

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS RECOMENDADAS PARA DESLASTRO EM CASOS ESPECIAIS: UMA PROPOSTA DE APLICAÇÃO À ÁREA PORTUÁRIA DO LITORAL DO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL

Eduardo Massey Lima Menezes¹

Janaina Melo Oliveira²

RESUMO

A água de lastro, essencial para a estabilidade naval, ameaça a biodiversidade ao transportar organismos entre ecossistemas. Este estudo propõe a identificação de áreas seguras para deslastro no litoral do Ceará (portos de Fortaleza, Pecém, Paracuru e Caucaia), seguindo parâmetros da IMO (50 milhas náuticas da costa e 200m de profundidade). Utilizando SIG e modelagem hidrodinâmica (*OpenDrift/Python*), simulou-se a dispersão da água em 48h (146,52 km da costa). Os resultados indicaram zonas de risco próximas a manguezais, áreas urbanas e unidades de conservação, concluindo que as áreas recomendadas para deslastro seguro devem estar a 92,8 milhas náuticas da costa, minimizando riscos de bioinvasão.

PALAVRAS-CHAVE: Água de lastro; Bioinvasão; Segurança ambiental e sanitária; Modelo hidrodinâmico; Sistemas de Informações Geográficas.

IDENTIFICATION OF RECOMMENDED BALLAST WATER DISCHARGE AREAS IN SPECIAL CASES: A PROPOSED APPLICATION TO THE PORT AREA OF THE COAST OF CEARÁ, BRAZIL

ABSTRACT

Ballast water, which is important for naval stability, poses a threat to biodiversity by transporting organisms between ecosystems. This study aims to identify safe ballast water discharge areas along the coast of Ceará (ports of Fortaleza, Pecém, Paracuru, and Caucaia), following IMO guidelines (50 nautical miles from the coast and 200 m depth). Using GIS and hydrodynamic modeling (*OpenDrift/Python*), we simulated water dispersion over 48 h (146.52 km from the coast). The results indicated risk zones near mangroves, urban areas, and conservation units. We conclude that safe discharge areas should be located 92.8 nautical miles from the coast to minimize bioinvasion risks.

¹Graduado em Ciências Ambientais e Mestrando em Ciências Marinhas Tropicais, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza-CE, Brasil, Email: edumassey@gmail.com

²Doutora em Geografia, Universidade Estadual do Ceará- UECE, Fortaleza-CE, Brasil, Email: jana.melo@uece.br

KEYWORDS: Ballast water; Bioinvasion; Environmental and sanitary safety; Hydrodynamic model; Geographic Information Systems.

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS RECOMENDADAS PARA EL VERTIDO DE AGUA DE LASTRE EN CASOS ESPECIALES: UNA PROPUESTA DE APLICACIÓN AL ÁREA PORTUARIA DE LA COSTA DEL ESTADO DE CEARÁ, BRASIL

RESUMEN

El agua de lastre, importante para la estabilidad naval, representa una amenaza para la biodiversidad al transportar organismos entre ecosistemas. Este estudio tiene como objetivo identificar zonas seguras para el vertido de agua de lastre en la costa de Ceará (puertos de Fortaleza, Pecém, Paracuru y Caucaia), siguiendo las directrices de la OMI (50 millas náuticas de la costa y 200 m de profundidad). Utilizando SIG y modelado hidrodinámico (*OpenDrift/Python*), se simuló la dispersión del agua durante 48 h (146,52 km de la costa). Los resultados indicaron zonas de riesgo cercanas a manglares, áreas urbanas y unidades de conservación. Concluimos que las zonas recomendadas para el vertido seguro deben situarse a 92,8 millas náuticas de la costa para minimizar los riesgos de bioinvasión.

PALABRAS-CLAVE: Agua de lastre; Bioinvasión; Seguridad ambiental y sanitaria; Modelo hidrodinámico; Sistemas de Información Geográfica.

INTRODUÇÃO

Ao longo da história, desde os fenícios, primeiros exploradores marítimos, o mar sempre influenciou os povos, seja pela colonização, comércio ou construção de rotas marítimas. O transporte marítimo é considerado a principal forma de comércio global, e a poluição marinha causada por essa atividade passou a ser debatida com mais intensidade a partir do final do século XX (GOLDBERG, 1995). A água de lastro é fundamental para manter a estabilidade dos navios durante a navegação, contudo pode causar impactos significativos no ecossistema marinho nos processos de lastro e deslastro. O constante crescimento do comércio internacional aumenta também a quantidade de água de lastro movimentada, estimada em um volume entre três e cinco bilhões de toneladas de água anualmente (POLLARD; HUTCHINGS, 1990).

Segundo Güney (2022), os principais impactos da água de lastro incluem a introdução de espécies exóticas/invasoras em regiões biogeográficas das quais não são nativas; a perda da biodiversidade local devido à introdução de espécies invasoras que competem com as espécies

nativas por habitat e alimento; impactos econômicos pelos elevados custos com controle e monitoramento das espécies invasoras; danos à saúde humana pela presença de patógenos; proliferação de flora tóxica com o transporte de fitoplânctons que causam blooms afetando aquicultura e pesca; sedimentos acumulados no tanque de lastro que escapam do sistema de pré-tratamento; e geração de subprodutos tóxicos de desinfecção (DBPs) que são lançados em grandes volumes nos portos e podem afetar organismos marinhos. A IMO (International Maritime Organization) aponta a introdução de espécies aquáticas exóticas, por meio da água de lastro ou incrustações no casco, como uma das quatro maiores ameaças aos oceanos, junto a poluentes terrestres, sobrepesca e alteração de habitats.

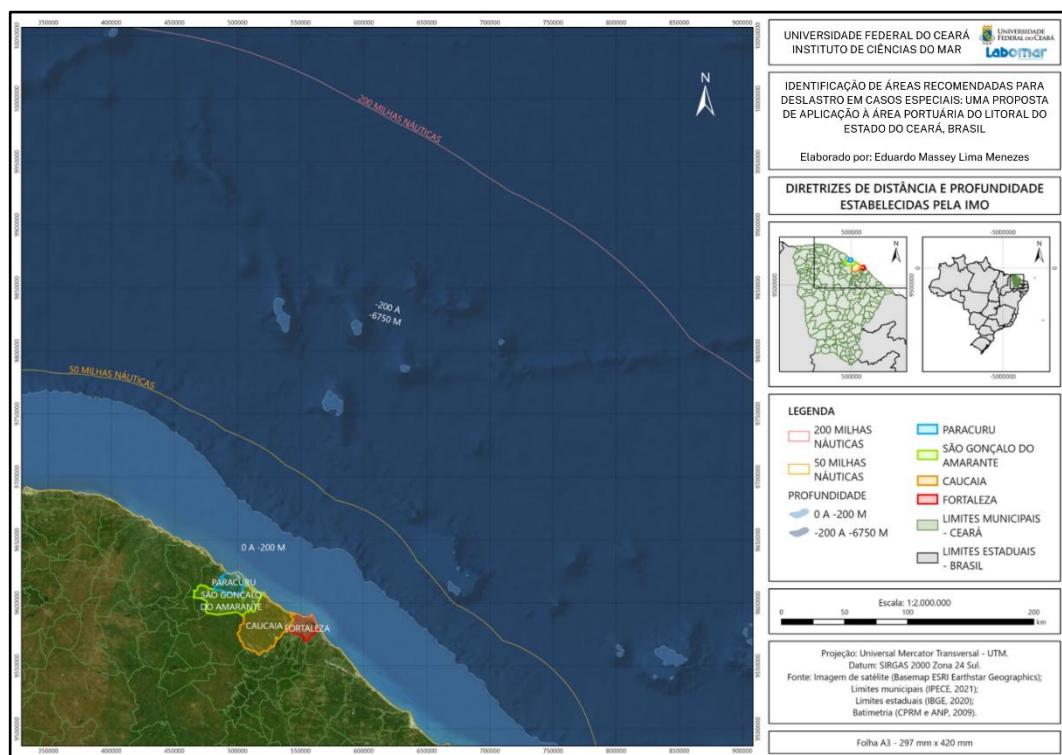
Os danos causados por espécies invasoras podem ser irreversíveis, incluindo surtos epidêmicos como a cólera, associados à água de lastro. O risco ambiental e epidemiológico do deslastro inadequado é crescente, sendo que a ANVISA (2003) classifica essas espécies como ameaças biológicas, exigindo métodos eficazes de detecção e controle. Nesse contexto, destaca-se a Convenção Internacional para Controle e Gerenciamento da Água de Lastro e Sedimentos de Navios (BWM), adotada pela IMO em 2004, que visa prevenir a introdução de organismos nocivos por meio do descarte inadequado de lastro e sedimentos, exigindo práticas seguras e sistemas de tratamento a bordo (SECRETARIA GERAL DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2022).

A BWM estabelece que a troca de água de lastro ocorra em águas oceânicas, a pelo menos 200 milhas da costa e 200 metros de profundidade. Em situações emergenciais, o deslastro pode ocorrer a 50 milhas, sem comprometer a saúde humana ou o ecossistema (**Figura 1**).

A Regulação B-4 prevê que, em casos de risco à segurança da embarcação ou da tripulação, a troca pode ser suspensa (BWM, 2004). Adicionalmente, Güney (2022), Lakshmi et al. (2021) e Zendehboudi et al. (2024) apontam que regulações internacionais apresentam falhas no cumprimento e dificuldades operacionais, salientando que o monitoramento regular nos portos e inovação tecnológica em tratamentos que não produzam compostos tóxicos são formas necessárias para lidar com o problema.

Com cerca de 9000 km entre as latitudes 4°N e 34°S (SHORT; KLEIN, 2016), o Brasil mantém comércio marítimo intenso com diversas regiões, sendo exposto a riscos ambientais, como o da espécie invasora *Limnoperna fortunei* (mexilhão dourado), que se fixa em substratos duros (CARMO, 2008). A água de lastro contribui para a homogeneização biológica global e, segundo o ministro Pedro Brito, 95% do comércio exterior brasileiro é marítimo (CPP, 2009), tornando a situação ainda mais sensível. De acordo com Costa-Areglado et al. (2025), existe desigualdade nos estudos realizados sobre o problema da água de lastro no mundo concernente a aspectos biológicos, geográficos e sedimentológicos. O Brasil apresentou 83 estudos, mas apenas dois com amostragens reais da água de lastro, sem abordagem de sedimentos. Sampaio Franco et al. (2024) utilizaram um banco de dados para identificar impactos de espécies invasoras na costa brasileira, apontando que o transporte marítimo e a água de lastro se destacam como vetores de introdução dessas espécies nas águas nacionais.

Figura 1: Diretrizes de distância e profundidade estabelecidas pela IMO.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Diante da lacuna de estudos geoespaciais aplicados à gestão da água de lastro no Brasil, este estudo objetiva identificar áreas ambiental e sanitariamente seguras para o deslastro em

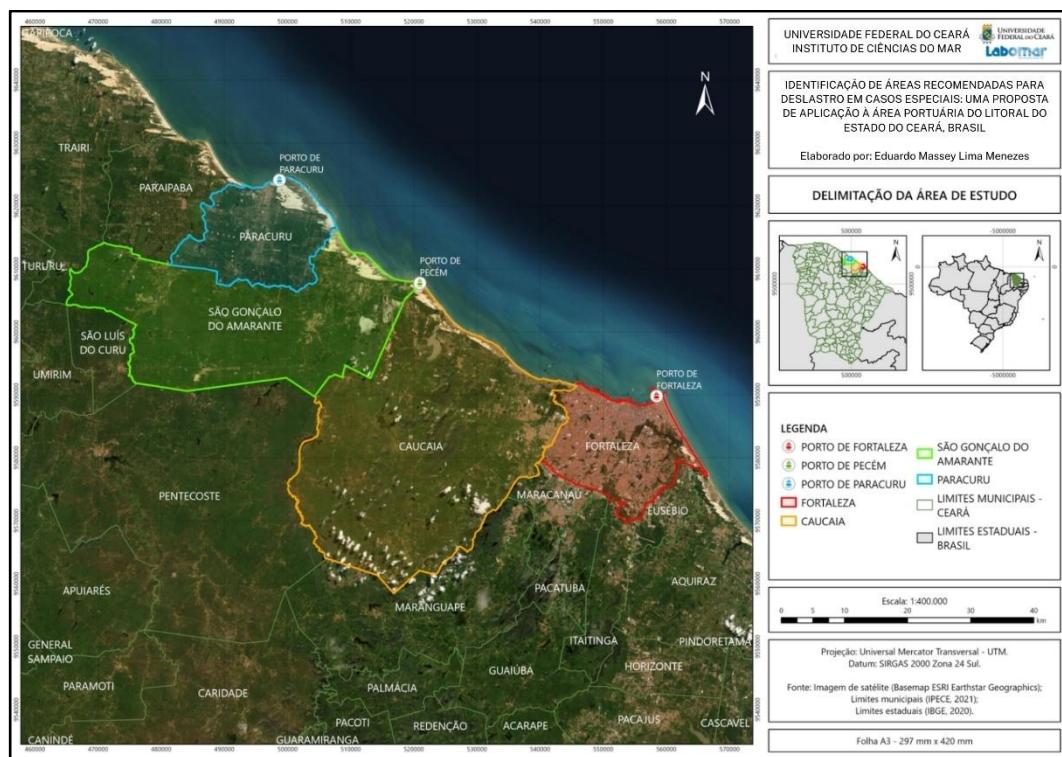
situações especiais no litoral cearense, utilizando ferramentas de geoprocessamento e modelagem hidrodinâmica, conforme os critérios da Convenção Internacional da IMO.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Delimitação da área de estudo

A plataforma do Ceará localiza-se entre 37° e $41^{\circ}20' O$ e 2° a $5^{\circ} S$, com profundidades de 10–100 m e declive médio de cerca de 2 m/km (DIAS, 2011). O litoral apresenta marés semidiurnas com período médio de 12,4 h e amplitudes de até 3 m (MORAIS, 1980). A área de estudo (**Figura 2**) abrange as zonas portuárias de Fortaleza, São Gonçalo do Amarante e Paracuru, que sediam os portos de Fortaleza, Pecém e Paracuru, respectivamente. Inclui-se também Caucaia, devido à sua posição limítrofe ao Porto do Pecém e vulnerabilidade decorrente da proximidade com atividades portuárias.

Figura 2: Delimitação da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Fortaleza, capital cearense, localiza-se em 3°47' S e 38°30' O, com 312,35 km² de área, 34 km de litoral e cerca de 2,7 milhões de habitantes (IBGE, 2021). A temperatura varia entre 26°C e 32°C (BRANDÃO, 1995), com ventos mais intensos entre agosto e outubro e mais fracos de março a abril, devido à ZCIT. A precipitação ocorre de janeiro a junho, com maior intensidade entre fevereiro e maio (MAGALHÃES; ZANELLA, 2011). Abriga o Porto de Fortaleza, situado na enseada do Mucuripe, é um terminal estratégico que atende rotas para Europa, América do Norte, Caribe, África e portos nacionais via cabotagem (CDC, [202-]).

São Gonçalo do Amarante, com 842,64 km² e população de 49.306 (IBGE, 2021), abriga o Porto do Pecém, um terminal Offshore localizado na Ponta do Pecém (3°32'02" S e 38°47'58" O), destacando-se pela proximidade com EUA, Europa e norte da África, aumentando sua competitividade no mercado externo (COMPLEXO DO PECÉM, 2009).

Paracuru, há 84 km da capital, possui 304,73 km² e população estimada de 35.526 (IBGE, 2021), abrigando ecossistemas costeiros e manguezais. O Porto de Paracuru, ou Base da Petrobras, está na Praia da Pedra Rachada e oferece apoio logístico à exploração de campos em águas rasas da Bacia do Ceará (EPBR, 2020).

Caucaia, considerado por estar entre Fortaleza e São Gonçalo do Amarante, apresenta risco de contaminação biológica devido à proximidade com áreas portuárias, possuindo 1.223,25 km² e população estimada em 368.918 habitantes (IBGE, 2021).

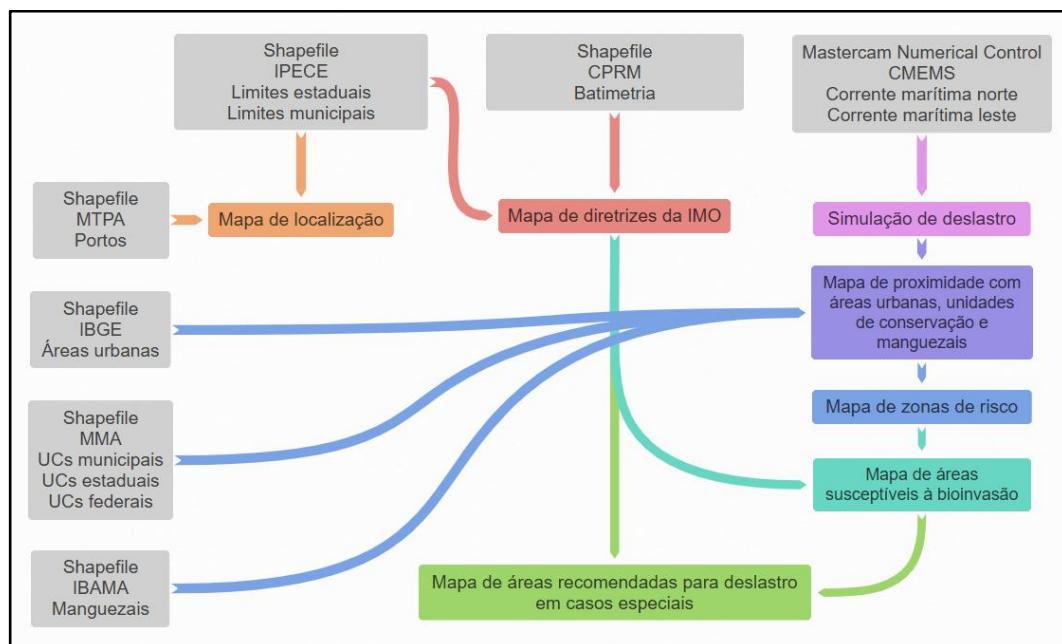
Materiais

O mapa das áreas suscetíveis à bioinvasão marinha foi gerado pela sobreposição de três mapas: proximidade com áreas urbanas, Unidades de Conservação (UCs) e manguezais. Cada mapa definiu zonas de risco baseadas na capacidade de movimentação de contaminantes. As análises foram feitas separadamente e integradas posteriormente (TELES; SAITO, 2004). Essa sobreposição foi combinada aos mapas de batimetria oceânica e *buffer*, respeitando os critérios de profundidade mínima de 200 metros e distância de 50 milhas náuticas da costa, conforme o regulamento B-4, parágrafo 2, da Convenção Internacional da IMO (2004), resultando no mapa final com as áreas recomendadas para deslastro.

As áreas urbanas foram incluídas devido ao risco à saúde pública por patógenos na água de lastro, associados a doenças como cólera, febre tifoide e hepatite A. Em Fortaleza, considerou-se a orla urbana, com 15 praias usadas para lazer, esporte e trabalho, sem distinção entre elas, por apresentarem contato humano direto ou indireto. Manguezais e UCs foram incluídos pela sua fragilidade ecológica e importância na reprodução de espécies. Contaminantes químicos e espécies invasoras presentes na água de lastro podem comprometer esses ecossistemas, sendo que áreas de transição aquático-terrestre, como manguezais, sofrem mais intensamente esses impactos por serem ambientes onde a água é componente essencial.

Os procedimentos adotados são apresentados na **Figura 3**.

Figura 3: Fluxograma dos processos técnicos para a produção do mapa de áreas recomendadas para deslastro em casos especiais.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Coleta de dados e base cartográfica

Foram realizadas leituras de artigos científicos na temática de água de lastro (*ballast water*) para entender o contexto nacional e internacional, identificar a aplicabilidade dos métodos e caracterizar atributos ecológicos associados à bioinvasão marinha.

Optou-se pelo *basemap* do *ArcGIS Pro Imagery*, fornecido pela ESRI, com resolução XY de 0,00000000671487310199837 m, por sua eficiência. Foram utilizados dados de órgãos municipais, estaduais, nacionais e internacionais, com informações sobre localização dos portos, limites político-administrativos, UCs, áreas de manguezais, batimetria, zonas urbanas e correntes oceânicas (

Tabela 1).

Tabela 1: Fonte de dados obtidos.

DADOS ADQUIRIDOS	FONTE	ANO	FORMATO
PORTOS	MTPA	2019	<i>Shapefile</i>
LIMITES MUNICIPAIS	IPECE	2021	<i>Shapefile</i>
LIMITE ESTADUAL	IPECE	2021	<i>Shapefile</i>
UCS MUNICIPAIS	MMA	2020	<i>Shapefile</i>
UCS ESTADUAIS	MMA	2020	<i>Shapefile</i>
UCS FEDERAIS	MMA	2020	<i>Shapefile</i>
MANGUEZAIS	IBAMA	2021	<i>Shapefile</i>
BATIMETRIA	CPRM	2013	<i>Shapefile</i>
ÁREAS URBANAS	IBGE	2015	<i>Shapefile</i>
CORRENTE MARÍTIMA A LESTE	CMEMS	2019	<i>Mastercam Numerical Control File</i>
CORRENTE MARÍTIMA A NORTE	CMEMS	2019	<i>Mastercam Numerical Control File</i>

Fonte: Elaborado pelos autores, (2022).

Simulação de deslastro

Para estimar a distância que um organismo pode percorrer em mar aberto, utilizou-se o *Anaconda*, uma plataforma gratuita para gerenciamento de distribuições *Python*, ambientes e módulos, juntamente com o *Anaconda Navigator*, interface gráfica que facilita o uso de aplicações e o gerenciamento de pacotes e ambientes sem necessidade de comandos no terminal (CUSTÓDIO, 2017). Segundo Melo (2021), *Python* é uma linguagem de sintaxe simplificada e versátil, aplicada em áreas como desenvolvimento *web*, *desktop*, servidores e ciência de dados. Após instalar as ferramentas, foi adicionado o *OpenDrift*, pacote *Python* usado para simular trajetórias e o destino de substâncias ou objetos à deriva no oceano (DAGESTAD; HOPE, 2020). Para execução do modelo, empregou-se o *Visual Studio Code*, editor de código com suporte a diversas linguagens e ambientes.

O modelo hidrodinâmico utilizado foi o GLORYS12V (*Global Ocean Physics Reanalysis*), uma reanálise global de alta resolução baseada no sistema CMEMS (*Copernicus Marine Service*), usado para previsão oceânica. O modelo fornece dados médios diários e mensais sobre temperatura, salinidade, correntes, nível do mar, profundidade da camada mista e parâmetros de gelo, desde a superfície até o fundo. Os arquivos são apresentados em grade regular de 1/12° (cerca de 8 km), distribuídos em 50 níveis verticais (E.U. COPERNICUS MARINE SERVICE INFORMATION, [2---]).

A simulação foi realizada através do **Script 1**, com o pacote OpenDrift, usando dados do modelo Glorys (CMEMS) e seguindo os parâmetros: localização inicial em coordenadas 3,27680909°S; 37,74354434°W (há 50 milhas náuticas da costa); 100 partículas ou sementes (organismos); raio de liberação de 10 metros; distribuição vertical entre 0 e -50 m (distribuição aleatória uniforme); duração de 48 horas entre 15-17 agosto 2019, época do ano que representa o pico de intensidade dos ventos alísios no Ceará.

Script 1: Código em Python para processamento de dados.

```
from datetime import datetime, timedelta  
import numpy as np
```

```
from opendrift.models.oceandrift import OceanDrift

o = OceanDrift(loglevel=20)
time=datetime(2019, 8, 15)
buffer=.5
size=8
z=-np.random.rand(100)*50
horas=48

o.add_readers_from_list(r"C:/Users/eduma/opendrift/scripts_opendrift/cmems_mod_glo_phy_my_0.083_P1
D-m_1655285096797.nc")

# %% Imagem do percurso com profundidade colorida
o.seed_elements(lon=-37.74354434, lat=-3.27680909, z=z, number=100, radius=100, time=time)
o.run(duration=timedelta(hours=horas))

# %% Animação do percurso com profundidade colorida
o.plot(linecolor='z', buffer=buffer, show_elements=False)
o.animation(color='z', buffer=buffer, fast=True, markersize=size,
filename='animationcolorprof.mp4')

# %% Animação com background de corrente
o.animation(fast=True, markersize=size, buffer=buffer, xlabel='Corrente oceânica [m/s]',
background=['x_sea_water_velocity', 'y_sea_water_velocity'], filename='correnteof.mp4')

# %% Plotar a simulação
o.plot(fast=True, markersize=size, buffer=buffer)
o.animation(buffer=buffer, filename='simulationof.mp4')
```

Fonte: Elaborado pelos autores, (2022).

Procedimentos do mapeamento temático

Adaptando o método de Teles e Saito (2009), foram elaborados 6 mapas com o *software ArcGIS Pro 2.8.0* e 1 simulação de dispersão com o *software Visual Studio Code*.

O mapa de localização foi feito com arquivos *shapefile* do IPECE (2021) e pontos portuários do MTPA (2019), onde os municípios da área de estudo foram recortados e diferenciados por simbologia.

Para os parâmetros da IMO em casos especiais, utilizou-se *shapefile* de batimetria da CPRM (2013), agrupando as profundidades em duas faixas através das ferramentas *dissolve* e *union*: 0 a -200 m e -200 a -6750 m. Com base nos municípios selecionados, criaram-se *buffers* de 200 e 50 milhas náuticas, delimitando áreas seguras e casos especiais.

Para proximidade com áreas urbanas, unidades de conservação e manguezais, utilizando dados do IBGE, MMA e IBAMA, mediu-se a distância entre o ponto de desastro e o contaminante mais distante, usando esta distância para gerar *buffers* de alcance máximo.

Para as zonas de risco, a atribuição de valores de risco seguiu o modelo conceitual estabelecido por Teles & Saito (2009), assumindo que "a forma corporal ou peso dos contaminantes é desprezível e todo contaminante pode ser carregado na mesma velocidade da água na qual está imerso". A distância máxima observada na simulação foi utilizada como parâmetro de alcance máximo de dispersão. Esta abordagem conservativa baseia-se na "avaliação heurística do risco, fundamentada na incerteza da contaminação efetiva, que é incorporada pelo mapeamento das zonas de tamponamento dos graus de risco provável" (TELES; SAITO, 2009), justificando a segmentação da distância máxima observada em três zonas equidistantes representando riscos conforme apresentado na **Tabela 2**.

Com base no mapa de proximidade com áreas urbanas, unidades de conservação e manguezais, aplicaram-se *buffers* com 3 anéis para definir as zonas de risco por atributo.

Tabela 2: Classificações de risco.

RISCO	JUSTIFICATIVA	CLASSIFICAÇÃO
BAIXO	Área de máxima dispersão observada, com diluição substancial e menor probabilidade de chegada à costa.	1
MÉDIO	Região intermediária onde ocorre diluição parcial, mas ainda existe conectividade hidrodinâmica significativa com a costa.	2
ALTO	Área de maior concentração de partículas e menor tempo de diluição, com potencial impacto direto em ecossistemas costeiros.	3

Fonte: Elaborado pelos autores, (2022).

O método de reclassificação para áreas suscetíveis à bioinvasão baseou-se na análise multicriterial de Teles & Saito (2009), utilizando método booleano para sobreposição de mapas, atribuindo igual importância aos critérios avaliados. A metodologia seguiu essa estrutura conceitual, aplicando análise multicriterial através de álgebra de mapas, utilizando o método de sobreposição ponderada (*weighted overlay*), com cada critério (áreas urbanas, unidades de conservação e manguezais) recebendo peso igual (33,33%), justificado pela importância relevante desses ambientes. A reclassificação final seguiu distribuição linear dos valores de sobreposição (0-18), segmentada em quintis apresentados na

Tabela 3.**Tabela 3: Critérios adotados para reclassificação de potencial risco de bioinvasão.**

RISCO	JUSTIFICATIVA	CLASSIFICAÇÃO
MUITO BAIXO	$\leq 20\%$ do valor máximo	0,00 a 3,60
BAIXO	21-40% do valor máximo	3,61 a 7,20
MÉDIO	41-60% do valor máximo	7,21 a 10,80

ALTO	61-80% do valor máximo	10,81 a 14,40
MUITO ALTO	>80% do valor máximo	14,41 a 18,00

Fonte: Elaborado pelos autores, (2022).

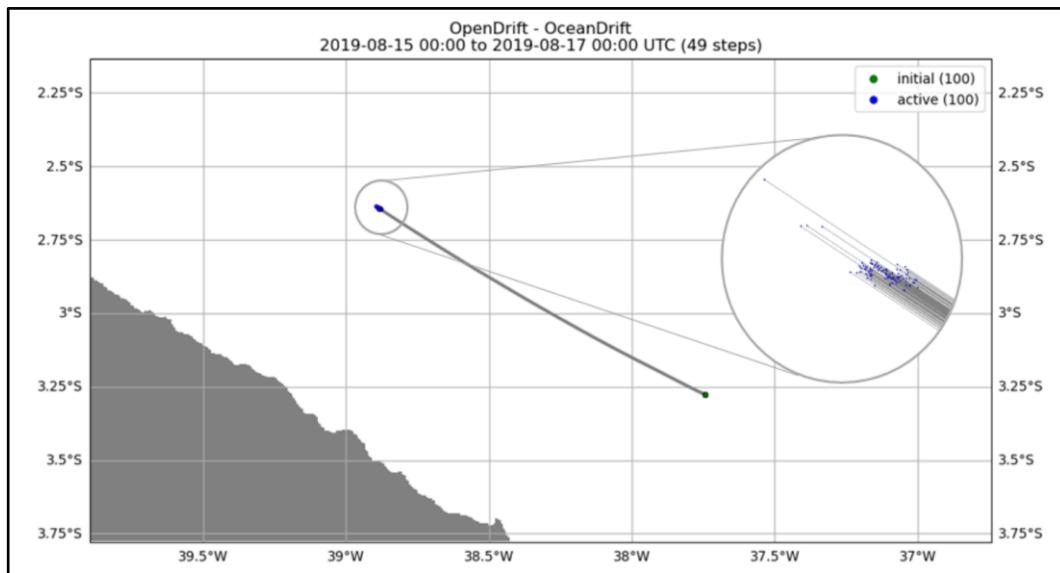
A sobreposição das áreas suscetíveis à bioinvasão com os parâmetros da IMO permitiu identificar visualmente as regiões com baixo risco e profundidade ≥ 200 m a 50 milhas náuticas da costa para definir as áreas recomendadas para deslastro.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação de dispersão revelou padrões hidrodinâmicos complexos que seguem a dinâmica da Corrente Equatorial Norte, confirmando a influência predominante dos sistemas de correntes oceânicas regionais, conforme a **Figura 4**.

A trajetória das partículas, com deslocamento de 146,52 km em direção noroeste durante 48 horas, evidencia a capacidade de transporte de organismos aquáticos através de longas distâncias, superando significativamente as estimativas iniciais baseadas nos parâmetros da Organização Marítima Internacional (IMO). A magnitude da dispersão observada no Ceará reforça a necessidade de critérios mais restritivos para o deslastro em águas oceânicas abertas.

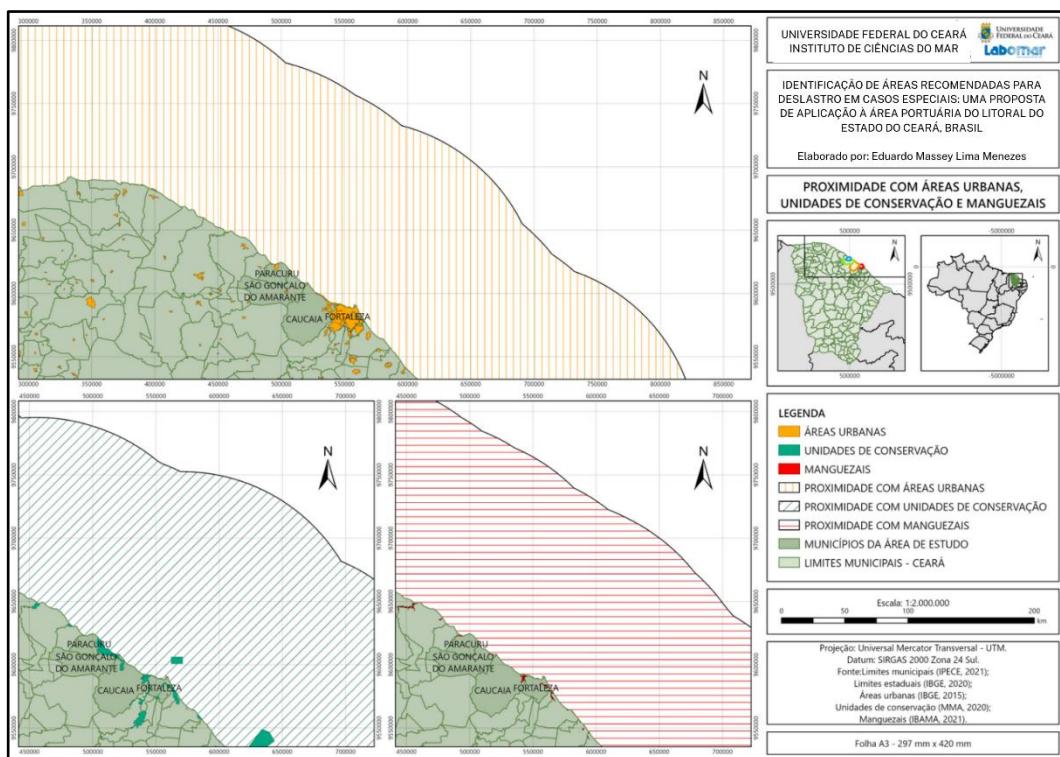
Figura 4: Simulação de trajeto de partículas entre 15 e 17 de agosto de 2019.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2022).

O valor de dispersão máxima foi utilizado para gerar os mapas de proximidade com áreas urbanas, unidades de conservação e manguezais, **Erro! Autoreferência de indicador não válida..**

Figura 5: Proximidade de 146,52 km de áreas urbanas, unidades de conservação e manguezais.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2022).

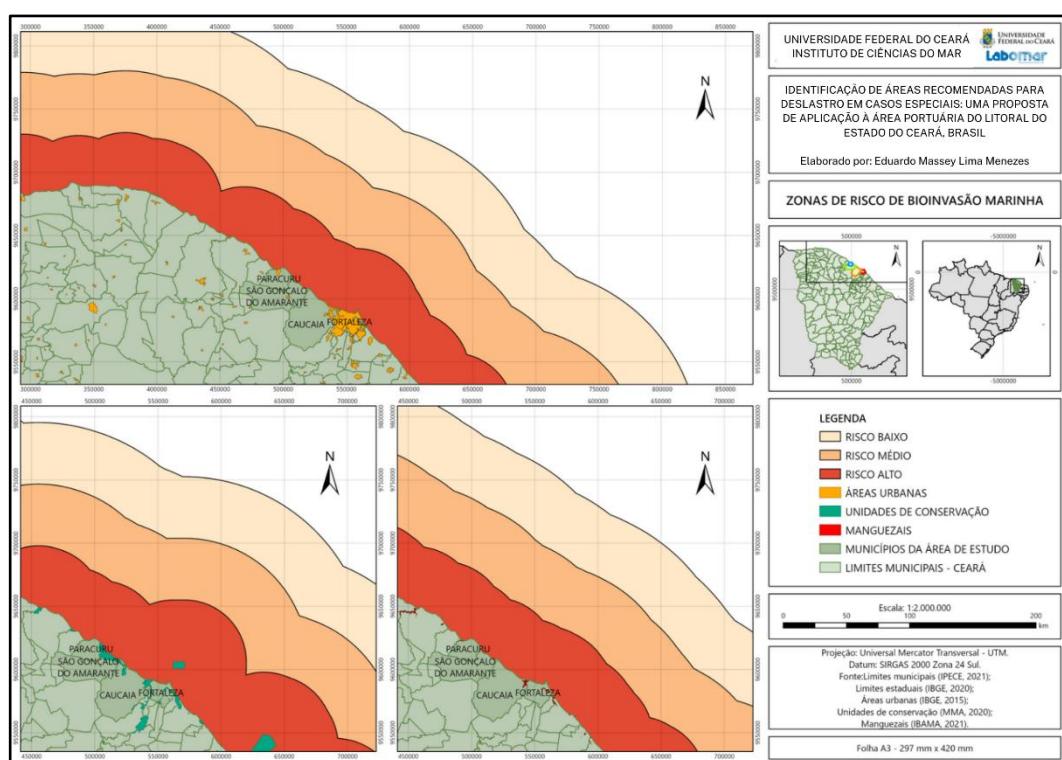
A análise espacial revelou elevada vulnerabilidade dos ecossistemas costeiros cearenses à bioinvasão marinha. Os manguezais, totalizando 3.417,61 hectares distribuídos em 101 pontos até 5 km da costa, representam as áreas de maior fragilidade ecológica. Estas zonas de transição aquático-terrestre são particularmente suscetíveis aos impactos de espécies invasoras e contaminantes químicos presentes na água de lastro, funcionando como indicadores de impacto ambiental devido à sua sensibilidade ecológica.

As áreas urbanas, abrangendo aproximadamente 405 mil hectares nos municípios estudados, apresentam risco elevado à saúde pública pela possível presença de patógenos na água de lastro. A proximidade dessas áreas com praias utilizadas para lazer e atividades econômicas amplifica o potencial de exposição humana a agentes causadores de doenças transmitidas pela água. As unidades de conservação, conforme arquivos do MMA, situam-se

mais afastadas da costa, como a RESEX Praia do Canto Verde e o Parque Marinho da Pedra da Risca do Meio.

Com base na distância de 146,52 km, foram criados três anéis de 48,84 km cada para gerar os mapas de zonas de risco, apresentados na **Figura 6**.

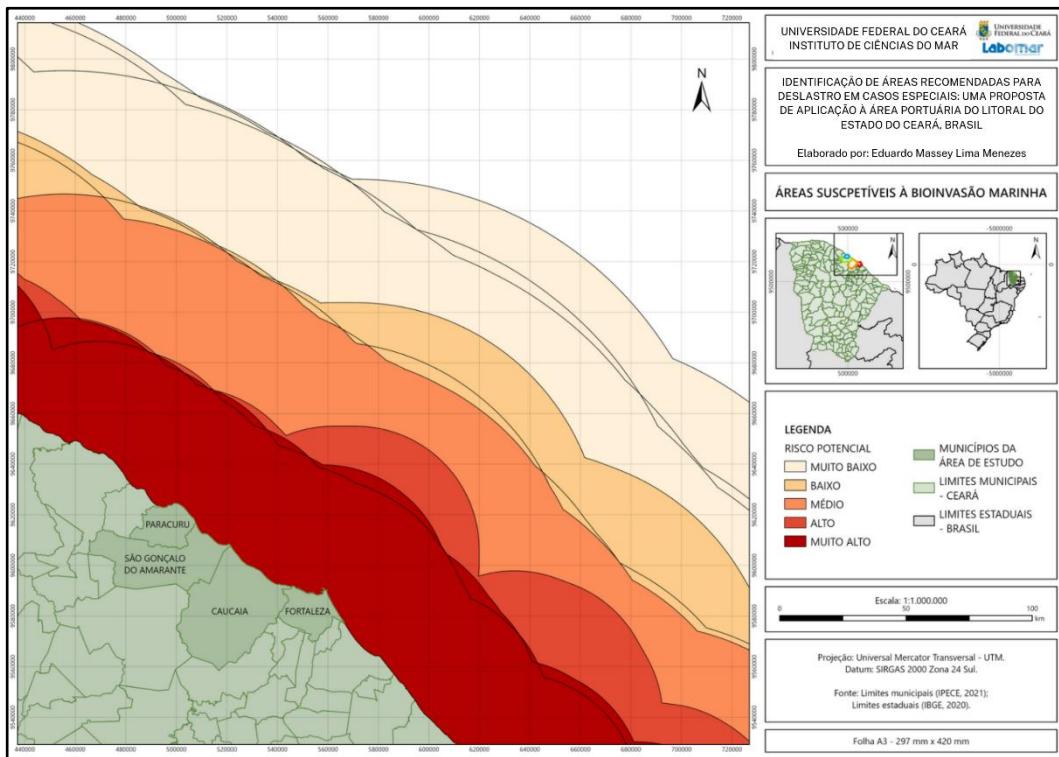
Figura 6: Zonas de riscos individuais de áreas urbanas, unidades de conservação e manguezais.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2022).

As zonas delimitam risco de contaminação baixo, médio e alto, sendo maior quanto mais próximo da costa. As três zonas, analisadas por método booleano e com peso igual, produziram o mapa das áreas suscetíveis à bioinvasão, **Figura 7**, classificadas em cinco níveis: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. As áreas com sobreposição simultânea de alto risco nos três critérios são as mais vulneráveis, enquanto as classificadas como muito baixo risco em todos os critérios foram consideradas como de menor suscetibilidade.

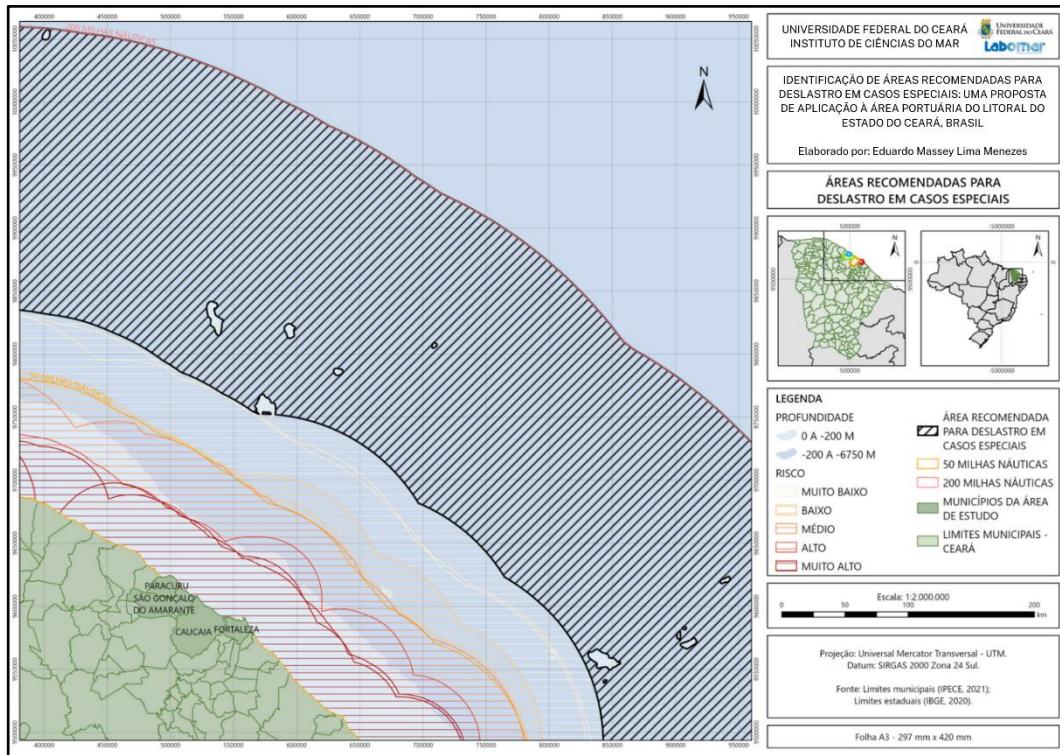
Figura 7: Áreas susceptíveis a bioinvasão marinha.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2022).

O mapa final evidencia a fragilidade das regiões costeiras frente à poluição por água de lastro e serve de alerta para maior fiscalização. A sobreposição dos mapas de suscetibilidade, profundidade ≥ 200 m e distância entre 50 e 200 milhas náuticas resultou na definição das áreas recomendadas para deslastro em casos especiais, a cerca de 172 km da costa (92,8 milhas náuticas). Esta identificação representa um avanço significativo em relação aos parâmetros mínimos da IMO (50 milhas náuticas), proporcionando maior margem de segurança para a diluição de contaminantes e redução do risco de transporte para áreas costeiras sensíveis.

As coordenadas precisas dessas áreas (apresentadas na **Figura 8**) devem ser integradas aos sistemas de monitoramento marítimo e comunicadas às embarcações através dos órgãos competentes. A implementação efetiva dessas recomendações requer coordenação entre autoridades marítimas, ambientais e sanitárias.

Figura 8: Áreas recomendadas para deslastro em casos especiais.

Fonte: Elaborado pelos autores, (2022).

Os resultados demonstram que não existe área livre de risco de contaminação em situações especiais dentro da plataforma continental próxima, reforçando a importância das medidas preventivas. A classificação de risco muito alto para áreas próximas à costa evidencia a necessidade de fiscalização rigorosa e implementação de tecnologias de tratamento de água de lastro a bordo das embarcações.

A metodologia desenvolvida permite atualizações contínuas com incorporação de novos dados oceanográficos, biológicos e sedimentológicos, proporcionando refinamento progressivo das recomendações. Esta flexibilidade metodológica é essencial para adaptação às mudanças climáticas e variações sazonais nos padrões de correntes oceânicas.

CONCLUSÕES

A pesquisa representa uma contribuição metodológica significativa para a gestão sustentável do transporte marítimo no litoral brasileiro, estabelecendo protocolo reproduzível para identificação de áreas seguras de deslastro. A integração de ferramentas de SIG, modelagem hidrodinâmica e análise multicriterial demonstrou eficácia na delimitação espacial de zonas de risco e áreas recomendadas.

A aplicação da metodologia de Teles & Saito (2009) em ambiente oceânico aberto resultou em adaptações importantes, particularmente na escala de dispersão observada. A distância de 146,52 km obtida através da simulação com *OpenDrift* representa ordem de magnitude superior à observada em ambientes costeiros semifechados, indicando necessidade de critérios diferenciados para distintos contextos geomorfológicos. A recomendação de deslastro a 92,8 milhas náuticas da costa, baseada em evidências científicas locais, supera os parâmetros mínimos internacionais e estabelece precedente para estudos similares em outras regiões costeiras brasileiras. Esta abordagem alinha-se com os princípios de desenvolvimento sustentável e proteção da biodiversidade marinha.

As ferramentas de SIG mostraram-se adequadas para a temática, possibilitando identificar, por meio da sobreposição de variáveis, a área de menor impacto ambiental entre 50 e 200 milhas náuticas da costa, com profundidade mínima de 200 metros. Os mapas gerados constituem ferramentas estratégicas para orientação de políticas públicas baseadas em evidências científicas, permitindo regulamentação específica para diferentes áreas costeiras com níveis diferenciados de controle e fiscalização. Áreas classificadas como de risco muito alto podem ser objeto de legislação mais restritiva, enquanto zonas de menor risco podem ter protocolos simplificados de monitoramento.

No âmbito do planejamento portuário, os resultados orientam a localização e dimensionamento de instalações de recepção de água de lastro nos terminais. Portos em áreas de maior risco devem priorizar investimentos em sistemas de tratamento e armazenamento temporário, enquanto a identificação das áreas recomendadas permite otimização das rotas de navegação, reduzindo custos operacionais das embarcações. A integração aos sistemas de

gestão de risco dos complexos portuários possibilita avaliação probabilística dos impactos ambientais, orientando a contratação de seguros ambientais e definição de planos de contingência.

Para o monitoramento ambiental, os mapas direcionam a instalação estratégica de estações de monitoramento biológico e físico-químico nas áreas de maior risco, maximizando a eficiência dos recursos disponíveis para vigilância. A definição das áreas críticas permite programação de missões de sensoriamento remoto para detecção precoce de floração de algas, mudanças na turbidez ou outros indicadores de impacto ambiental. A integração com dados meteorológicos e oceanográficos em tempo real viabiliza o desenvolvimento de sistema de alerta precoce para condições que aumentem o risco de dispersão de contaminantes, orientando suspensão temporária de operações quando necessário.

O estudo reforça a importância das análises ambientais e espaciais com uso de SIG, gerando produtos essenciais à saúde, resiliência e suporte do ecossistema ao indicar áreas para deslastro a partir de 92,8 milhas náuticas da costa, sempre com profundidade superior a 200 metros. Permanece válida a recomendação internacional de que o deslastro ideal deve ocorrer além das 200 milhas náuticas. A identificação de áreas próximas ao litoral não exclui a importância de outras medidas, como instalação de recipientes para resíduos nos terminais portuários e uso de tecnologias de tratamento de água de lastro (UV, ozônio ou cavitação hidrodinâmica), assegurando maior proteção ambiental e sanitária. Recomenda-se que o deslastro não seja realizado em águas costeiras para favorecer o transporte dos organismos para áreas profundas com maior diluição e reduzir os riscos de bioinvasão.

Esta contribuição inédita para a região representa um primeiro passo em direção à compreensão das questões relacionadas às águas de lastro no Ceará. Estudos de caráter biológico, sedimentológico e geográfico, lacunas apontadas por Costa-Areglado et al. (2025), são fundamentais para a região. Coletas de campo e modelagem numérica para compreender o clima de ondas, os efeitos da poluição e os processos de dispersão e purificação permitirão compreensão mais aprofundada da distribuição espacial dos impactos das águas de lastro. Face aos desafios do transporte marítimo, são necessárias ações de cooperação entre ambientalistas, gestores de unidades de conservação e autoridades ambientais, sanitárias, marítimas e portuárias. A fiscalização eficaz quanto ao deslastro e os custos operacionais das embarcações

devem ser considerados para evitar impactos econômicos nos processos logísticos. Sugere-se também trabalho de educação e conscientização voltado aos agentes envolvidos, abordando sustentabilidade, responsabilidade e ética coletiva.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA. **Brasil: água de lastro.** Brasília, fev. 2003. Disponível em: <http://bibliotecadigital.anvisa.ibict.br/jspui/handle/anvisa/409>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- BRASIL. Companhia Docas do Ceará - CDC. **Conheça o Porto.** Fortaleza, [202-]. Disponível em: <http://www.docasdoceara.com.br/conhe%C3%A7a-o-porto>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- BRASIL. Complexo do Porto do Pecém - CPP. **95% das exportações passam pelos portos.** 18 ago. 2009. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/95-das-exportacoes-passam-pelos-portos-2/>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Caucaia.** 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/caucaia.html>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Fortaleza.** 2021. Disponível em: <https://ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/fortaleza.html>. Acesso em: 28 mar. 2022.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Paracuru.** 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/paracuru.html>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **São Gonçalo do Amarante.** 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/sao-goncalo-do-amarante.html>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- BRASIL. Secretaria Geral da Presidência da República. **Decreto promulga Convenção Internacional para Controle e Gerenciamento da Água de Lastro e Sedimentos de Navios (BWM).** 2 mar. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/secretariageral/pt-br/assuntos/medio-ambiente/legisacao/decres/dec-1000-decreto-promulga-convencao-internacional-para-controle-e-gerenciamento-da-agua-de-lastro-e-sedimentos-de-navios-bwm>

<br/noticias/2022/fevereiro/decreto-promulga-convencao-internacional-para-controle-e-gerenciamento-da-agua-de-lastro-e-sedimentos-de-navios-bwm>. Acesso em: 25 mar. 2022.

BRANDÃO, R. D. L. Sistema de Informações para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza - Projeto SINFOR. Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza. Fortaleza, 1995. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/8568/1/SINFOR_Fortaleza_mapa.pdf. Acesso em: 29 mar. 2022.

CARMO, M. C. Plano de gestão de água de lastro de embarcações. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/1/924>. Acesso em: 25 mar. 2022.

COSTA-AREGLADO, F. M. P.; RUIZ, G. M.; BRANDINI, F. P. *Biological invasions via ballast water: evaluating the distribution and gaps in research effort by geography, taxonomic group, and habitat type.* Frontiers in Marine Science, v. 12, 2025. DOI: [10.3389/fmars.2025.1389559](https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1389559). Acesso em: 14 abr. 2025.

CUSTÓDIO, S. Python, Anaconda e Spyder. [S.1.], 2017. Disponível em: <https://www.bing.com/ck/a/?amp=7e99dd59d16fcbb5dd8b94fa7bf688018ed3256f8e4a98ae0b1a700d9fa85f6f9JmltdHM9MTY1NTMzNTY0OCZpZ3VpZD1mODQ0YTk3NS0wZTU3LTQ0MWEtOTZmZi02OTQ2YzAyYzJkNDcmaW5zaWQ9NTQzMQ&ptn=3&fclid=b8171b50-ed02-11ec-85fb-52b27c1bef4b&u=alaHR0cHM6Ly9f>. Acesso em: 15 jun. 2022.

DAGESTAD, K.-F.; HOPE, G. Introduction to OpenDrift. [S.1.], 2020. Disponível em: <https://opendrift.github.io/index.html>. Acesso em: 15 jun. 2022.

DIAS, F. J. D. S. Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará. São Paulo, 13 dez. 2011. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21132/tde-19042012-153907/publico/Dias_FJS_2011.pdf. Acesso em: 28 mar. 2022.

EPBR. Petrobras coloca à venda todos os campos offshore do Ceará. 2020. Disponível em: <https://epbr.com.br/petrobras-coloca-a-venda-todos-os-campos-offshore-do-ceara/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

E.U. COPERNICUS MARINE SERVICE INFORMATION. **Global Ocean Physics Reanalysis.** [S.1.], [2---]. Disponível em: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/INFORMATION. Acesso em: 15 jun. 2022.

GOLDBERG, E. D. **Emerging problems in the coastal zone for the twenty-first century.** Marine Pollution Bulletin, v. 31, n. 4-12, p. 152-158, abr./dez. 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0025326X9500102S?via%3Dihub>. Acesso em: 25 mar. 2022.

GÜNEY, C. B. **Ballast water problem: current status and expected challenges.** Marine Science and Technology Bulletin, v. 11, n. 4, p. 397-415, 2022. DOI: [10.33714/masteb.1162688](https://doi.org/10.33714/masteb.1162688). Disponível em: <https://doi.org/10.33714/masteb.1162688>. Acesso em: 14 abr. 2025.

IMO, International Maritime Organization. **International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (BWM).** 13 fev. 2004. Disponível em: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-\(BWM\).aspx#:~:text=Under%20Regulation%20B-4%20Ballast%20Water%20Exchange%2C%20all%20ships,depth%2C%20taking%20in](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-(BWM).aspx#:~:text=Under%20Regulation%20B-4%20Ballast%20Water%20Exchange%2C%20all%20ships,depth%2C%20taking%20in). Acesso em: 25 mar. 2022.

LAKSHMI, E.; PRIYA, M.; ACHARI, V. S. **An overview on the treatment of ballast water in ships.** Ocean & Coastal Management, v. 199, 2021. DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2020.105296](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105296). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569120302064>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MAGALHÃES, G. B.; ZANELLA, M. E. **Comportamento climático da região metropolitana de Fortaleza.** Mercator - Revista de Geografia da UFC, v. 10, p. 129-145, set./dez. 2011. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/694/374>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MELO, D. O que é Python? [Guia para iniciantes]. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-python-guia-para-iniciantes/>. Acesso em: 15 jun. 2022.

MICROSOFT. Visual Studio Code. Seattle, 2022. Disponível em: <https://code.visualstudio.com/docs>. Acesso em: 15 jun. 2022.

MORAIS, J. O. **Aspectos da Geologia Ambiental Costeira no Município de Fortaleza**. Fortaleza, 1980. Acesso em: 28 mar. 2022.

POLLARD, D. A.; HUTCHINGS, P. A. **A Review of Exotic Marine Organisms Introduced to the Australian Region. II Invertebrates and Algae**. Asian Fisheries Science, v. 3, p. 223-250, 1990. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284503828_A_review_of_exotic_marine_organisms_introduced_to_the_Australian_region_II_Invertebrates_and_algae. Acesso em: 25 mar. 2022.

SAMPAIO FRANCO, A. C. et al. **Dataset of the impacts of invasive alien species in Brazil**. Ecological Research, v. 39, n. 3, p. 380-390, 2024. DOI: [10.1111/1440-1703.12452](https://doi.org/10.1111/1440-1703.12452). Acesso em: 14 abr. 2025.

SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. D. F. **Brazilian Beach Systems**. [S.l.]: Springer Link, 2016. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=Tm2zDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 25 mar. 2022.

TELES, L. J. S.; SAITO, C. H. **Ballast water and sustainability: identification of areas for unballasting by geoprocessing case study in Todos os Santos Bay, Brazil**. PANAMJAS - Pan-American Journal of Aquatic Sciences, v. 4, n. 3, p. 283-293, 2009. Disponível em: [https://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_4\(3\)_283-293.pdf](https://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_4(3)_283-293.pdf). Acesso em: 25 mar. 2022.

ZENDEHBOUDI, A. et al. **Analysis of microplastics in ships ballast water and its ecological risk assessment studies from the Persian Gulf**. Marine Pollution Bulletin, v. 198, 2024. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2023.115825](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115825). Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X23012602>. Acesso em: 14
abr. 2025.