



A Elevação do Nível do Mar e as Novas Rotas Marítimas: Desafios e Diretrizes para a Adaptação Portuária Global

The Rise in Sea Levels and New Maritime Routes: Challenges and Guidelines for Global Port Adaptation.

Rafael Ferraz dos Santos, Mestrando em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia de Transportes - PET, COPPE-UFRJ

rafael.ferraz@pet.coppe.ufrj.br

Victor Hugo Souza de Abreu, Doutor em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia de Transportes - PET, COPPE-UFRJ

victor@pet.coppe.ufrj.br

Andrea Souza Santos, Doutora em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia de Transportes - PET, COPPE-UFRJ

andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br

Resumo

Nas próximas décadas, o transporte marítimo enfrentará transformações devido a fatores climáticos e econômicos. A elevação do nível do mar, destacada no relatório do IPCC (AR6), ameaça infraestruturas costeiras exigindo adaptações urgentes. Para mitigar os riscos influenciados pelas mudanças do clima, será essencial expandir áreas de manuseio portuário, adaptar instalações existentes e desenvolver novas, considerando mudanças e surgimento de rotas marítimas. Esses desafios oferecem oportunidade para projetar e construir portos mais resilientes, sustentando o futuro comércio global. O objetivo desse artigo é investigar a adaptação portuária às mudanças climáticas, focando na expansão das áreas de manuseio e na resiliência das infraestruturas. Explora o surgimento de novas rotas marítimas e suas implicações, analisando como a elevação do mar impacta as principais rotas globais e as infraestruturas. O artigo propõe diretrizes para o desenvolvimento de infraestruturas resilientes, capazes de manter o fluxo do comércio e de novas dinâmicas. Identificando as lacunas nas pesquisas e práticas atuais, sugere-se áreas para estudos que contribuam para formular políticas e estratégias eficazes de adaptação.

Palavras-chave: Adaptação portuária; Rotas marítimas; Elevação do nível do mar; Infraestruturas costeiras; Comércio global.

Abstract

In the coming decades, maritime transport will undergo significant transformations driven by climatic and economic factors. The rise in sea levels, as highlighted in the IPCC report (AR6), poses a threat to coastal infrastructures, necessitating urgent adaptations. To mitigate climate-induced risks, it will be essential to expand port handling areas, adapt existing facilities, and develop new ones, considering shifts and the emergence of new maritime routes. These challenges present an



opportunity to design and construct more resilient ports, ensuring the sustainability of future global trade. This article aims to investigate port adaptation to climate change, focusing on the expansion of handling areas and the resilience of infrastructures. It explores the emergence of new maritime routes and their implications, analyzing how rising sea levels impact major global routes and infrastructures. The article proposes guidelines for developing resilient infrastructures capable of maintaining global trade flows and adapting to new dynamics. By identifying gaps in current research and practices, it suggests areas for future studies that can contribute to formulating effective adaptation policies and strategies.

Keywords: *Port adaptation; Maritime routes; Sea level rise; Coastal infrastructures; Global trade.*

1. Introdução

As áreas portuárias sempre desempenharam um papel crucial no desenvolvimento civilizacional, impulsionadas pelo fluxo constante de pessoas e pelo intercâmbio de ideias viabilizado pelo transporte marítimo. Historicamente, cidades portuárias foram centros culturais e econômicos fundamentais para a consolidação de grandes nações. No entanto, a longevidade dessas estruturas dependeu de sua capacidade de fomentar a expansão comercial, reduzindo distâncias e estabelecendo rotas economicamente viáveis e logisticamente acessíveis (GHOSH, 2022).

Nas últimas quatro décadas, a relevância das áreas portuárias foi intensificada pela crescente integração econômica global, pela liberalização do comércio no âmbito da Organização Mundial do Comércio e pela abertura da economia chinesa. Estimativas indicam que, até 2050, o volume global de contêineres movimentados aumentará em 73%, alcançando pelo menos 2,2 bilhões de unidades anuais. Contudo, a capacidade portuária atual será insuficiente para atender a essa demanda até 2030, tornando imprescindível a expansão e o aprimoramento da infraestrutura portuária para garantir a eficiência na movimentação de mercadorias. Projeções sugerem que a demanda por novas áreas portuárias poderá variar entre 2.510 km² e 5.054 km² até 2050 (HANSON; NICHOLLS, 2020). Esse cenário é agravado pelos desafios impostos pela mudança do clima, que não apenas amplifica a vulnerabilidade das infraestruturas portuárias, mas também pode desencadear crises sistêmicas em setores essenciais, como o de alimentos, resultando em desabastecimento e escassez de bens (DOS SANTOS; DE ABREU; SANTOS, 2024).

A intensificação dos eventos climáticos extremos neste século impõe desafios crescentes aos portos, tradicionalmente projetados com base em níveis extremos de água predefinidos. O Sexto Relatório de Avaliação (*Sixth Assessment Report - AR6*, em inglês) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*, em inglês) prevê uma aceleração contínua da elevação do nível do mar ao longo do século XXI, mesmo sob cenários de emissões moderadas. Esse aumento decorre do derretimento de geleiras e calotas polares, da expansão térmica dos oceanos e de outras dinâmicas associadas ao aquecimento global. Projeções indicam que, até 2100, o nível do mar poderá subir entre 0,6 e 1,1 metros, superando as estimativas do quinto ciclo de avaliação (AR6). O nível relativo do mar, influenciado pela subsidência ou elevação do terreno e por variações climáticas, intensifica a frequência e a magnitude de eventos extremos (NICHOLLS *et al.*, 2014; OPPENHEIMER *et al.*, 2019; HANSON; NICHOLLS, 2020; IPCC, 2021). Diante desse cenário, torna-se imprescindível que os portos não apenas



adaptem suas infraestruturas para mitigar os impactos da elevação do nível do mar, mas também implementem estratégias para enfrentar as transformações nas dinâmicas do comércio marítimo decorrentes dessas mudanças (OLIVEIRA; SAVIO, 2015).

Uma análise regional baseada nos Cenários de Caminho Socioeconômico Compartilhado (SSPs) indica que os impactos da elevação do nível do mar e as necessidades de expansão da infraestrutura portuária variam consideravelmente entre as regiões globais. Em territórios como o Canadá e regiões da antiga União Soviética, a demanda por novas áreas portuárias é mais expressiva sob o cenário SSP5-8.5, em razão do crescimento projetado no comércio de commodities e da maior exposição a mudanças climáticas severas. Por outro lado, regiões como a América Central e a América do Sul apresentam demandas por expansão portuária mais constantes entre os cenários (IPCC, 2021). Essas transformações estão diretamente relacionadas à mudança do clima e à reconfiguração das rotas marítimas globais, influenciando significativamente a geopolítica e as políticas climáticas.

A reconfiguração das rotas marítimas, impulsionada pelo rápido derretimento do gelo marinho no Ártico, tem implicações globais significativas. O aumento das temperaturas, estimado entre 2°C e 4°C acima dos níveis pré-industriais, expande a navegabilidade de rotas como a Passagem do Noroeste e a Rota do Mar do Norte, prolongando suas temporadas operacionais e potencialmente redefinindo os fluxos do comércio marítimo global (MUDRYK *et al.*, 2021). Embora essas transformações criem novas oportunidades, o crescimento do tráfego nessas regiões impõe desafios críticos de governança e sustentabilidade ambiental. Disputas geopolíticas, como aquelas entre Rússia e Canadá, ilustram a complexidade desse cenário (BOYLAN, 2021). A maior acessibilidade ao Ártico também exige regulamentações rigorosas para mitigar impactos ambientais e riscos à segurança da navegação (CHIRCOP, 2007). Dessa forma, a mudança do clima não apenas altera as rotas marítimas globais, mas também demanda uma governança integrada para assegurar a viabilidade dessas transformações a longo prazo

Diante desse contexto, este artigo tem como objetivo geral analisar as implicações da mudança do clima nas rotas marítimas globais e suas repercussões na infraestrutura portuária. Especificamente, busca-se: (1) avaliar os impactos da elevação do nível do mar nas infraestruturas portuárias existentes; (2) examinar as oportunidades e riscos decorrentes da reconfiguração das rotas marítimas, com ênfase no Mar do Norte; e (3) propor diretrizes para políticas de governança e sustentabilidade que assegurem a resiliência portuária em um cenário de mudança do clima.

2. Materiais e Métodos

Os termos utilizados, critérios de inclusão e qualificação, além dos detalhes para a busca e extração de informações da base de dados, foram cuidadosamente definidos para alinhar com os objetivos da pesquisa. A seleção de termos em inglês, como “*climate change*” ou “*global warming*” combinados a “*shipping routes*”, “*maritime routes*”, “*maritime pathways*” e “*maritime transportation*”, foi estrategicamente elaborada para capturar a literatura relevante que discute a intersecção entre mudança climática e rotas marítimas, conforme apresentado no Quadro 1. Cabe destacar que esta revisão se baseia em De Abreu; Santos; Monteiro (2022) e De Abreu *et al.* (2023).

Quadro 1: Estratégias de Busca.



| Aspecto | Descrição |
|---------------------------|--|
| Tópico de Busca | <i>TITLE-ABS-KEY(("climate change" AND "shipping routes") OR ("climate change" AND "maritime routes") OR ("climate change" AND "maritime pathways") OR ("climate change" AND "maritime transportation") OR ("global warming" AND "shipping routes") OR ("global warming" AND "maritime routes") OR ("global warming" AND "maritime pathways") OR ("global warming" AND "maritime transportation"))</i> |
| Base de Dados | Scopus |
| Crítérios de Inclusão | Relevância da Fonte e Data de Publicação (preferência para os últimos 15 anos) |
| Crítérios de Qualificação | Qualidade e Aplicabilidade do Estudo |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Dos 340 artigos inicialmente identificados na base de dados *Scopus*, 336 foram considerados relevantes para o escopo da pesquisa e mantidos no repositório de análise. Apenas quatro artigos (1,76% do total) foram excluídos por não apresentarem aderência direta aos temas centrais da investigação, que se concentram nas rotas marítimas e nos impactos das mudanças climáticas. Essa triagem rigorosa assegura que a revisão bibliográfica mantenha um foco preciso, abrangendo exclusivamente estudos que contribuam diretamente para a compreensão das interações entre mudanças climáticas e rotas marítimas.

Os artigos excluídos incluem "*The Effect of Within-Year Wave Climate Variability on the Morphodynamics of Gravel Beaches*", que examina a variabilidade climática em praias de cascalho sem relação direta com a infraestrutura portuária ou as dinâmicas das rotas marítimas. "*Traditionally, Spaghetti Charts and Track Ellipses Are Employed to Track the Progress of Cyclones and Predict Their Paths*" foi desconsiderado por abordar metodologias de previsão ciclônica sem discutir explicitamente os impactos das mudanças climáticas sobre a navegação. O artigo "*Several Decades of Research on Invasive Marine Species Have Highlighted Their Impact on Marine Ecosystems*" trata dos efeitos de espécies invasoras nos ecossistemas marinhos, um tópico ambiental relevante, mas não diretamente vinculado à análise das rotas marítimas e da mudança do clima. Por fim, "*Plastic Pollution is of Worldwide Concern; However, Its Impacts on the Marine Environment Are Still Not Fully Understood*" discute a poluição plástica nos oceanos, um problema ambiental significativo, mas fora do escopo da pesquisa, que se concentra nos desafios específicos da navegação e da infraestrutura portuária frente às mudanças climáticas.

A análise dos 336 artigos selecionados revela uma forte ênfase na interseção entre mudança do clima, rotas marítimas e infraestrutura portuária, demonstrando a relevância desses temas na literatura científica contemporânea. Em 302 artigos, representando aproximadamente 88,8% do total, a mudança climática surge como o eixo central das discussões. A recorrência de termos como "*climate change*", "*global warming*", "*emissions*" e "*carbon*" evidencia a predominância desse tema e sua relação com as transformações nos padrões de transporte marítimo e infraestrutura portuária.

Além disso, 111 artigos (32,6%) exploram aspectos específicos das rotas marítimas, com destaque para a crescente acessibilidade da região Ártica devido ao degelo polar. A presença significativa de termos como "*Arctic shipping*", "*Northern Sea Route*", "*Northwest Passage*" e "*sea ice*" reflete o aumento do interesse acadêmico sobre o impacto das mudanças



climáticas na viabilidade dessas rotas alternativas, que podem reduzir distâncias comerciais e alterar fluxos logísticos globais.

No que se refere à infraestrutura portuária, 269 artigos (79,1%) abordam desde a resiliência dos portos frente às mudanças climáticas até estratégias para o desenvolvimento de infraestruturas mais sustentáveis. A frequência de termos como *"port"*, *"infrastructure"*, *"resilience"* e *"sustainability"* sugere uma preocupação crescente com a necessidade de adaptação dos portos para lidar com eventos climáticos extremos, elevação do nível do mar e exigências ambientais mais rigorosas.

A sobreposição desses três eixos temáticos demonstra que a mudança climática não é apenas um fator isolado, mas um elemento estruturante nas transformações que afetam o transporte marítimo e a infraestrutura portuária. Esses dados reforçam a importância de pesquisas interdisciplinares voltadas à mitigação dos impactos climáticos e à construção de sistemas de transporte marítimo mais resilientes e sustentáveis. A consolidação desses tópicos na literatura acadêmica reflete um campo de estudo em expansão, cada vez mais comprometido com a adaptação às novas condições globais e com a formulação de estratégias para garantir a segurança e eficiência das rotas marítimas no futuro.

3. Resultados Bibliométricos

Os resultados bibliométricos proporcionam uma visão abrangente das tendências e padrões emergentes na literatura científica sobre mudança do clima, rotas marítimas e infraestrutura portuária. O banco de dados compilado é constituído por uma coleção diversificada de artigos científicos que refletem a amplitude e profundidade da pesquisa contemporânea nessas áreas

A Figura 1 apresenta a evolução temporal das publicações científicas relacionadas ao tema ao longo dos últimos anos, destacando tendências no campo de estudo. O gráfico de distribuição temporal das publicações, ajustado para o período de 1999 a 2024, revela um aumento expressivo no número de trabalhos publicados, especialmente a partir de 2016. Esse período é identificado como um ponto de inflexão, no qual as discussões sobre mudança do clima, rotas marítimas e infraestrutura portuária passaram a ocupar uma posição de crescente relevância na literatura acadêmica.

Em termos numéricos, no ano de 2010 foram registradas nove publicações, representando 2,65% do total de artigos analisados. Já em 2020, esse número subiu para 29 publicações, o que equivale a 8,53% do total. O crescimento continuou em 2021 com 35 publicações (10,29%) e em 2022 com 38 publicações (11,18%). O ano de 2023 apresentou o maior número de publicações, com 45 artigos, representando 13,24% do total. Esses números não só ilustram o amadurecimento e a consolidação do campo de estudo, mas também demonstram a intensificação da pesquisa e da colaboração interdisciplinar em áreas críticas para a sustentabilidade e resiliência globais.

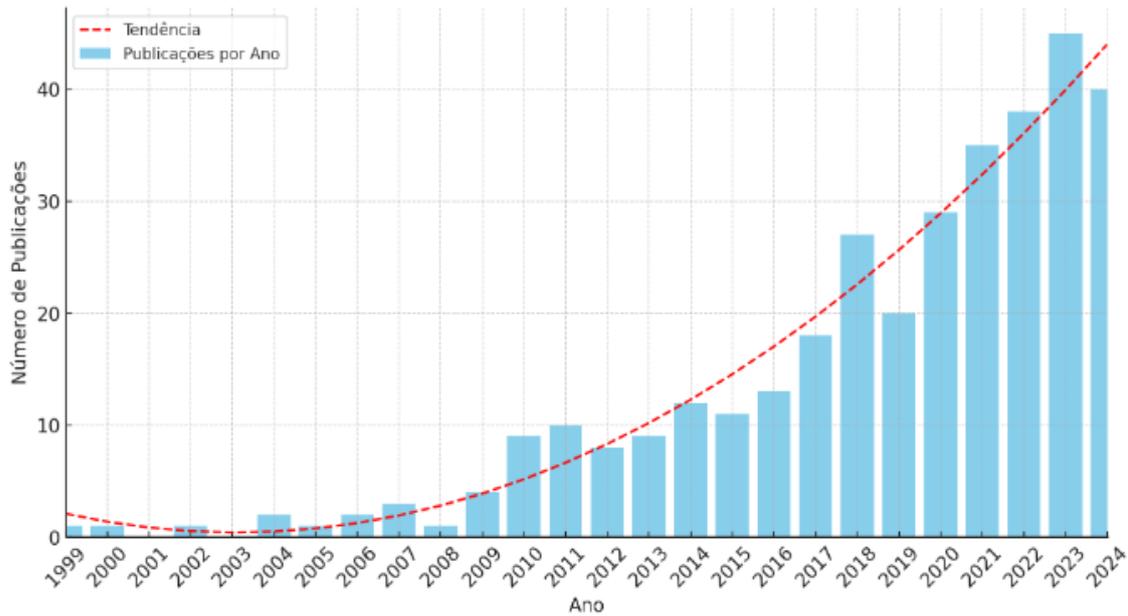


Figura 1: Evolução temporal das publicações científicas (1999-2024). Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 2, a distribuição geográfica dos artigos evidencia uma concentração substancial de pesquisas sobre a elevação do nível do mar e as novas rotas marítimas em países da Ásia, América do Norte e Europa. A China, com 68 publicações, lidera este cenário, seguida pelos Estados Unidos (52) e Reino Unido (44). Este domínio na produção científica sobre o tema não apenas reflete o papel desses países como potências marítimas globais, mas também indica sua crescente preocupação com as ameaças associadas às mudanças climáticas, especialmente a elevação do nível do mar. A presença significativa dessas nações na pesquisa sobre o impacto do aumento do nível do mar está intimamente ligada à vulnerabilidade de suas regiões costeiras, que são extremamente densamente povoadas e abrigam infraestruturas essenciais para suas economias (IPCC, 2021).

O caso da China, por exemplo, é particularmente relevante, pois muitas de suas principais cidades costeiras, como Xangai e Tianjin, enfrentam riscos elevados devido à proximidade com o mar, além da significativa atividade portuária que é vital para a economia global. Da mesma forma, os Estados Unidos, com suas costas atlântica e pacífica, além de áreas de grande importância econômica, como a região do Golfo do México, estão expostos a riscos derivados da elevação do nível do mar, que pode afetar tanto o comércio marítimo quanto a segurança das populações locais. O Reino Unido, apesar de ser uma nação insular, também possui áreas costeiras de alta vulnerabilidade, sendo que a intensificação das mudanças climáticas pode afetar suas rotas marítimas comerciais e a infraestrutura de transporte (IPCC, 2021).

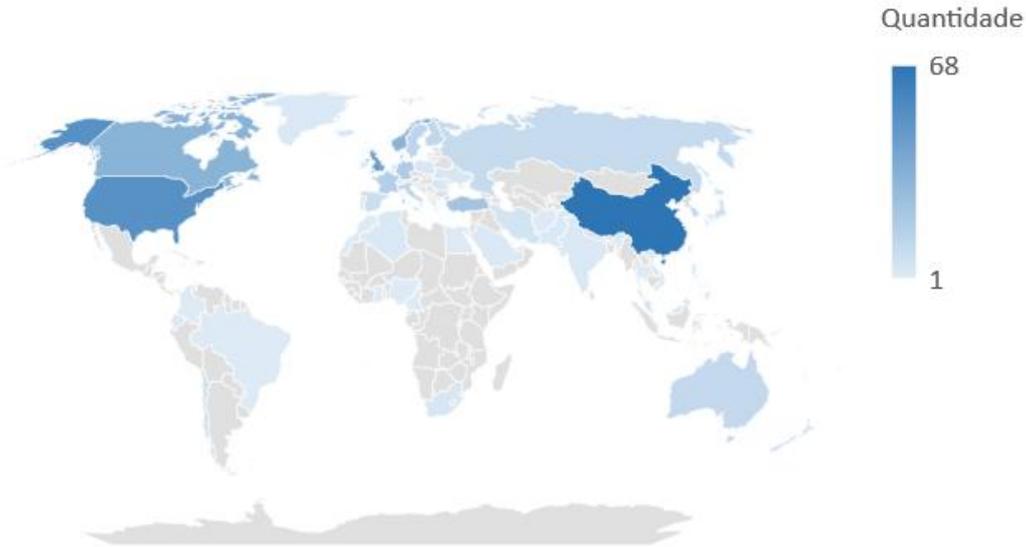


Figura 2: Principais países em relação ao número de publicações do tema. Fonte: elaborado pelos autores.

Além disso, o domínio dessas nações na pesquisa sobre novas rotas marítimas está diretamente relacionado ao crescente interesse por explorar as vias comerciais que se abrem devido ao derretimento do gelo no Ártico, como a Rota do Mar do Norte, o que pode alterar significativamente as dinâmicas globais de transporte e comércio. O estudo e monitoramento dessas mudanças são, portanto, essenciais para antecipar as consequências econômicas e sociais da elevação do nível do mar, especialmente em regiões que, como mencionado, são de vital importância para o comércio internacional e para as economias dessas potências (PIZZOLATO *et al.* 2016).

A China, por exemplo, tem manifestado um interesse crescente nas rotas árticas, impulsionado pela possibilidade de encurtar significativamente o tempo de transporte entre a Ásia e a Europa, em comparação com as rotas tradicionais que atravessam o Canal de Suez. Esse interesse está inserido em uma estratégia mais ampla da China para expandir sua influência no comércio marítimo global, integrada à sua Iniciativa do Cinturão e Rota (*Belt and Road Initiative*), que visa estabelecer novas rotas comerciais e fortalecer as conexões econômicas entre a Ásia, a Europa e além. A inclusão das rotas árticas nesta iniciativa reflete a visão estratégica da China de aproveitar as mudanças climáticas para redefinir o mapa do comércio global, garantindo maior controle e participação nas rotas marítimas emergentes (BRZEZINSKI; BARTOSIK, 2019).

A Noruega tem um interesse histórico e geográfico nas rotas árticas. A proximidade do país com o Ártico e sua longa tradição marítima tornam-no um líder natural na pesquisa sobre as implicações da mudança climática para essas rotas. Nos Estados Unidos a pesquisa sobre as rotas árticas é motivada tanto por preocupações ambientais quanto por considerações estratégicas. O Ártico está se tornando uma área de crescente interesse militar e comercial para os EUA, que possuem a maior frota de quebra-gelos do mundo e uma longa costa ártica no Alasca. Por fim, o Reino Unido, com sua longa tradição marítima e robusta presença no campo científico e acadêmico, tem direcionado esforços significativos para investigar as implicações das mudanças climáticas nas rotas marítimas, com especial ênfase na região do Ártico. O interesse do Reino Unido nessas rotas está intrinsecamente ligado à sua posição consolidada como uma potência marítima global, além de refletir seu compromisso com a liderança internacional em questões ambientais e de sustentabilidade (HUMPERT; RASPOTNIK, 2012).



Por outro lado, a distribuição desigual das publicações entre o Norte Global e o Sul Global evidencia as disparidades marcantes na produção científica e no acesso a recursos para pesquisa. Em contraste, as nações do Sul Global, como Brasil, África do Sul e Índia, apresentam uma contribuição significativamente menor em termos de publicações. Contudo, é essencial reconhecer que, apesar de sua menor produção científica, esses países estão entre os mais vulneráveis à elevação do nível do mar e às consequências subsequentes para as infraestruturas costeiras (MOSER *et al.*, 2012). Essa realidade ressalta a necessidade urgente de intensificar a pesquisa nessas regiões, com o objetivo de aprofundar a compreensão dos desafios específicos que enfrentam e de desenvolver soluções adaptativas que sejam contextualmente apropriadas e eficazes. Tal perspectiva fundamenta e justifica amplamente a relevância do presente estudo, que se propõe a abordar as lacunas existentes no conhecimento e a contribuir para o fortalecimento da resiliência das infraestruturas portuárias nas áreas mais vulneráveis às mudanças climáticas.

A Figura 3 ilustra a distribuição das publicações relacionadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) presentes na base de dados analisada. Importante destacar que o critério adotado para a inclusão de um artigo em um ou mais ODS não se limita apenas à centralidade do tema abordado, mas também considera suas correlações e interações com outros objetivos. Esse método permite que um mesmo artigo seja associado a múltiplos ODS, refletindo a complexidade e a interdependência das questões discutidas.

No que diz respeito às ODS, as publicações do repositório revelam uma predominância expressiva da ODS 13, "Ação contra a Mudança Global do Clima", com 290 publicações. Esse alto número evidencia a centralidade das questões climáticas na pesquisa científica contemporânea, refletindo o crescente reconhecimento da urgência e da necessidade de ações concretas para mitigar os impactos das mudanças climáticas. A ODS 14, "Vida na Água", com 229 artigos, destaca a preocupação com a preservação e a restauração dos ecossistemas marinhos, enfatizando a importância de ações para combater a poluição dos oceanos e proteger a biodiversidade marinha, que é essencial para a sustentabilidade ambiental e econômica global.

A ODS 9, "Indústria, Inovação e Infraestrutura", que reúne 88 publicações, reflete o foco crescente na modernização e na resiliência das infraestruturas, especialmente no que se refere às infraestruturas portuárias, essenciais para o comércio global e a conectividade. A adaptação dessas infraestruturas às mudanças climáticas, como a elevação do nível do mar e o aumento de eventos climáticos extremos, é um tema central nas publicações relacionadas a essa ODS. Por fim, a ODS 11, "Cidades e Comunidades Sustentáveis", representada por 20 artigos, sublinha a relevância das questões urbanas e da resiliência das cidades costeiras. Esse foco destaca a importância de promover o desenvolvimento sustentável e a adaptação das áreas urbanas para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas, como a elevação do nível do mar, a intensificação de eventos climáticos extremos e a necessidade de infraestrutura resiliente.

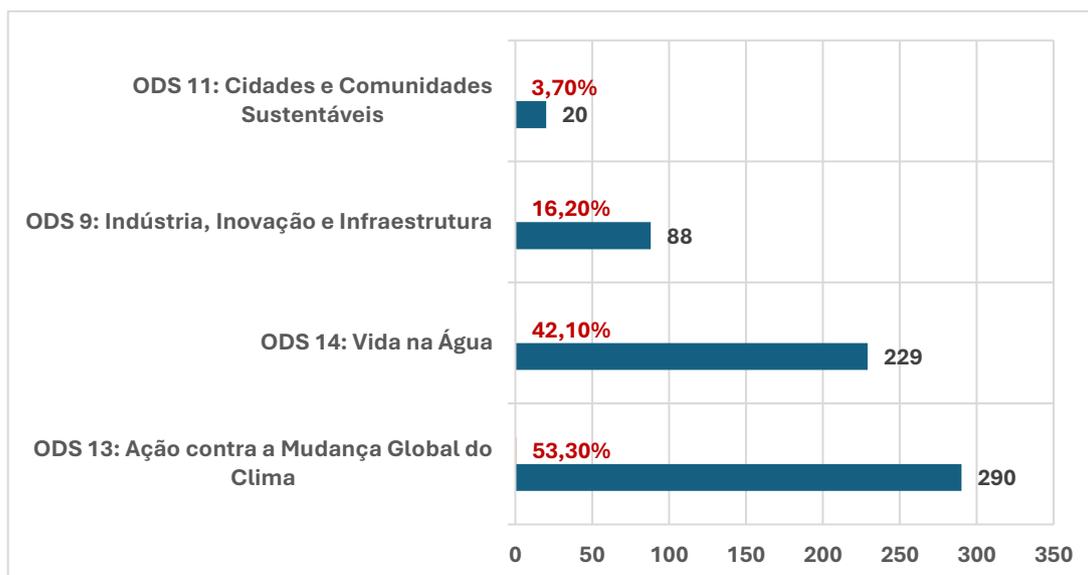


Figura 3: Distribuição das publicações por Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Fonte: elaborado pelos autores.

Esses dados não apenas revelam a prevalência de certos ODS na pesquisa científica atual, mas também indicam uma interconexão crescente entre as diferentes metas globais. A sobreposição de temas entre as ODS destaca a necessidade de abordagens integradas, que considerem a complexidade dos desafios globais e a urgência de soluções interligadas para promover a sustentabilidade e a resiliência em escala global. Além disso, a interdependência entre os ODS reflete a compreensão de que os desafios contemporâneos não podem ser resolvidos isoladamente, sendo fundamental o esforço conjunto para alcançar soluções eficazes e sustentáveis.

4. Revisão Sistemática

Esta seção apresenta uma análise sistemática e abrangente sobre os desafios e estratégias de adaptação e expansão portuária diante da elevação do nível do mar, a infraestrutura, geopolítica e sustentabilidade na Rota do Mar do Norte e a governança e sustentabilidade na resiliência portuária frente às mudanças climáticas. A elevação do nível do mar ameaça diretamente a infraestrutura portuária, exigindo soluções como a elevação de cais, barreiras contra inundações e o uso de tecnologias para monitoramento de riscos. Além disso, a integração de ecossistemas naturais e o planejamento territorial sustentável são fundamentais para a adaptação climática.

A Rota do Mar do Norte ganha relevância com o degelo no Ártico, reduzindo o tempo de transporte entre Ásia e Europa, mas gerando desafios ambientais e geopolíticos. O aumento do tráfego marítimo exige regulamentações eficazes e infraestrutura sustentável para minimizar impactos ecológicos e garantir a viabilidade econômica da rota. Além disso, a resiliência portuária frente às mudanças climáticas depende de uma governança eficaz, com colaboração entre governos e setor privado para fortalecer a infraestrutura, mitigar riscos e promover a descarbonização das operações portuárias. Essas estratégias são essenciais para garantir a competitividade e sustentabilidade dos portos no cenário global.

4.1. Adaptação e Expansão Portuária Frente à Elevação do Nível do Mar



A infraestrutura portuária desempenha um papel central na economia global e tem registrado expressiva expansão nas últimas décadas. Projeções indicam que a demanda por capacidade portuária continuará crescendo, exigindo tanto a ampliação de áreas existentes quanto a modernização dos portos para enfrentar os desafios impostos pela elevação do nível do mar e manter os níveis operacionais (DOS SANTOS; DE ABREU; SANTOS, 2025). Estima-se que, até 2050, a necessidade de áreas para manuseio portuário poderá ser de duas a quatro vezes maior do que em 2010, dependendo do cenário considerado. No cenário de maior movimentação de mercadorias e ausência de ações de mitigação climática, a demanda pode alcançar 5.054 km², enquanto o cenário de menor intensidade, associado à regionalização da produção de energia verde, projeta uma demanda mínima de 2.510 km².

Para enfrentar esses desafios, diversas medidas de adaptação têm sido propostas e implementadas em diferentes portos ao redor do mundo. O Quadro 2 a seguir detalha as principais medidas, categorizando-as em adaptações estruturais, não estruturais e soluções baseadas na natureza, oferecendo uma visão abrangente das abordagens possíveis para fortalecer a resiliência portuária frente à mudança do clima.

Quadro 2: Principais medidas de adaptação

| Categoria | Medida de Adaptação | Descrição |
|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| Estruturais | Barreiras de Proteção | Construção de diques, barreiras e muros de contenção. |
| | Elevação de Cais | Aumento da altura dos cais para prevenir inundações e garantir operações seguras. |
| | Reforço das Infraestruturas | Fortalecimento de infraestruturas existentes para resistir a eventos climáticos extremos, como tempestades e inundações. |
| Não Estruturais | Planos de Contingência | Desenvolvimento de procedimentos de emergência e planos de resposta. |
| | Políticas de Zoneamento | Implementação de políticas de zoneamento que restrinjam construções em áreas de alto risco e incentivem práticas de desenvolvimento sustentável. |
| | Educação e Treinamento | Programas de educação e treinamento para a comunidade portuária sobre práticas sustentáveis e preparação para desastres. |
| Soluções Baseadas na Natureza | Restauração de Manguezais | Utilização de manguezais para absorver ondas de tempestade e aumentar a resiliência das linhas costeiras contra erosão e inundações. |
| | Criação de Recifes Artificiais | Instalação de recifes artificiais para proteger as costas e promover a biodiversidade marinha, ajudando a dissipar a energia das ondas. |
| | Infraestrutura Verde | Implementação de áreas verdes ao redor das instalações portuárias para ajudar na absorção de água de chuvas intensas e reduzir o escoamento superficial. |



Os investimentos globais para adaptação e expansão da infraestrutura portuária variam entre 223 e 768 bilhões de dólares até 2050, com a maior parcela destinada à construção de novas áreas. A adaptação de infraestruturas existentes à elevação do nível do mar representa, no máximo, 6% desses custos totais (HANSON; NICHOLLS, 2020).

O crescimento do comércio internacional está diretamente associado à expansão populacional e à atividade econômica (KECK et al., 2018). Projeções indicam que a demanda global por transporte de carga poderá aumentar de três a sete vezes até 2050 (IMO, 2015), enquanto a movimentação de contêineres deverá crescer 73% no mesmo período, alcançando 2,2 bilhões de unidades anuais (OECD/ITF, 2017). A capacidade portuária atual, no entanto, será insuficiente para atender a esse aumento, exigindo investimentos substanciais em infraestrutura e eficiência operacional (ADB, 2010; OECD, 2011; OECD/ITF, 2016). A redistribuição do comércio marítimo e os impactos da elevação do nível do mar impõem desafios adicionais à modernização portuária. Embora a adaptação de portos existentes seja amplamente discutida (ASARIOTIS et al., 2018), a magnitude do impacto climático demanda abordagens mais abrangentes. Hanson; Nicholls (2020) ressaltam que os custos de expansão portuária tendem a superar significativamente os da adaptação de infraestruturas já estabelecidas. Nesse contexto, a política climática desempenhará um papel central na definição das condições comerciais e dos requisitos de infraestrutura.

Historicamente, mudanças no comércio foram abordadas por meio da modernização dos métodos de transporte, como a padronização de contêineres, que aprimorou a eficiência no manuseio de cargas e a utilização do espaço portuário (DOS SANTOS; DE ABREU; SANTOS, 2024). Esses avanços evidenciam a necessidade de integrar inovações tecnológicas às estratégias de expansão portuária. No entanto, tais iniciativas devem ir além da replicação de padrões existentes, incorporando soluções que enfrentem os desafios impostos pelas mudanças do clima (HANSON; NICHOLLS, 2020). Diante da inevitabilidade da elevação do nível do mar, torna-se essencial que os planejamentos portuários integrem projeções atualizadas e metodologias aprimoradas para mitigar riscos futuros. Estudos como o de Thoresen (2014) indicam que, embora parcialmente adequadas, as práticas atuais ainda não contemplam plenamente a magnitude dos desafios climáticos (PIANC, 2020; TOIMIL et al., 2020). Além disso, os custos associados a sistemas avançados de manuseio e estruturas de proteção permanecem subestimados, conforme apontado por McCarron et al. (2018).

4.2. Infraestrutura, Geopolítica e Sustentabilidade na Rota do Mar do Norte

A contínua redução da cobertura de gelo no Ártico tem impulsionado a reconfiguração das rotas marítimas, gerando novas oportunidades e desafios para a navegação transártica. Em particular, a Rota do Mar do Norte (NSR) surge como uma alternativa promissora às tradicionais vias comerciais, como o Canal de Suez, permitindo a conexão entre a Ásia e a Europa com uma redução de até 40% no tempo de navegação (LIU; KRONBAK, 2010). Esse potencial logístico tem atraído o interesse de diversas nações, especialmente China, Coreia do Sul e Japão, que buscam mitigar custos e riscos geopolíticos associados às rotas convencionais (KIRGIZOV-BARSKII, 2021).

A crescente acessibilidade da Rota do Mar do Norte (NSR) pode favorecer portos europeus no Mar do Norte, como Roterdã, Hamburgo e Antuérpia, consolidando-os como hubs estratégicos para o comércio entre Ásia e Europa. Países como Noruega e Reino Unido também podem fortalecer sua posição logística, aproveitando a reconfiguração do tráfego marítimo para captar investimentos e aprimorar sua infraestrutura portuária (KIRGIZOV-BARSKII, 2021). Do ponto de vista geopolítico, a expansão da NSR reduz a dependência



européia do Canal de Suez, mitigando riscos associados a bloqueios e instabilidades no Oriente Médio (BAYIRHAN; GAZİOĞLU, 2021). Essa mudança afeta rotas estratégicas sob forte influência norte-americana, tornando a NSR uma alternativa geopolítica relevante.

Embora a NSR esteja inteiramente dentro da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) da Rússia, sua governança já está consolidada, com o país exercendo controle rigoroso sobre o tráfego marítimo e investindo significativamente em infraestrutura portuária e em uma frota de quebra-gelos para garantir a viabilidade da rota. Em contraste, a Passagem do Noroeste (NWP), situada no arquipélago canadense, enfrenta incertezas jurídicas, pois atravessa a ZEE de múltiplos países, incluindo Canadá, Estados Unidos e Dinamarca, dificultando a definição de uma regulamentação unificada (BOYLAN, 2021). Enquanto a Rússia impõe tarifas e regulações sobre o tráfego na NSR, independentemente de contestações internacionais, o Canadá ainda não consolidou sua autoridade sobre a NWP, ampliando as incertezas para operadores marítimos e potenciais investidores. Esse descompasso regulatório pode comprometer a atratividade comercial da NWP, especialmente na ausência de um consenso internacional sobre a sua governança.

Nos últimos anos, a crescente relevância geopolítica do Ártico tem despertado o interesse de diversas potências, incluindo os Estados Unidos. O governo de Donald Trump em declarações recentes, demonstrou interesse estratégico tanto no Canadá quanto na Groenlândia – esta última um território autônomo sob soberania da Dinamarca – devido ao seu potencial papel na configuração das novas rotas marítimas e na ampliação da influência norte-americana na região. Essa mudança no eixo geopolítico reflete a crescente valorização do Ártico como um espaço estratégico, não apenas para comércio e transporte, mas também para projeção de poder e controle de recursos naturais.

Apesar dos benefícios econômicos potenciais, a plena utilização da NSR enfrenta desafios significativos. A infraestrutura portuária no Ártico e no Mar do Norte ainda não está preparada para um aumento substancial no tráfego marítimo, e os investimentos necessários para viabilizar essa expansão permanecem incertos, em grande parte devido a questões geopolíticas (VICENTIY, 2021). A governança da NSR é relativamente estável devido ao controle russo, mas a da NWP dependerá da cooperação entre os países envolvidos, tornando sua viabilidade futura mais incerta (BOYLAN, 2021).

O crescimento do tráfego na região ainda gera preocupações ambientais, uma vez que o aumento da movimentação de embarcações pode resultar em vazamentos de óleo, perturbação dos ecossistemas marinhos e emissão de poluentes, impactando negativamente a biodiversidade ártica (SHARAPOV, 2023). As condições climáticas extremas e a variabilidade do gelo impõem riscos operacionais aos navios, tornando necessária a utilização de embarcações especializadas, o que eleva os custos logísticos (BABIN; LASSERRE; PIC, 2019). Em suma, o futuro dessa rota dependerá do equilíbrio entre investimentos em infraestrutura, acordos regulatórios internacionais e a adoção de práticas sustentáveis que minimizem os riscos ao ecossistema ártico.

4.3. Governança e Sustentabilidade na Resiliência Portuária Frente às Mudanças Climáticas

A mudança do clima impõe desafios crescentes às infraestruturas portuárias, exigindo não apenas adaptações físicas, mas também novas abordagens de governança. Nesse contexto, torna-se essencial a realização de uma Análise de Risco Climático robusta, que considere os principais componentes de risco: perigo, exposição e vulnerabilidade (IPCC,



2023). O perigo está relacionado à intensidade e à frequência dos eventos climáticos extremos, como aumento do nível do mar e tempestades severas. A exposição refere-se à localização e à sensibilidade das infraestruturas portuárias a esses eventos, enquanto a vulnerabilidade envolve a capacidade de adaptação e resiliência dessas infraestruturas (DE ABREU et al., 2024).

A elevação do nível do mar, inundações costeiras e estresse térmico são identificados como as principais ameaças às operações portuárias globais. Estudos apontam que portos localizados no Caribe, nas Ilhas do Pacífico e no Oceano Índico apresentam altíssimo risco até o final do século, enquanto aqueles situados no Mediterrâneo Africano e no Golfo Pérsico enfrentarão riscos muito elevados (IZAGUIRRE et al., 2020). Além disso, eventos climáticos extremos podem aumentar os períodos de paralisação das operações portuárias, resultando em perdas econômicas significativas.

A Organização Marítima Internacional (IMO) desempenha um papel central nesse processo, especialmente por meio do Código Internacional para Navios Operando em Águas Polares (*Polar Code*), que estabelece diretrizes para segurança na navegação e mitigação de riscos ambientais na região ártica. Além das regulamentações da IMO, os esforços de governança também se desenvolvem no âmbito do Conselho do Ártico, um fórum de cooperação entre os oito países da região e representantes de povos indígenas. Esse conselho tem promovido discussões sobre segurança marítima, pesquisa científica e regulamentação ambiental para mitigar os impactos do tráfego crescente no Ártico.

No entanto, com o aumento da competição econômica e geopolítica, há dúvidas sobre a capacidade do conselho em garantir um modelo de governança eficiente, principalmente diante das ações unilaterais da Rússia na Northern Sea Route (NSR) e da ausência de consenso internacional sobre a Northwest Passage (NWP) (BOYLAN, 2021). Se as rotas árticas passarem a ser utilizadas em larga escala como alternativas ao Canal de Suez e ao Canal do Panamá, é possível que uma dinâmica de competição geopolítica se intensifique entre Rússia e China, de um lado, favorecendo a NSR, e Estados Unidos e Canadá, de outro, defendendo a NWP (BOYLAN, 2021). Esse cenário pode comprometer acordos multilaterais e aumentar os desafios para a governança sustentável do Ártico, tornando ainda mais necessária a integração da Análise de Risco Climático como instrumento estratégico para a tomada de decisão.

5. Conclusão

As transformações climáticas em curso apresentam desafios significativos para a infraestrutura portuária global, especialmente no que diz respeito à elevação do nível do mar e à reconfiguração das rotas marítimas. A crescente vulnerabilidade das áreas costeiras exige não apenas uma adaptação das infraestruturas existentes, mas também um planejamento estratégico para a criação de novos portos mais resilientes e adequados às novas dinâmicas do comércio global. Nesse sentido, a expansão das áreas de manuseio portuário se apresenta como uma medida essencial para enfrentar o aumento da demanda por infraestrutura, ao mesmo tempo em que se torna fundamental a aplicação de tecnologias inovadoras que aumentem a durabilidade e resistência das instalações portuárias frente aos impactos das mudanças climáticas. As projeções de crescimento do volume de comércio, juntamente com



os riscos associados às mudanças nas rotas marítimas, indicam a necessidade de uma abordagem holística e integrada para garantir a continuidade do fluxo global de mercadorias de maneira eficiente e sustentável.

A adaptação portuária para enfrentar as consequências da mudança climática não deve ser vista apenas como um desafio, mas também como uma oportunidade estratégica para a implementação de soluções inovadoras. A exploração de novas rotas marítimas, como as passagens no Ártico, oferece possibilidades significativas de descompressão das rotas tradicionais, mas também implica em novos riscos ambientais e geopolíticos. Nesse contexto, a governança global desempenha um papel central para garantir que as transformações no comércio marítimo sejam acompanhadas de regulamentações rigorosas e práticas sustentáveis, que minimizem os impactos ambientais e promovam a segurança da navegação. A colaboração internacional, aliada ao uso de tecnologias avançadas e à implementação de políticas públicas eficazes, será essencial para que os portos possam se adaptar às condições emergentes e para que o comércio global continue sendo um motor de desenvolvimento econômico.

As lacunas existentes na literatura e nas práticas atuais evidenciam a necessidade de mais pesquisas sobre as implicações da mudança climática para a adaptação portuária. O estudo das novas rotas marítimas, em conjunto com a análise das vulnerabilidades específicas das infraestruturas portuárias, deverá ser um campo de investigação prioritário nas próximas décadas. A integração entre as ciências climáticas, a engenharia portuária e as políticas públicas são fundamentais para o desenvolvimento de soluções adaptativas eficazes. Além disso, as diretrizes propostas neste artigo fornecem um ponto de partida importante para o desenvolvimento de estratégias que assegurem a resiliência das infraestruturas portuárias, garantindo a continuidade do comércio global frente às adversidades climáticas e às transformações no panorama marítimo.

Referências Bibliográficas

ASIAN DEVELOPMENT BANK – ADB. Infrastructure for a Seamless Asia. Asian Development Bank, 2010. Disponível em: <https://www.adb.org>. Acesso em: 26 nov. 2024.

ASARIOTIS, R. *et al.* Climate Change Impacts on Seaports: A Growing Threat to Sustainable Trade and Development. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2018.

BOYLAN, B. M. Increased maritime traffic in the Arctic: Implications for governance of Arctic sea routes. *Marine Policy*, v. 131, p. 104566, 2021.

BRZEZINSKI, R.; BARTOSIK, M. The Arctic Route: Challenges and Opportunities for Global Shipping. *Journal of Maritime Affairs*, v. 18, n. 2, p. 145-162, 2019.

CHIRCOP, A. Climate change and the prospects of increased navigation in the Canadian Arctic. *WMU Journal of Maritime Affairs*, v. 6, n. 2, p. 193-205, 2007.

DE ABREU, V. H. S. *et al.* Climate change adaptation strategies for road transportation infrastructure: A systematic review on flooding events. *Transportation Systems*



Technology and Integrated Management, p. 5-30, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1517-0_2

DE ABREU, V. H. S. *et al.* Análise de riscos climáticos em infraestruturas de transportes: uma exploração metodológica. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, v. 18, n. 1, p. 28-44, 2024. <https://doi.org/10.19180/2177-4560.v18n12024p28-44>

DE ABREU, V. H. S.; SANTOS, A. S.; MONTEIRO, T. G. M. Climate change impacts on the road transport infrastructure: A systematic review on adaptation measures. Sustainability, v. 14, n. 14, p. 8864, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14148864>

DOS SANTOS, R. F.; DE ABREU, V. H. S.; SANTOS, A. S. Infraestruturas Portuárias sob Ameaça: adaptação à elevação do nível do mar e resiliência climática. PIXO - Revista de Arquitetura Cidade e Contemporaneidade, 2025.

DOS SANTOS, R. F.; DE ABREU, V. H. S.; SANTOS, A. S. Adaptação e Vulnerabilidade das Infraestruturas Portuárias Frente à Mudança do Clima: Uma Revisão Bibliográfica com Abordagem Bibliométrica. Congresso Rio de Transportes 2024, 2024.

GHOSH, A. The role of ports in global trade and economic growth. London: Maritime Studies Press, 2022.

HANSON, S.; NICHOLLS, R. The Impact of Climate Change on Global Seaport Infrastructure Demand. Maritime Policy & Management, v. 47, n. 8, p. 1051–1065, 2020.

HUMPERT, M.; RASPOTNIK, A. The future of Arctic shipping along the Transpolar Sea Route. Arctic Yearbook, v. 1, p. 281-306, 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION – IMO. Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. International Maritime Organization, 2015.

IZAGUIRRE, C. *et al.* Climate change risk to global port operations. Nature Climate Change, v. 11, p. 14-20, 2020.

KECK, A. *et al.* International Trade and Climate Policy. Environmental Economics and Policy Studies, v. 20, n. 3, p. 493–511, 2018.

KIRGIZOV-BARSKII, A. V. Development of Northern Sea Route: Prospects for International Cooperation. Russia & World: Sc. Dialogue, 2021.

LIU, M.; KRONBAK, J. The potential economic viability of using the Northern Sea Route (NSR) as an alternative route between Asia and Europe. Journal of Transport Geography, v. 18, p. 434-444, 2010.

MOSER, S. C. *et al.* Adaptation to climate change in the Northeast United States: Opportunities, processes, constraints. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, v. 17, n. 2, p. 163-185, 2012.

MUDRYK, L. *et al.* Impact of 1, 2 and 4°C of global warming on ship navigation in the Canadian Arctic. Nature Climate Change, v. 11, p. 673-679, 2021.



NICHOLLS, R. J.; HOLLIS, H. D.; NICHOLAS, W. F. Coastal adaptation to sea-level rise: strategies and challenges. *Climate Policy*, v. 14, n. 4, p. 537-551, 2014.

OECD/ITF. *Transport Outlook 2017*. Paris: OECD Publishing, 2017.

OLIVEIRA, L. P. S.; SAVIO, A. M. S. As Novas Fronteiras Marítimas do Ártico, um Desafio para a Cooperação Internacional e para o Direito. *Energia e Meio Ambiente*, p. 107, 2015.

OPPENHEIMER, M. *et al.* Sea-level rise and implications for low-lying islands, coasts, and communities. *Science Advances*, v. 5, n. 6, p. 287-295, 2019.

PIANC. *Resilience of Maritime and Inland Waterway Transport to Extreme Events*. EnviCom WG 178, 2020.

PIZZOLATO, L. *et al.* The influence of declining sea ice on shipping activity in the Canadian Arctic. *Geophysical Research Letters*, v. 43, n. 12, p. 12146-12154, 2016.

THORESEN, C. A. *Port Designer's Handbook: Recommendations and Guidelines*. ICE Publishing, 2014.

TOIMIL, A. *et al.* Climate Change Adaptation Planning in Ports. *Journal of Cleaner Production*, v. 262, p. 121–136, 2020.

SHARAPOV, D. Northern Sea route and climate change. *E3S Web of Conferences*, 2023.

VICENTIY, A. Digitalization of Arctic shipping along the Northern Sea Route. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 816, 2021.