativa de biodiversidade e alterar o equilíbrio ecológico da região (KIRBY, 2020; GOMES, 2021). A preservação desses ecossistemas é, portanto, uma prioridade nas estratégias de mitigação (BEZERRA, 2014; SANTOS, 2020).

A presente pesquisa contribui para o debate sobre os impactos das mudanças climáticas em áreas costeiras e oferece subsídios importantes para o desenvolvimento de políticas públicas que visem a adaptação e a mitigação desses impactos (IPCC, 2022; SMITH, 2019). A implementação de medidas de proteção para a Bacia do Itaqui, como a construção de infraestrutura resiliente e a restauração de ecossistemas, é fundamental para reduzir os riscos futuros (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021). Além disso, a cooperação internacional para a redução das emissões de gases de efeito estufa é crucial para evitar que os cenários mais críticos se concretizem (KIRBY, 2020; SANTOS, 2020).

Portanto, a adaptação às mudanças climáticas na Bacia do Itaqui deve envolver tanto soluções baseadas na infraestrutura natural quanto a implementação de tecnologias de engenharia avançadas para proteger as áreas vulneráveis (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021). A combinação dessas abordagens permitirá uma resposta mais eficaz às ameaças que a elevação do nível do mar representa, garantindo a sustentabilidade econômica e ecológica da região no longo prazo (KIRBY, 2020; SANTOS, 2020).

II. Metodologia

A presente pesquisa utiliza uma abordagem baseada em modelagem computacional para analisar os impactos do aumento do nível do mar na Bacia Hidrográfica do Itaqui, localizada em São Luís-MA. A escolha do modelo BR-Mangue, desenvolvido por Bezerra (2014), foi motivada pela sua capacidade de simular diferentes cenários de elevação do nível do mar até o ano de 2100, com alta precisão em áreas costeiras e manguezais

(BEZERRA, 2014; GOMES, 2021). Esse modelo utiliza celulares automáticos para calcular as mudanças nos padrões costeiros, o que o torna particularmente adequado para estudos de longo prazo em regiões sensíveis às variações climáticas (SANTOS, 2020; IPCC, 2022). A combinação de modelagem computacional com dados espaciais permitiu uma análise robusta e detalhada dos impactos potenciais na Bacia do Itaqui, ampliando o entendimento sobre os riscos associados à elevação do nível do mar (BEZERRA, 2014; SMITH, 2019).

O BR-Mangue foi integrado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitindo uma análise espacial específica da área de estudo. Através dessa integração, foram utilizados dados variados e raster da Bacia Hidrográfica do Itaqui, fornecidos por fontes renomadas como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o MApBiomias Brasil (INPE, 2021; GOMES, 2021). Esses dados detalhados permitiram mapear os limites da bacia e sua configuração geral, enquanto os dados raster, como os Modelos Digitais de Elevação (MDE), possibilitaram uma avaliação detalhada das variações topográficas e da altimetria da área (BEZERRA, 2014; SANTOS, 2020). A combinação desses dois tipos de dados resultou em uma base sólida para a simulação dos cenários de elevação do nível do mar, fundamental para a precisão dos resultados obtidos (INPE, 2021; GOMES, 2021).

A modelagem foi baseada em cinco cenários distintos de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), conforme projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Cada cenário representa uma estimativa de elevação do nível do mar, variando entre 0,3 metros e 1,1 metros, de acordo com as diferentes trajetórias socioeconômicas descritas pelo IPCC (IPCC, 2022; SMITH, 2019). Essas propostas foram cuidadosamente escolhidas para cobrir uma ampla gama de possíveis variações climáticas, permitindo que fossem avaliados os impactos tanto em propostas mais otimistas quanto em projeções mais severas (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). O uso de múltiplos cenários proporcionou uma visão completa dos possíveis efeitos das mudanças climáticas na Bacia do Itaqui e nas áreas adjacentes, particularmente na infraestrutura portuária (IPCC, 2022; SANTOS, 2020).

As etapas de simulação incluíram uma divisão da bacia em células de 100 x 100 metros, cada uma representando uma unidade de análise espacial. Essas células foram definidas com atributos específicos, como uso e cobertura do solo, elevação e profundidade com a área de influência das marés (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021). À medida que o nível do mar aumentava em cada um dos cenários simulados, o modelo BR-Mangue calculava o impacto desse aumento em cada célula, permitindo a visualização detalhada das áreas mais vulneráveis à inundação e à erosão devastadora (SANTOS, 2020; SMITH, 2019). Essa abordagem baseada em celulares automáticos é amplamente utilizada em modelagem climática devido à sua capacidade de representar dinamicamente as interações entre variáveis ambientais e geográficas (BEZERRA, 2014; IPCC, 2022).

Para garantir a precisão dos resultados, foi adotado um processo de meta-análise que envolveu uma revisão de estudos anteriores sobre o uso do BR-Mangue em diferentes regiões regionais do Brasil. Essa meta-análise permitiu validar as capacidades preditivas do modelo e ajustar os parâmetros de entrada com base nas características específicas da Bacia do Itaqui (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). Além disso, as simulações comparadas com estudos de caso semelhantes em outras regiões costeiras, passam a validar a aplicabilidade do modelo na área de estudo (SANTOS, 2020; SMITH, 2019). Esse processo de revisão e comparação garantiu que os resultados obtidos não foram apenas precisos, mas também consistentes com a literatura científica existente (BEZERRA, 2014; IPCC, 2022).

As projeções de elevação do nível do mar foram calculadas com base nos cenários SSPs (Shared Socioeconomic Pathways) fornecidos pelo IPCC. Essas perspectivas, que incluem diferentes trajetórias de desenvolvimento socioeconômico, permitem avaliar como as variações no comportamento humano e nas políticas climáticas podem afetar os níveis futuros de emissões de GEE e, conseqüentemente, o nível do mar (IPCC, 2022; SMITH, 2019). A combinação desses cenários com o modelo BR-Mangue foi realizada em projeções robustas para a Bacia do Itaqui, abrangendo uma ampla gama de possíveis futuros climáticos e seus impactos na região (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021).

Uma das principais vantagens dessa abordagem metodológica é a capacidade de não apenas visualizar os impactos potenciais do aumento do nível do mar, mas também fornecer uma análise detalhada das possíveis conseqüências para a infraestrutura e a economia local. O uso de modelagem computacional permite uma simulação dinâmica dos cenários, possibilitando uma melhor compreensão dos riscos associados à elevação do nível do mar na Bacia do Itaqui (SANTOS, 2020; GOMES, 2021). A capacidade de mapear as áreas mais vulneráveis permite que os planejadores urbanos e gestores ambientais identifiquem onde as intervenções são mais fáceis, otimizando os recursos destinados à adaptação às mudanças climáticas (IPCC, 2022; SMITH, 2019).

Ao final das simulações, os resultados foram discutidos à luz das principais estratégias de adaptação e mitigação recomendadas para áreas vulneráveis. Uma das lições mais importantes é a necessidade de adotar uma abordagem integrada para lidar com os impactos das mudanças climáticas na Bacia do Itaqui (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). As estratégias recomendadas incluem tanto soluções baseadas em infraestrutura, como a construção de diques e barreiras físicas, quanto abordagens baseadas na natureza, como a restauração de manguezais e outras formas de paisagens costeiras (SANTOS, 2020; SMITH, 2019). A combinação dessas

estratégias é essencial para garantir a resiliência da região diante dos impactos previstos (IPCC, 2022; BEZERRA, 2014).

Além disso, o estudo destaca a importância da cooperação internacional na mitigação das mudanças climáticas globais. As políticas climáticas impostas por diferentes países terão um impacto significativo nos níveis futuros de emissões de GEE e, portanto, na magnitude da elevação do nível do mar (IPCC, 2022; SANTOS, 2020). Para minimizar os impactos mais severos, é essencial que os países trabalhem juntos para reduzir suas emissões e adotar práticas mais sustentáveis (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021). Sem essa cooperação, os cenários mais pessimistas de elevação do nível do mar podem se concretizar, causando danos irreparáveis às áreas geográficas vulneráveis, como a Bacia do Itaqui (IPCC, 2022; SMITH, 2019).

Dessa forma, a modelagem computacional aplicada neste estudo fornece uma visão clara dos desafios que a Bacia do Itaqui enfrentará nas próximas décadas, à medida que o nível do mar continua a subir. Ao integrar dados espaciais detalhados com cenários climáticos robustos, o modelo BR-Mangue oferece uma ferramenta valiosa para o planejamento estratégico e a tomada de decisões em longo prazo (BEZERRA, 2014; IPCC, 2022). A aplicação dessa tecnologia em áreas vulneráveis, como a Bacia do Itaqui, demonstra o potencial de modelagem computacional para informar políticas públicas e estratégias de mitigação eficazes (SANTOS, 2020; GOMES, 2021).

Em conclusão, a metodologia utilizada nesta pesquisa oferece uma abordagem inovadora para a análise dos impactos das mudanças climáticas em regiões costeiras, permitindo que sejam integradas soluções e estratégias integradas para mitigar os efeitos da elevação do nível do mar (IPCC, 2022; SMITH, 2019). A Bacia do Itaqui, com sua importância estratégica para o Brasil, requer atenção especial para garantir que suas comunidades, infraestrutura e ecossistemas sejam protegidos dos efeitos devastadores das mudanças climáticas (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021). Com base nos resultados deste estudo, é possível concluir que ações imediatas e coordenadas são essenciais para evitar os piores cenários e garantir um futuro sustentável para a região (SANTOS, 2019; IPCC)..

III. Resultado

A aplicação do modelo BR-Mangue para a Bacia Hidrográfica do Itaqui gerou resultados significativos no que tange à projeção dos impactos da elevação do nível do mar. Com base nos cinco cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE) propostos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), foi possível visualizar uma variação na elevação do nível do mar entre 0,3 metros e 1,1 metros até o ano de 2100 (IPCC, 2022; SANTOS, 2019). Essas elevações podem causar diferentes tipos de impactos nas áreas adjacentes à Bacia do Itaqui, especialmente no Complexo Portuário, que desempenha um papel estratégico na economia local e nacional (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). O modelo BR-Mangue permitiu uma análise detalhada desses cenários, destacando as principais áreas vulneráveis e os impactos projetados.

No cenário mais otimista, **SSP1-1.9**, que prevê uma elevação de 0,3 metros até 2100, observou-se um impacto limitado à região de várzea da bacia (IPCC, 2022; BEZERRA, 2014). Embora esse cenário represente um risco relativamente baixo em comparação com outros, áreas próximas ao Porto do Itaqui poderiam sofrer inundações temporárias durante períodos de maré alta, afetando o acesso e a operação portuária em momentos de pico (GOMES, 2021; SANTOS, 2019). Além disso, o ecossistema local, composto por manguezais, poderia ser afetado pelo aumento da salinidade e pela alteração no fluxo das marés, com possíveis implicações para a biodiversidade e a pesca local (BEZERRA, 2014; SMITH, 2019).

Já no cenário intermediário, **SSP2-4.5**, com uma elevação projetada de 0,7 metros, as simulações indicam que a infraestrutura do Porto do Itaqui começaria a sofrer impactos mais severos (IPCC, 2022; SANTOS, 2019). A elevação contínua do nível do mar resultaria em uma maior vulnerabilidade às inundações, afetando áreas utilizadas para armazenamento de mercadorias e pátios de transporte (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). O impacto sobre o ecossistema costeiro da Bacia do Itaqui também seria considerável, com a erosão das margens e a perda gradual de habitat de espécies nativas, já que os manguezais começariam a recuar devido à invasão das águas marinhas (SANTOS, 2019; SMITH, 2019). Esses manguezais desempenham um papel crucial na proteção costeira e na manutenção da biodiversidade local, e sua degradação poderia agravar os efeitos das mudanças climáticas (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014).

No cenário mais pessimista, **SSP5-8.5**, que projeta uma elevação de até 1,1 metros, os impactos se tornam ainda mais graves, representando a maior ameaça à região (IPCC, 2022; SMITH, 2019). Com esse nível de aumento do mar, as simulações mostram uma inundação significativa de parte da infraestrutura portuária, comprometendo seriamente as operações do Porto do Itaqui (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). A inundação permanente de áreas industriais e comerciais próximas ao porto também poderia ocorrer, o que afetaria a economia regional, com a possível interrupção das atividades logísticas e comerciais (SANTOS, 2019; IPCC, 2022). Além disso, áreas residenciais próximas à bacia também estariam em risco, particularmente em bairros mais vulneráveis economicamente, onde a infraestrutura já é limitada (SMITH, 2019; BEZERRA, 2014).

Além disso, o modelo BR-Mangue indicou que, em todos os cenários, o avanço do mar causaria uma pressão significativa sobre os ecossistemas de mangue da Bacia do Itaqui, que desempenham um papel crucial na proteção costeira e na manutenção da biodiversidade local (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021). A redução dessas áreas, devido à elevação do nível do mar, poderia levar a desequilíbrios ecológicos, como a perda de espécies endêmicas e a diminuição da capacidade de retenção de carbono dos manguezais, o que agravaria os impactos ambientais regionais (SANTOS, 2019; SMITH, 2019). Os manguezais são habitats essenciais para diversas espécies e também atuam como barreiras naturais contra a erosão costeira (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021).

Os resultados também indicam que, à medida que o nível do mar aumenta, a intrusão salina nos aquíferos subterrâneos da região poderia se tornar um problema crítico (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). Em cenários de elevação acima de 0,7 metros, a água salina penetraria mais profundamente no solo, afetando a qualidade da água doce disponível para consumo humano e para a agricultura local (IPCC, 2022; SANTOS, 2019). Isso causaria um efeito em cascata sobre a segurança hídrica da região, prejudicando a irrigação agrícola e tornando inviável o uso da água para consumo humano em algumas áreas (SMITH, 2019; BEZERRA, 2014). A agricultura da região, que depende da água doce disponível, seria diretamente impactada, causando prejuízos econômicos e sociais (GOMES, 2021; SANTOS, 2019).

Outro ponto importante destacado pelos resultados é a necessidade de adaptação das comunidades locais e da infraestrutura para lidar com os impactos do aumento do nível do mar (IPCC, 2022; SMITH, 2019). As áreas mais afetadas incluem aquelas que abrigam populações mais vulneráveis, onde a infraestrutura básica é insuficiente para lidar com os impactos climáticos projetados (SANTOS, 2019; BEZERRA, 2014). Essas populações seriam particularmente vulneráveis a eventos extremos, como inundações, que poderiam deslocar famílias e comprometer a segurança alimentar e hídrica da região (IPCC, 2022; GOMES, 2021). Dessa forma, é essencial que as políticas públicas sejam orientadas para a proteção dessas áreas e dessas comunidades, garantindo a resiliência diante dos impactos projetados (SMITH, 2019; BEZERRA, 2014).

A análise comparativa entre os cenários demonstrou que, embora os impactos iniciais em níveis de elevação mais baixos possam ser contidos com medidas de adaptação, os cenários de elevação mais acentuada exigem ações estruturais mais robustas, como a construção de barreiras físicas e a reformulação do planejamento urbano da área portuária (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). Em cenários intermediários, a preservação de ecossistemas como manguezais pode atuar como uma estratégia eficaz de mitigação, enquanto cenários mais críticos exigem soluções de engenharia de grande escala para proteger a infraestrutura crítica e as comunidades (IPCC, 2022; SANTOS, 2019). A construção de diques, barreiras e outras infraestruturas de proteção seria fundamental para impedir a invasão das águas marinhas nas áreas portuárias e residenciais (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014).

Em termos de planejamento urbano, os resultados sugerem a necessidade de reavaliar o uso do solo nas áreas costeiras adjacentes à Bacia do Itaqui (SANTOS, 2019; IPCC, 2022). A ocupação dessas áreas precisa ser cuidadosamente gerida para evitar que populações e infraestruturas sejam expostas a riscos crescentes de inundação e erosão costeira (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). Além disso, é necessário incluir planos de evacuação e estratégias de adaptação que possam ser implementadas rapidamente em caso de elevações extremas do nível do mar (SMITH, 2019; BEZERRA, 2014). O planejamento urbano, integrado com políticas ambientais, é uma estratégia essencial para minimizar os impactos econômicos e sociais a longo prazo (IPCC, 2022; GOMES, 2021).

Por fim, a cooperação entre os setores público e privado é essencial para a implementação das estratégias de adaptação e mitigação (SANTOS, 2019; BEZERRA, 2014). A resposta aos impactos das mudanças climáticas exige o comprometimento de todos os atores envolvidos, desde os formuladores de políticas até as empresas que operam na área portuária (GOMES, 2021; IPCC, 2022). A coordenação entre esses setores facilitará a implementação de soluções mais rápidas e eficazes, garantindo que as infraestruturas críticas e as comunidades sejam protegidas (SMITH, 2019; BEZERRA, 2014).

IV. Discussão

Os resultados obtidos pela simulação dos cenários climáticos na Bacia Hidrográfica do Itaqui demonstram a urgência de implementar estratégias de mitigação e adaptação para lidar com os impactos do aumento do nível do mar. A partir das projeções feitas com o modelo BR-Mangue, torna-se evidente que as variações no nível do mar, mesmo nos cenários mais otimistas, podem trazer consequências adversas para a infraestrutura portuária, os ecossistemas costeiros e as comunidades humanas que dependem dessas áreas (BEZERRA, 2014; IPCC, 2022). A capacidade de resposta dessas áreas é limitada, principalmente porque a vulnerabilidade das infraestruturas é agravada pela dependência das atividades portuárias e pela sensibilidade dos ecossistemas locais (GOMES, 2021; SMITH, 2019).

No cenário **SSP1-1.9**, que representa um aumento de 0,3 metros no nível do mar, os impactos podem ser mitigados por meio de ações locais de adaptação, como o fortalecimento de barreiras físicas naturais, especialmente os manguezais (IPCC, 2022; GOMES, 2021). Os manguezais desempenham um papel crucial como

áreas de amortecimento contra a erosão costeira e as inundações, agindo como proteção natural para as áreas urbanas adjacentes (BEZERRA, 2014; SANTOS, 2019). No entanto, mesmo com um aumento moderado, a preservação desses ecossistemas se torna essencial, uma vez que sua degradação aceleraria o processo de erosão e aumentaria a vulnerabilidade das áreas urbanas e portuárias (SMITH, 2019; GOMES, 2021). Além disso, a infraestrutura do Porto do Itaqui pode requerer pequenas adaptações para evitar danos causados por eventos de maré alta mais intensos (IPCC, 2022; SANTOS, 2019).

Por outro lado, no cenário **SSP2-4.5**, com uma elevação de 0,7 metros, os impactos já começam a se intensificar, especialmente para a infraestrutura portuária e os ecossistemas adjacentes (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021). A capacidade de adaptação natural dos manguezais começa a se tornar insuficiente para conter os danos causados pelo avanço das águas (IPCC, 2022; SANTOS, 2019). Nesse contexto, estratégias mais robustas, como a construção de diques e barreiras artificiais, podem ser necessárias para proteger as áreas economicamente vitais, como o Porto do Itaqui e suas instalações logísticas (SMITH, 2019; GOMES, 2021). No entanto, tais medidas de engenharia podem ter consequências ecológicas adversas, como a fragmentação de habitats e a alteração das dinâmicas costeiras, o que pode gerar efeitos colaterais para o ecossistema local (SANTOS, 2019; BEZERRA, 2014).

O cenário **SSP5-8.5**, que prevê uma elevação de até 1,1 metros, representa o maior desafio, tanto em termos de impactos ambientais quanto socioeconômicos (IPCC, 2022; SMITH, 2019). A simulação demonstrou que, com esse nível de aumento do mar, grande parte da infraestrutura do Porto do Itaqui ficaria submersa ou gravemente comprometida, exigindo intervenções massivas para garantir a continuidade das operações portuárias (BEZERRA, 2014; GOMES, 2021). Além disso, as áreas residenciais e comerciais próximas à bacia também estariam em risco, o que poderia gerar um grande deslocamento populacional e perdas econômicas significativas para a região (SANTOS, 2019; SMITH, 2019). O comprometimento de áreas economicamente vitais traria impactos diretos para a economia regional e nacional, intensificando a crise social (IPCC, 2022; BEZERRA, 2014).

Do ponto de vista ecológico, o avanço do mar em 1,1 metros comprometeria de maneira irreversível os ecossistemas de mangue da região (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014). Esses ambientes são fundamentais não apenas para a proteção costeira, mas também para a manutenção da biodiversidade local e o sequestro de carbono, funções que seriam drasticamente reduzidas com a inundação permanente dessas áreas (SANTOS, 2019; SMITH, 2019). Portanto, a perda desses ecossistemas agrava os efeitos das mudanças climáticas, criando um ciclo vicioso em que o aumento do nível do mar acelera a degradação ambiental, e a degradação ambiental, por sua vez, intensifica os impactos climáticos (BEZERRA, 2014; IPCC, 2022). Além disso, a redução da capacidade de retenção de carbono dos manguezais comprometeria ainda mais os esforços globais para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (SANTOS, 2019; GOMES, 2021).

Outro aspecto importante a ser considerado é a intrusão salina, que, conforme apontado pelos resultados, pode se tornar um problema severo nos cenários de elevação mais altos (IPCC, 2022; SMITH, 2019). A contaminação dos aquíferos de água doce pela água do mar comprometeria a segurança hídrica da região, afetando tanto o abastecimento de água para a população quanto a agricultura (GOMES, 2021; SANTOS, 2019). Esse efeito em cascata pode causar desequilíbrios econômicos e sociais, especialmente para as comunidades que dependem da agricultura para subsistência (BEZERRA, 2014; SMITH, 2019). As comunidades rurais, que dependem fortemente da irrigação para a produção agrícola, seriam severamente afetadas pela salinização do solo e dos recursos hídricos (IPCC, 2022; GOMES, 2021).

A comparação entre os cenários analisados reforça a necessidade de se adotar uma abordagem integrada para mitigar os impactos do aumento do nível do mar na Bacia do Itaqui (SANTOS, 2019; GOMES, 2021). Políticas públicas eficazes devem considerar tanto a proteção da infraestrutura portuária quanto a preservação dos ecossistemas naturais, garantindo que as soluções implementadas atendam tanto às demandas econômicas quanto ambientais da região (BEZERRA, 2014; IPCC, 2022). Além disso, é fundamental que haja um planejamento urbano de longo prazo, que leve em conta as projeções climáticas e as tendências de aumento do nível do mar, evitando a ocupação de áreas de risco e promovendo a construção de infraestrutura resiliente (SMITH, 2019; GOMES, 2021). O uso sustentável do solo e a limitação da ocupação em áreas costeiras vulneráveis são passos essenciais para mitigar os impactos futuros (SANTOS, 2019; BEZERRA, 2014).

Por fim, a cooperação internacional também desempenha um papel fundamental na mitigação dos impactos das mudanças climáticas em regiões costeiras (IPCC, 2022; GOMES, 2021). A coordenação de esforços globais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, conforme estabelecido no Acordo de Paris, é essencial para limitar o aumento do nível do mar a níveis controláveis (BEZERRA, 2014; SMITH, 2019). Sem uma ação coordenada, as projeções mais pessimistas tendem a se concretizar, comprometendo seriamente as economias e os ecossistemas costeiros ao redor do mundo, incluindo a Bacia Hidrográfica do Itaqui (IPCC, 2022; SANTOS, 2019). A manutenção dos compromissos internacionais é crucial para garantir a resiliência das áreas costeiras vulneráveis (GOMES, 2021; BEZERRA, 2014).

As ações locais também precisam estar alinhadas com as metas globais, garantindo que tanto as políticas públicas quanto as iniciativas privadas sigam diretrizes de desenvolvimento sustentável e adaptação climática (SMITH, 2019; IPCC, 2022). O financiamento de projetos de adaptação e a implementação de tecnologias mais avançadas para mitigar os impactos climáticos são fundamentais para reduzir as vulnerabilidades das áreas costeiras, incluindo a Bacia do Itaqui (SANTOS, 2019; BEZERRA, 2014). O sucesso dessas iniciativas depende de uma cooperação global forte e da adoção de políticas que levem em conta as particularidades locais (GOMES, 2021; SMITH, 2019).

V. Conclusão

Os impactos das mudanças climáticas na Bacia Hidrográfica do Itaqui, especialmente no que tange ao aumento do nível do mar, representam uma ameaça real e iminente para a infraestrutura portuária, os ecossistemas locais e as comunidades adjacentes. A elevação do nível do mar em áreas costeiras é um dos fenômenos mais preocupantes relacionados ao aquecimento global, uma vez que coloca em risco a viabilidade de atividades econômicas cruciais, como a logística portuária, e a estabilidade ecológica de ecossistemas sensíveis (SANTOS, 2020). Com base nos cenários climáticos projetados até o ano de 2100, observa-se que, mesmo nos cenários mais otimistas, o aumento do nível do mar trará consequências que demandarão adaptações significativas para garantir a sustentabilidade da região. Os cenários mais pessimistas, com elevações de até 1,1 metros, indicam a possibilidade de impactos graves, com a inundação de parte da área portuária e o comprometimento das atividades econômicas e ecológicas da região (IPCC, 2022).

A simulação com o modelo BR-Mangue revelou que a preservação dos ecossistemas de mangue, fundamentais para a proteção contra a erosão e a intrusão salina, será um componente crítico nas estratégias de adaptação. Manguezais são áreas de amortecimento natural que reduzem a intensidade dos impactos da maré e ajudam a proteger as zonas costeiras de eventos extremos, como tempestades e inundações (BEZERRA, 2014). No entanto, essas medidas naturais, embora eficazes em níveis moderados de elevação do mar, podem não ser suficientes nos cenários mais severos, exigindo a implementação de soluções estruturais, como diques e barreiras artificiais, que, por sua vez, devem ser cuidadosamente planejadas para minimizar os impactos negativos no meio ambiente (GOMES, 2021). Em cenários de maior elevação, a combinação de soluções naturais e artificiais será crucial para a mitigação dos impactos.

Do ponto de vista socioeconômico, a vulnerabilidade das áreas residenciais e comerciais próximas à Bacia do Itaqui requer uma atenção especial. A região abriga populações economicamente vulneráveis, muitas das quais dependem direta ou indiretamente das atividades portuárias (SANTOS, 2020). A proteção dessas áreas é essencial para evitar o deslocamento de populações e a perda de infraestrutura crítica, que poderia agravar ainda mais as desigualdades socioeconômicas. Estratégias de planejamento urbano que evitem a ocupação de áreas de risco, combinadas com políticas de desenvolvimento sustentável, são fundamentais para mitigar os impactos a longo prazo (BEZERRA, 2014). A proteção das comunidades e a adaptação das áreas urbanas são componentes essenciais de qualquer estratégia de mitigação para enfrentar os desafios impostos pelo aumento do nível do mar.

Ademais, a intrusão salina, especialmente nos cenários mais críticos, ameaça a segurança hídrica da região, o que poderá afetar tanto a população quanto a agricultura local. A intrusão salina ocorre quando a água do mar avança sobre aquíferos de água doce, contaminando as fontes hídricas que abastecem a população e comprometendo a produção agrícola, que depende da irrigação (IPCC, 2022). Esse fenômeno é especialmente preocupante em áreas onde a agricultura é a principal fonte de sustento econômico, e onde a irrigação é essencial para manter a produtividade agrícola. Sem uma gestão eficaz da água e a implementação de tecnologias de dessalinização e proteção de aquíferos, os impactos sobre a segurança alimentar e hídrica serão severos (SANTOS, 2020).

Diante disso, a adoção de políticas públicas e estratégias integradas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas são essenciais para assegurar a continuidade das atividades econômicas e a preservação dos ecossistemas costeiros na Bacia do Itaqui. O sucesso dessas medidas dependerá de uma abordagem colaborativa entre os diferentes níveis de governo, a iniciativa privada e a sociedade civil (GOMES, 2021). Além das medidas locais, a cooperação internacional e o cumprimento dos compromissos estabelecidos no Acordo de Paris são imprescindíveis para limitar os impactos globais do aumento do nível do mar e suas consequências nas regiões costeiras (IPCC, 2022). A redução das emissões de gases de efeito estufa, aliada ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, é uma prioridade para garantir que os cenários mais pessimistas não se concretizem.

A presente pesquisa contribui para o entendimento dos desafios que as áreas costeiras, como a Bacia do Itaqui, enfrentam diante das mudanças climáticas, oferecendo subsídios para o desenvolvimento de estratégias de adaptação que garantam a resiliência da infraestrutura portuária e a proteção dos ecossistemas locais (BEZERRA, 2014). A região portuária do Itaqui é de grande importância econômica para o Brasil, e sua vulnerabilidade às mudanças climáticas pode ter implicações de longo alcance para o comércio e a logística nacional e internacional. Entretanto, a evolução dos cenários dependerá das ações globais de mitigação das emissões de gases de efeito

estufa, que, se não forem reduzidas a tempo, poderão intensificar os impactos climáticos, comprometendo seriamente a sustentabilidade dessas regiões (IPCC, 2022).

Os resultados da simulação reforçam a necessidade de uma abordagem integrada, que considere tanto as soluções baseadas na natureza quanto as intervenções estruturais para a adaptação da região ao aumento do nível do mar. A proteção e restauração dos ecossistemas de mangue devem ser prioridades em qualquer estratégia de adaptação, uma vez que esses habitats fornecem serviços ecológicos valiosos que ajudam a mitigar os impactos climáticos (GOMES, 2021). Além disso, a combinação de soluções tecnológicas, como a construção de diques e barreiras, com a preservação das defesas naturais será essencial para proteger a infraestrutura crítica e as comunidades vulneráveis. Essa abordagem integrada permitirá uma resposta mais eficaz às ameaças representadas pelo aumento do nível do mar (BEZERRA, 2014).

Outro fator crítico identificado pela pesquisa é a necessidade de repensar o uso do solo nas áreas costeiras adjacentes à Bacia do Itaqui. O planejamento urbano deve priorizar o desenvolvimento sustentável, evitando a ocupação desordenada e inadequada de áreas vulneráveis a inundações e à erosão costeira (SANTOS, 2020). Além disso, é necessário criar incentivos para que as comunidades locais adotem práticas sustentáveis de manejo do solo e da água, contribuindo para a proteção do meio ambiente e a mitigação dos impactos das mudanças climáticas. O planejamento urbano e regional deve ser revisado de forma contínua, levando em consideração as novas projeções climáticas e os riscos emergentes (IPCC, 2022).

A pesquisa também destaca a importância de políticas públicas voltadas para a adaptação das populações mais vulneráveis às mudanças climáticas. Muitas das comunidades que vivem próximas à Bacia do Itaqui enfrentam barreiras econômicas e sociais que dificultam sua adaptação aos impactos climáticos (GOMES, 2021). Sem o apoio do governo e de outras instituições, essas populações correm o risco de serem deslocadas ou sofrerem impactos econômicos severos, como a perda de suas fontes de renda. Políticas de apoio social e de infraestrutura serão fundamentais para garantir que essas comunidades possam se adaptar e prosperar, mesmo diante dos desafios impostos pelo aumento do nível do mar (SANTOS, 2020).

Por fim, a cooperação internacional será um elemento essencial para enfrentar os impactos das mudanças climáticas em regiões costeiras vulneráveis, como a Bacia do Itaqui. As políticas nacionais de mitigação e adaptação devem estar alinhadas com os esforços globais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a resiliência climática (IPCC, 2022). O cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris, em conjunto com a implementação de novas tecnologias para monitoramento climático e gestão de riscos, contribuirá para a criação de um futuro mais sustentável para as regiões costeiras ao redor do mundo (BEZERRA, 2014). A colaboração entre governos, empresas e organizações internacionais será crucial para garantir que as áreas costeiras mais vulneráveis tenham acesso aos recursos e ao conhecimento necessário para se adaptarem aos desafios do futuro (GOMES, 2021).

Referências

- [1] Bezerra, D. S. Modelagem Da Dinâmica Do Manguezal Frente À Elevação Do Nível Do Mar. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais, São José Dos Campos, 2014.
- [2] Gomes, C. L. Impactos Das Mudanças Climáticas Em Áreas Costeiras: Um Estudo De Caso Na Região Portuária Do Itaqui. Revista Brasileira De Geografia, 2021.
- [3] Santos, R. F. Mudanças Climáticas E A Vulnerabilidade Da Infraestrutura Portuária No Brasil. São Paulo: Editora Nacional, 2020.
- [4] Kirby, J. Coastal Erosion And Climate Change: A Global Perspective. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- [5] Smith, T. R. Global Climate Models And Sea Level Rise: Impacts On Coastal Ecosystems. Journal Of Environmental Sciences, V. 15, P. 120-135, 2019.
- [6] Ippc. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, And Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [7] Inpe – Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais. Mapeamento De Áreas Costeiras: Dados E Análise. São José Dos Campos: Inpe, 2021.
- [8] Afonso, M. I. B. Avaliação De Impactes Do Desenvolvimento Urbano Sobre A Estrutura Ecológica Da Península De Setúbal: Uma Aplicação Baseada Em Autômatos Celulares Utilizando O Modelo Sleuth. Dissertação (Mestrado) – Universidade De Lisboa, 2015.
- [9] Araújo, E. P.; Teles, M. G. L.; Lago, W. J. S. Delimitação Das Bacias Hidrográficas Do Maranhão A Partir De Dados Srtm. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, Natal, 2009. Disponível Em: [Http://Marte.Sid.Inpe.Br/Col/Dpi.Inpe.Br/Sbsr@80/2008/11.17.23.07.25/Doc/4631-4638.Pdf](http://Marte.Sid.Inpe.Br/Col/Dpi.Inpe.Br/Sbsr@80/2008/11.17.23.07.25/Doc/4631-4638.Pdf). Acesso Em: 10 Jul. 2022.
- [10] Milanez, B.; Fonseca, I. F. Justiça Climática E Eventos Climáticos Extremos: O Caso Das Enchentes No Brasil. Brasília: Ipea, 2010.