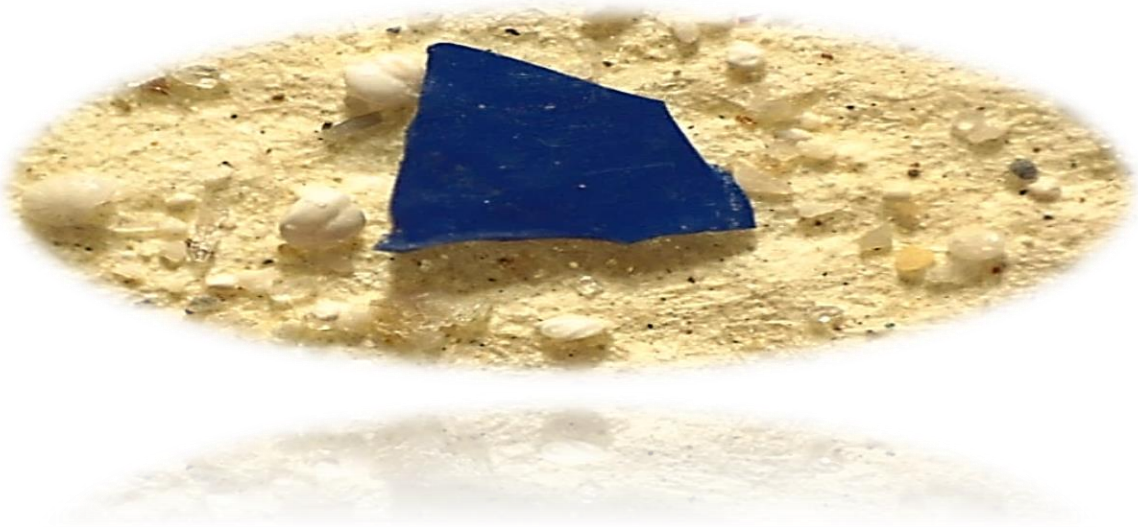
UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia Para Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

Dispersão de Microplásticos Induzida por Eventos Extremos na Baía de Pemba



Autor(a)

Shakira Ragú da Silva

Quelimane, Julho de 2025

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia Para Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

Dispersão de Microplásticos Induzida por Eventos Extremos na Baía de Pemba

Autor(a):

(Shakira Ragú da Silva)

Presidente de Júri

(Mestre Banito Magestade)

Supervisor:

(Doutor Avelino A.A. Langa)

Co-Supervisor:

(Mestre Nélio das Neves Olívio Sitoe)

Avaliador

(Prof.Doutor Fialho Paloge J. Nehama)

Quelimane, Julho de 2025

Dedicatória

"Porque Dele por Ele e para Ele são todas as coisas…" Romanos 11:36

Dedico este trabalho em primeiro lugar ao Rei dos Reis, **o *Senhor Jesus Cristo***, seguido dos pilares da minha vida, os meus amados pais, **Marcos da Silva Sapateiro** e **Abiba Ossemane Ragú Sapateiro**, as minhas brilhantes irmãs, á **Jadi**, **Elke** e **Dianne** por toda força, apoio moral, amor incondicional, e por estarem sempre comigo diante de todas adversidades.

Agradecimentos

Expresso a minha profunda reverência e gratidão ao **Altíssimo**, por me fazer cumprir o seu propósito através da reificação deste trabalho, à Ele toda Honra e toda Glória.

Aos meus pais, Marcos Da Silva Sapateiro e Abiba Ossemane Ragú, por todo amor, cuidado, investimento, apoio sem medida e por serem a minha fonte de inspiração. As minhas queridas irmãs (Jadi, Elke e Dianne) por estarem comigo em todos os momentos palavras são meramente vazias para expressar o quanto vos amo.

Manifesto a minha profunda e eterna gratidão aos meus orientadores. Ao ***Mestre*** Nélio das Neves, pela confiança delegada a mim para materialização deste trabalho, desde o início até ao fim desta jornada, pelos cavados conhecimentos transmitidos, por dedicar tempo e paciência para me instruir e auxiliar nas dificuldades, por estar sempre presente em tudo, careço de palavras a altura para expressar o quanto me sinto grata.

Ao ***Professor Doutor*** Avelino Langa, pelos valiosos conhecimentos transmitidos durante a elaboração deste trabalho, por sempre acreditar no meu potencial e me dar força, carrego comigo um enorme apreço e gratidão.

Ao Professor Doutor Rogério Manzolli pelos conhecimentos transmitidos referentes a metodologia de extração e separação de Microplásticos, e por se mostrar sempre disponível em ajudar-me, o meu muito obrigada.

Ao *Mestre* Jeremias Mocuba pelo apoio concedido através do fornecimento do aparelho que possibilitou a visualização das partículas não visíveis a olho nú, o meu muito obrigada. Ao corpo docente da Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras em especial ao Professor Doutor Hélder Machaieie, *Mestre* Noca Furaca, Doutor Emílio Alfândega, *M*estre Teófilo Ferraz, *Mestre* Anabela Cafermane, *Mestre* Carlota Alves e *Lic*. Anselmo Chaúque pelos preceitos transmitidos, por acreditarem no potencial que há em mim e pelo apoio concedido ao longo desta jornada.

Aos meus colegas cursantes de Biologia Marinha, Élio e Naíma, que prestaram o seu apoio durante as análises microscópicas, expresso a minha eterna gratidão.

Aos meus irmãos e pais na fé, em especial a minha querida “mãe” a missionária Victoria Julião, ao meu “pai” Reginaldo Muianga, aos professores da Escola Dominical que sempre estiveram comigo em torno desta jornada, a professora Cármen, prof. Adérito, prof. Jafete, prof. Hélder, aos intercessores vai o meu muito obrigada, pelo amor, cuidado, orações e sapiência ministrados em mim.

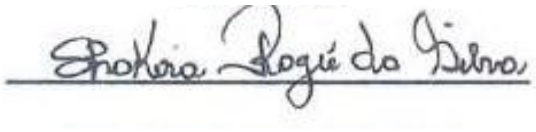
A turma de Oceanografia de 2021 (*Mateus, Edite, Stélio de Jesus, Stélio Pedro, Joel, Vânia, e ao Carmelindo*), e a família formada pela ESCMC (*ao Amilton Muhosse, João Pacule, a Loida Miguel,* e a*o Valério Matavele*) vai o meu muito obrigada pelos imparáveis momentos proporcionados ao longo deste percurso e a todos que participaram de forma indirecta e não foram cá mencionados, manifesto a minha total gratidão.

E em último lugar, quero expressar a minha gratidão a Deus pela vida da Epifania Fernando Coana, a minha amiga, grande companheira das pelejas, obrigada por te permitires ser este canal de bênção ao longo deste percurso, o meu coração transborda de amor e gratidão.

Declaração de honra

Eu, **Shakira Ragú da Silva** declaro por minha honra que esta monografia nunca foi apresentada para obtenção de qualquer grau académico e que ela constitui o resultado do meu labor individual. Cada ideia trazida de outros trabalhos foi devidamente citada e referenciada. Esta monografia é apresentada na sequência do cumprimento dos requisitos para obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia, na Universidade Eduardo Mondlane.

Quelimane, Julho de 2025



(**Shakira Ragú da Silva**)

Resumo

A região da Baía de Pemba é uma área de enorme importância ecológica para o sector marinho, reconhecida por sua rica biodiversidade em recursos marinhos e costeiros que incluem o abrigo de um dos maiores sistemas coralinos de Moçambique. Contudo, a Baía de Pemba e os recursos a ela associados, têm sido ameaçados por eventos meteorológicos extremos, como os ciclones tropicais intensos. Os ciclones tropicais são conhecidos por causar enormes destruições de infraestruturas e ecossistemas nas regiões por onde se deslocam. A par das destruições, os ciclones podem inclusive alterar a dinâmica do mar, e, por conseguinte, impactar o transporte e distribuição de diversos poluentes, incluindo os microplásticos que são partículas minúsculas, derivadas dos plásticos. A presente pesquisa teve como intuito, estudar a dispersão de microplásticos na Baía de Pemba, sob condições hidrodinâmicas normais e durante a ocorrência de eventos climáticos extremos como os ciclones tropicais. Para a sua efectivação, o estudo serviu-se do modelo Delft3D, para a simulação da hidrodinâmica e a sua influência no transporte de microplásticos da região de Pemba. Foram efectuadas simulações para o ano de 2019, período da ocorrência do ciclone tropical Kenneth, um dos mais intensos ciclones ocorridos na região do Canal de Moçambique, nos últimos 100 anos. O modelo revelou que a hidrodinâmica da região, é caracterizada por oscilações semi-diurnas da maré com a altura da maré atingindo aproximadamente 2.2 m. E com correntes associadas às marés, situaram-se entre as magnitudes máximas de 0.3 e 0.4 $m\ s^{-1}$ durante a sizígia e 0.12 $m\ s^{-1}$, na quadratura. Foi inclusivamente, analisada a ocorrência *in situ* de microplásticos para posterior identificação de locais da sua maior concentração, tendo em consideração a hidrodinâmica local normal e sob efeitos dos ventos ciclónicos. As análises *in situ* apontam para a identificação de cerca de 130 partículas de total de 9 mostras de água e 7 de sedimentos costeiros. O modelo de dispersão das partículas revelou que tanto durante a enchente quanto na vazante, as partículas foram maioritariamente transportadas para o nordeste da baía, impulsionadas pelas correntes de maré e ventos de superfície. Picos de concentração foram identificados durante a vazante em quadratura e a enchente em sizígia. Para o cenário da ocorrência do ciclone Kenneth, com ventos de magnitudes de cerca de 25 $m\ s^{-1}$ e correntes de 0.55 $m\ s^{-1}$, verificou-se a intensificação no transporte e acúmulo de partículas ao longo da costa nordeste da região.

Palavras-chave: Microplásticos, Hidrodinâmica, Eventos extremos, Ciclone Kenneth.

Abstract

The Pemba Bay region is an area of enormous ecological importance for the marine environment, recognized for its rich biodiversity in marine and coastal resources, including the shelter of one of the largest coral reefs in Mozambique. However, Pemba Bay and its associated resources have been threatened by extreme weather events, such as intense tropical cyclones. Tropical cyclones are known to cause enormous destruction of infrastructure and ecosystems in the regions through which they move. In addition to the destruction, cyclones can also alter the dynamics of the sea, and therefore impact on the transport and distribution of several pollutants, including microplastics, which are tiny particles derived from plastics. The present research aimed to study the dispersion of microplastics in Pemba Bay, under normal hydrodynamic conditions and during the occurrence of extreme weather events such as tropical cyclones. For its implementation, the study used the Delft3D model to simulate hydrodynamics and its influence on the transport of microplastics in the Pemba region. Simulations were carried out for the year 2019, the period of occurrence of tropical cyclone Kenneth, one of the most intense cyclones to occur in the Mozambique Channel region in the last 100 years. The model revealed that the hydrodynamics of the region is characterized by semi-diurnal tidal oscillations with the tide height reaching approximately 2.2 m. And with currents associated with the tides, they were between the maximum magnitudes of 0.3 and 0.4 $m\ s^{-1}$ during the spring tide and 0.12 $m\ s^{-1}$, at neap tide. The in-situ occurrence of microplastics was also analyzed to later identify the locations of their highest concentration, considering the normal local hydrodynamics and under the effects of cyclonic winds. In situ analyses indicate the identification of approximately 130 particles from a total of 9 water samples and 7 coastal sediment samples. The particle dispersion model revealed that during both the flood and ebb tides, the particles were mostly transported to the northeast of the bay, driven by tidal currents and surface winds. Concentration peaks were identified during the neap tide and the spring tide. For the scenario of the occurrence of Cyclone Kenneth, with winds of magnitudes of approximately 25 $m\ s^{-1}$ and currents of 0.55 $m\ s^{-1}$, there was an intensification in the transport and accumulation of particles along the northeast coast of the region.

Keywords: Microplastics, Hydrodynamics, Extreme events, Cyclone Kenneth.

Siglas, Símbolos Fórmulas Químicas e Unidades

WS	*Water Sample,* amostra de água
SS	*Sediment Sample,* amostra de sedimento
TPXO 8.0	*Tidal prediction experimental Oregon version 8.0,* Modelo global de marés derivado de assimilação de dados de satélite e marégrafos
ERA5	Reanálise climática global produzida pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)*
GEBCO	*General Bathymetric Chart of the Oceans*
ESCMC	Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras
JTWC	Joint Typhoon Warning Center
UEM	Universidade Eduardo Mondlane
2D	Duas Dimensões
C_D	Coeficiente de Arrasto
µm	Micrómetro(s)
H	Hora(s)
Min	minuto(s)
s	segundo(s)
cm	centímetro(s)
ml	mililitros
km	quilómetro(s)
mm	milímetro(s)
kg	quilograma(s)
g	grama(s)
m	metro(s)
^oC	Graus Celsius
%	Percentagem
m^3	metro cúbico
$m\ s^{-1}$	metro por segundo(s)

$m\ s^{-2}$	metro por segundo ao quadrado
$kg\ m^{-3}$	quilograma por metro cúbico
$Nr\ m^{-3}$	número de Partículas por metro cúbico
NaCl	Cloreto de Sódio

Índice de Figuras

Figura 1.*Massa de plástico de rio que flui para os oceanos em toneladas por ano. As contribuições fluviais são derivadas de características individuais da bacia hidrográfica, como densidade populacional, produção de resíduos plásticos mal gerenciados (MPW) por país, e escoamento médio mensal (L. C. M. Lebreton et al., 2017).* *7*

Figura 2: *Tipologia dos microplásticos: a) esfera; b: espuma; c) pellet; d) feixe de fibra; e) fibra; f)* *9*

Figura 3: *Curvas de tempo e velocidade de correntes de maré para um delta de maré vazante, ilustrando o princípio da assimetria tempo-velocidade (da Silva Neto, 2019).* *11*

Figura 4: *Padrão das correntes durante as monsões do Verão (a) e do Inverno (b) (Schott et al., 2009).* *13*

Figura 5. *Fórmula Matemática da Raiz quadrática do Erro Médio* *15*

Figura 6. *Mapa de Localização da Baía de Pemba, amostras de sedimentos (sediment samples), amostras de água (water samples).* *18*

Figura 7: *Etapas de processamento e separação dos Microplásticos em amostras de sedimento e de água.* *21*

Figura 8*.Batimetria da Baia de pemba interpolada na grelha com as fronteiras abertas referenciando à estação do Porto Amelia.* *23*

Figura 9.*Magnitude do vento usado na construção do modelo para o ano de 2019.* *24*

Figura 10.*Localização das fontes em ambos cenários analisados no modelo de transporte.* *29*

Figura 11. *Oscilação da Maré para o ano de 2019, 30 dias de simulação para o mês de Abril.* *32*

Figura 12. *Representação da série temporal da corrente de maré para o período de 30 dias do mês de Abril.* *33*

Figura 13*. Direcção e magnitude das correntes durante a fase da maré de Quadratura e de Sizígia, representação dos fluxos de entrada (enchente e vazante) para o ano de 2019.* *35*

Figura 14. *Representação da velocidade do vento e Magnitude da corrente durante a ocorrência do Ciclone Kenneth,* ***a****) modelo regional ilustrando a entrada do ciclone Kenneth,* ***b****) Direcção e Magnitude do Vento para a Baia de Pemba e* ***c****) Direcção e Magnitude da Corrente de Maré.* . *37*

Figura 15. *Alguns dos microplásticos identificados na análise, a), e), d) g), i) e k) são fragmentos, b), c) f), h), j) e l) classificam-se como fibra/filamentos.* *39*

Figura 16*. Quantidade de Microplásticos na água e em sedimentos.* *40*

Figura 17.*Quantidade de Microplásticos na água e em sedimentos.* *42*
Figura 18. *Distribuição de Microplásticos durante a enchente e vazante na maré de Quadratura e Sizígia, a), b), c) Cenário 1, d), e) e f) Cenário 2.* *45*
Figura 19. *Distribuição dos Microplásticos durante a ocorrência do ciclone no cenário 1 (**a**) e (**b**) cenário 2.*..... *47*
Figura 20. *Comparação entre a maré modelada e observada com representação do RMSE e o erro ou resíduo.*..... *48*

Índice de Tabelas

Tabela 1. *Características das Amostras de Sedimento costeiros (SS) e de Água (WS).* *17*
Tabela 2: *Categorias usadas para descrever a aparência dos Microplásticos. Fonte: Adapted in Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas,2013; Castro et al., 2020 e Corrêa (2022).*..... *20*
Tabela 3.*Descrição dos dados e constantes hidrodinâmicas usados na configuração do modelo.* *26*
Tabela 4: *Descrição dos cenários modelados.*..... *28*
Tabela 5*.Descrição dos dados e constantes hidrodinâmicas usados na configuração do modelo.* *30*
Tabela 6*. Quantificação dos Microplásticos para cada ponto de observação referente a cada instante específico representado no mapa.*..... *44*
Tabela 7: *Descrição dos materiais e equipamentos utilizados, com suas respectivas quantidades.* *65*
Tabela 8: *Dados referentes á massa inicial das amostras de sedimento, volume de água inicial das amostras de água, volume das soluções usadas no processamento.* *66*

Índice

Dedicatória I

Agradecimentos II

Declaração de honra IV

Resumo V

Abstract VI

Siglas, Símbolos Fórmulas Químicas e Uniddes VII

1. Introdução 1

1.1. Problematização 3

1.2. Justificativa 4

1.3. Objectivos 6

1.3.1. Objectivo Geral: 6

1.4. Revisão de Literatura 7

1.4.1. Microplásticos 7

1.4.2. Classificação dos microplásticos quanto á origem 8

1.4.3. Quanto ao Material 8

1.4.4. Classificação quanto ao Tipo e Forma 9

1.4.5. Classificação Quanto ao Tamanho 10

1.4.6. Correntes de maré 10

1.4.7. Ondas e Vento 11

1.4.8. Eventos Extremos 12

1.4.10. Circulação Hidrodinâmica do Canal de Moçambique 13

1.4.11. Modelação Numérica 14

2. Metodologia 16

2.1. Área de estudo 16
2.1.1. Método 17
2.1.1.1. Análises Laboratoriais 19
2.1.2. Modelação numérica 22
3. Resultados 31
3.1. Circulação Hidrodinâmica: Condições Normais da Baía de Pemba 31
3.2. Distribuição de Microplásticos na Baía de Pemba 38
3.2.2. Transporte de Microplásticos sob Condição Hidrodinâmica Normal 42
3.2.3. Circulação Hidrodinâmica - Condição de Ocorrência de Ciclone na Baía de Pemba com Transporte de Microplásticos 46
4.1.1. Circulação Hidrodinâmica da Baia de Pemba (Condição Normal e Transporte de Microplásticos) 50
4.1.2. Distribuição de Microplásticos na Baía de Pemba 53
5. Conclusões 57
6. Limitações e Recomendações 58
Referências Bibliográficas 59
ANEXOS 65

1. Introdução

A Baía de Pemba, situada na região Norte de Moçambique, constitui um sistema costeiro de proeminente relevância ecológica. A área é maioritariamente caracterizada por uma ampla entrada marinha ladeada por recifes de corais, ricos em biodiversidade e elevada produtividade ecológica que desempenham um papel crucial tanto para a conservação ambiental quanto para a subsistência das comunidades locais (INAHINA, 2013). Contudo, os ambientes recifais associados à Baía, estão cada vez mais expostos à ameaças ambientais como a poluição marinha e os impactos dos eventos climáticos extremos (Alberto & Amado, 2022).

Na última década a frequência e intensidade dos ciclones tropicais aumentaram de forma eloquente na costa de Moçambique. A ocorrência de ciclones tropicais intensifica o transporte de poluentes para a costa, promovendo a mobilização e redistribuição de sedimentos e partículas plásticas incluindo os microplásticos (Lo, *et al*., 2020). O plástico constitui actualmente, a principal componente dos detritos marinhos, representando este modo um enorme desafio para a gestão ambiental e uma oportunidade para a pesquisa científica, especialmente para a avaliação da distribuição e abundância dos microplásticos nos diversos compartimentos ambientais (Pinto & Lima, 2022). Os microplásticos são pequenas partículas com tamanho inferior a 5 mm, originadas da degradação de resíduos plásticos maiores (Thompson, *et al.,* 2004; Andrady, 2011). Os microplásticos podem ser encontrados em uma variedade de ecossistemas aquáticos, como praias, rios, lagos ou estuários, podendo estar localizados tando na coluna de água, como em sedimentos (Ivar do Sul *et al*., 2009).

No ambiente marinho, factores hidrodinâmicos como as correntes, ondas e vento desempenham um papel indispensável na dispersão e acúmulo dos microplásticos, especialmente em ilhas oceânicas (Monteiro *et al.,* 2018). A distribuição dos microplásticos ao longo das praias está associada à combinação de uma série de factores oceanográficos e meteorológicos (Carvalho, 2021). Considerando a complexidade à volta das fontes e distribuição dos microplásticos, a busca pelo seu conhecimento é fundamental para introdução de medidas com vista à redução da poluição por derivados minúsculos de plásticos e, por conseguinte contribuir para preservação dos ecossistemas marinhos (Moura *et al*., 2023).

A Baía de Pemba, configura-se como um ambiente favorável para a investigação da dispersão dos microplásticos, por ser caracterizada por correntes oceânicas dinâmicas, e uma geomorfologia costeira singular (Silva, 1996). Adicionalmente, a presença visível dos resíduos sólidos como os plásticos na Baía de Pemba levanta preocupações quanto à contaminação ambiental por microplásticos, dado que este poluente é frequentemente derivado da degradação de lixo plástico (Matias *et al*., 2022).

Uma vez presentes em ambiente marinho local, os microplásticos podem ser ingeridos por organismos marinhos e por conseguinte, comprometer a saúde dos ecossistemas, como recifes de corais (Galloway *et al*., 2017). A baía de pemba desempenha um papel estratégico na manutenção do equilíbrio ecológico regional, contudo o conhecimento científico sobre a presença, dispersão e acumulação de microplásticos permanece limitado, especialmente em contextos afectados por eventos extremos. Tal limitação adquire maior importância ao considerar a transferência destas partículas para os níveis tróficos superiores, incluindo a espécie humana, reflectindo a forte dependência dos recursos pesqueiros e evidenciando potenciais riscos a saúde pública (Auta *et al*., 2017).

Modelos numéricos têm desempenhado um papel fundamental na compreensão dos problemas relacionados a dispersão dos microplásticos como a simulação das rotas de dispersão. Esses modelos têm a capacidade de identificar as fontes e os trajectos de dispersão dos microplásticos bem como fazer previsões de poluição por microplásticos, permitindo a localização de áreas críticas com alta concentração e maior probabilidade de impactos ambientais (Moura *et al*., 2023).

Com o objectivo de compreender a dispersão dos microplásticos, este estudo incorporou duas componentes, nomeadamente a identificação *in situ* de microplásticos e a produção modelos hidrodinâmicos capazes de analisar a distribuição das partículas em diferentes cenários, considerando as características hidrodinâmicas da região em condições normais e extremas. Além disso, o trabalho permitiu identificar áreas com maior propensão ao acúmulo, bem como os factores ou principais forçantes que influenciam de forma significativa o transporte e a dispersão desses materiais.

1.1.Problematização

Sendo a Baia de Pemba uma região reconhecida por uma intensa actividade coralina, estes ecossistemas enfrentam ameaças resultantes de vários factores, como por exemplo o seu branqueamento, e a poluição por resíduos sólidos, como os plásticos e seus derivados (Pinheiro, 2023). A poluição terrestre emerge como um factor crítico para região da baía de Pemba (Damas, 2022), com destaque para os microplásticos que, uma vez transportados para o ambiente marinho, podem causar abrasão física, veicular poluentes químicos e interferir nos processos alimentares de organismos recifais.

Neste contexto, foi constatado por Mucova *et al*., 2021, que ocorrência de eventos extremos, como ciclones tropicais, combinada a hidrodinâmica local, desempenha um papel significativo na subida do nível do mar e potencializa o transporte e a acumulação de microplásticos nas zonas costeiras (Turra *et al*., 2014). Essa interacção representa uma preocupação crescente, sobretudo devido à proximidade com estes ecossistemas sensíveis. Contudo, a questão vai além da simples perturbação hidrodinâmica. Estudos recentes demonstram ainda que a hidrodinâmica forçada por eventos extremos pode também representar uma ameaça indirecta a estes sistemas, através da intensificação do transporte de partículas em suspensão (Turra *et al.,* 2014; Kooi *et al*., 2017).

Durante tempestades, os recifes são não apenas fisicamente impactados pelas ondas e correntes, mas também expostos a uma carga aumentada de poluentes, incluindo microplásticos que podem aderir a estruturas coralíneas, afectar a fotossíntese simbiótica e alterar comportamentos alimentares destas espécies (Pinheiro, 2023;).

Para compreender esta interacção as seguintes perguntas de pesquisa foram criadas:

1. Que características hidrodinâmicas detém a Baía de Pemba em condições normais e eventos extremos?
2. De que maneira os eventos extremos influenciam na distribuição de microplásticos na Baía de Pemba?

1.2. Justificativa

A Baía de Pemba é amplamente reconhecida por sua riqueza natural, destacando-se por seus recifes de coral e uma biodiversidade única que sustenta importantes ecossistemas locais (INAHINA, 2013). No entanto esta região sofre com a acumulação do lixo marinho, que segundo estudos recentes é constituído por plástico e material orgânico. Esta zona costeira funciona como áreas de transição para resíduos, conectando o mar à terra e vice-versa, uma dinâmica que se torna ainda mais intensa durante eventos extremos (Jambeck *et al*., 2015; Lebreton *et al*., 2018).

Este estudo busca não apenas compreender essas interacções, mas também destacar o impacto directo dos eventos extremos na dispersão de microplásticos na Baía de Pemba. A modelação numérica, surge como uma técnica para explorar essas questões, permitindo simular a interacção entre correntes oceânicas, características geográficas e condições climáticas extremas (Deltares, 2014; Elias *et al*., 2012) bem como para prever a dispersão de microplásticos na coluna de água, incluindo a deposição dos mesmos nas praias (Oliveira *et al*., 2023). O estudo poderá contribuir para o conhecimento sobre a dispersão de microplásticos em regiões tropicais pouco monitoradas. No âmbito da gestão ambiental, os resultados deste estudo, poderão auxiliar na implementação de estratégias eficazes para o maneio de resíduos, prevenção da poluição marinha e protecção dos ecossistemas litorais.

1.3. Objectivos

1.3.1. Objectivo Geral:

Estudar a dispersão de microplásticos face à ocorrência do Ciclone Kenneth na Baía de Pemba, em 2019.

1.3.2. Objectivos Específicos:

- Determinar o padrão das correntes sob condições normais e durante a ocorrência de eventos ciclónicos;
- Estimar a quantidade de microplásticos na coluna de água e em sedimentos costeiros; e
- Caracterizar o padrão de transporte dos microplásticos em condições normais e durante a ocorrência do Ciclone Kenneth.

1.4.Revisão de Literatura

1.4.1. Microplásticos

O Grupo Conjunto de Especialistas em Aspectos Científicos da Protecção Ambiental Marinha (GESAMP) define microplásticos como partículas plásticas com diâmetro inferior a 5 mm, abrangendo desde fragmentos visíveis até nanopartículas. Devido à sua durabilidade, o plástico foi recentemente reconhecido como um poluente crítico, desempenhando um papel significativo na crise ambiental e económica global (Worm, *et al*., 2017).

Nas últimas duas décadas, o estudo dos microplásticos tem ganhado destaque na comunidade científica, reflectindo a crescente preocupação com sua presença nos ecossistemas marinhos (Reinaldo, 2023). Esses poluentes já foram identificados em praticamente todos os ecossistemas marinhos, acumulando-se de forma persistente e em taxas alarmantes. Microplásticos apresentam diversos formatos, como fibras, fragmentos, filmes e grânulos, formados principalmente pela degradação de plásticos maiores (Silva *et al*., 2018). As fontes mais comuns de microplásticos incluem produtos cosméticos (como esfoliantes e pastas de dente), fibras liberadas durante a lavagem de roupas sintéticas e o desgaste de resíduos plásticos maiores no ambiente marinho (Cole *et al*., 2011; GESAMP, 2015). A expansão contínua da produção e uso de plásticos tem agravado a presença desses contaminantes nos oceanos.

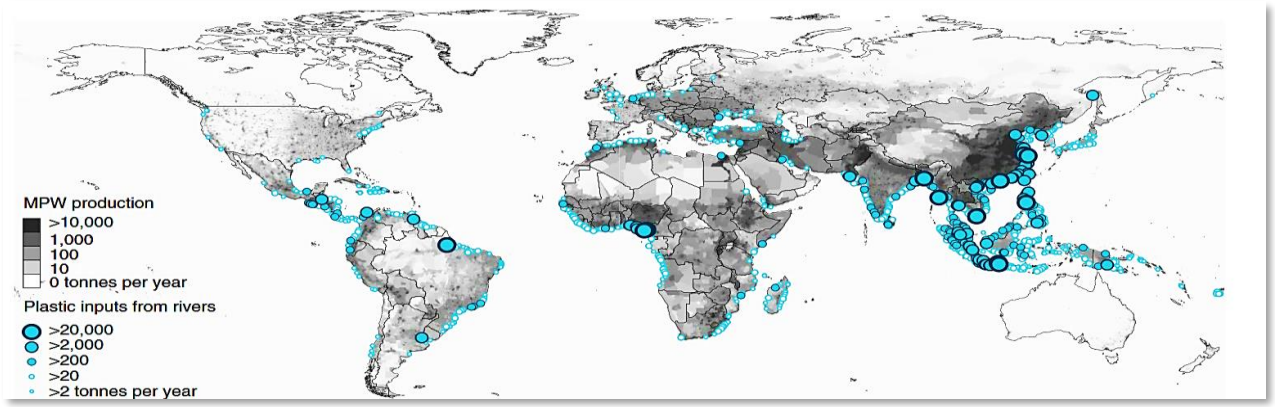


Figura 1.*Massa de plástico de rio que flui para os oceanos em toneladas por ano. As contribuições fluviais são derivadas de características individuais da bacia hidrográfica, como densidade populacional, produção de resíduos plásticos mal gerenciados (MPW) por país, e escoamento médio mensal (L. C. M. Lebreton et al., 2017).*

1.4.2. Classificação dos microplásticos quanto á origem

Os microplásticos podem ser classificados de acordo com várias das suas características físicas e químicas, como tipo de polímero, cor e formato do fragmento, mas uma das classificações mais utilizadas refere-se a sua via de origem, dividindo-os em microplásticos primários e secundários (COLE *et al*., 2011).

Microplásticos primários são aqueles fabricados industrialmente em tamanhos de até 5 mm para um fim específico, ou seja, são partículas que existem como resultado da sua liberação directa e que acabam no ambiente através de sistemas de tratamento de esgoto, aterros sanitários ou pela deposição de resíduos sólidos em locais inapropriados enquanto que, os **secundários** ocorrem como resultado de processos de fragmentação ou quebra de materiais plásticos maiores, em função de diversos factores, como radiação ultravioleta, acção dos ventos e mares, atrito e temperatura (WAGNER; LAMBERT, 2017). Estudos indicam que a maior parte dos microplásticos está presente no fundo dos oceanos, enquanto apenas uma pequena parcela flutua na superfície. Essa dispersão está relacionada à composição de cada tipo de plástico e suas principais características, como porosidade, resistência do material, capacidade de foto-oxidação, densidade, entre outras(Corrêa, 2022).

1.4.3. Quanto ao Material

Os microplásticos podem ser compostos por uma variedade de polímeros plásticos, cada um com suas próprias propriedades químicas e físicas (Cole *et al*., 2011). Os materiais mais comuns incluem:

- **Polietileno (PE)**: Utilizado em sacolas plásticas, embalagens e garrafas.
- **Polipropileno (PP)**: Encontrado em tampas de garrafas, embalagens e fibras sintéticas.
- **Policloreto de Vinil (PVC)**: Usado em tubos, embalagens e produtos de construção.
- **Poliestireno (PS)**: Comum em utensílios descartáveis, embalagens de alimentos e isolantes.
- **Poliéster (PES)**: Utilizado em têxteis e fibras sintéticas.
- **Poliamida (PA)**: Encontrado em fibras têxteis e produtos industriais

1.4.4. Classificação quanto ao Tipo e Forma

Segundo Hidalgo-Ruz *et al*., (2012) a forma dos microplásticos varia amplamente e pode influenciar no seu comportamento e impacto no meio ambiente e podem ser classificados como:

- **Esféricas**: Incluem microesferas de cosméticos e *pellets* plásticos.
- **Fragmentos**: Pequenos pedaços irregulares resultantes da quebra de itens plásticos maiores.
- **Fibras**: filamentos finos e alongados, geralmente provenientes de tecidos sintéticos e redes de pesca.
- **Filmes**: fragmentos finos e planos, como pedaços de sacolas plásticas.
- **Espumas**: pequenos pedaços de materiais espumados, como isopor.

Figura 2: *Tipologia dos microplásticos: a) esfera; b: espuma; c) pellet; d) feixe de fibra; e) fibra; f) filme; g, h e i) fragmento (Neto et al., 2023).*

1.4.5. Classificação Quanto ao Tamanho

Com base em seu tamanho os microplásticos podem ser classificados como (Gigault, *et al*., 2018) & (Hartmann, *et al*., 2019) :

- **Nanoplásticos**: Partículas menores que 0,1 micrómetro (100 nanómetros). Devido ao seu tamanho extremamente pequeno, podem penetrar em células e tecidos biológicos.
- **Microplásticos Menores**: Entre 1 micrómetro e 1 milímetro. Podem ser facilmente ingeridos por organismos marinhos e acumular-se na cadeia alimentar.
- **Microplásticos Maiores**: Entre 1 milímetro e 5 milímetros. Ainda podem ser ingeridos por organismos maiores e fragmentar-se em partículas menores.

1.4.6. Correntes de maré

O transporte hidrodinâmico de microplásticos no ambiente marinho é um processo complexo influenciado por vários factores, como correntes oceânicas, ondas, vento, e interacções com partículas naturais. Essas micropartículas são transportadas até corpos de água e dispersas por factores naturais, como vento e correntes oceânicas, resultando em efeitos adversos para a vida local. Esses efeitos ocorrem através da ingestão ou absorção desses resíduos por pequenos organismos. (Reinaldo, 2023). Os microplásticos são transportados horizontalmente pelas correntes de maré e oceânicas por processos advectivos e convectivos (Castro *et al*., 2020). As correntes de maré desempenham um papel crucial no transporte de microplásticos, facilitando sua dispersão a longas distâncias. Estudos têm mostrado que microplásticos podem ser encontrados em todos os oceanos do mundo, devido ao transporte pelas correntes de superfície e de profundidade. Lebreton *et al*. (2018) analisaram a acumulação de plásticos na Grande Mancha de Lixo do Pacífico e evidenciaram que correntes oceânicas são responsáveis pela concentração de detritos plásticos nessa área à partir do qual observaram que a dinâmica das correntes oceânicas pode acumular plásticos em grandes giros oceânicos.

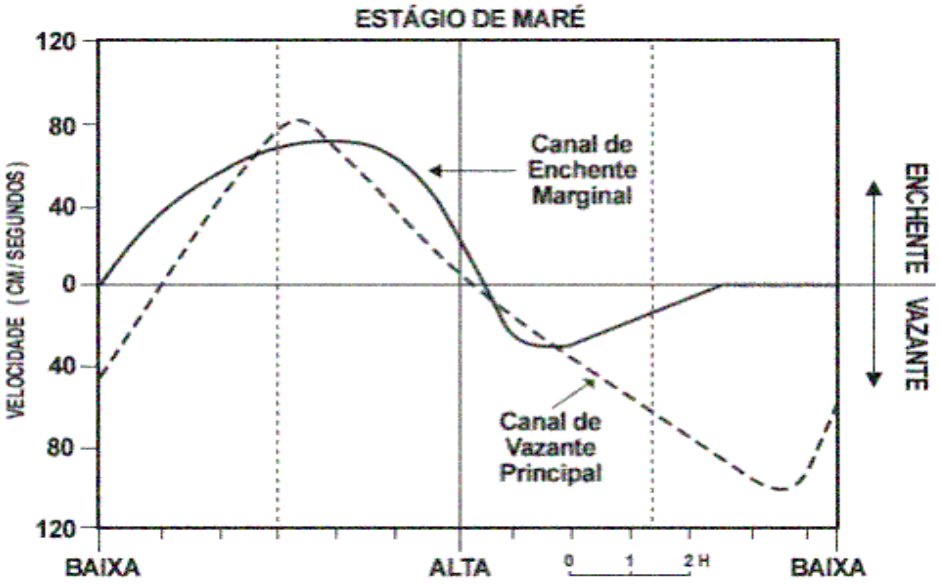


Figura 3: *Curvas de tempo e velocidade de correntes de maré para um delta de maré vazante, ilustrando o princípio da assimetria tempo-velocidade (da Silva Neto, 2019).*

1.4.7. Ondas e Vento

As ondas e o vento também influenciam significativamente o movimento dos microplásticos. As ondas podem re-suspender partículas depositadas no fundo marinho, enquanto o vento pode ajudar a dispersá-las na superfície da água. As ondas e ventos são agentes naturais que influenciam directamente a distribuição e a acumulação de Microplásticos nesses ambientes. Esses factores afectam tanto o transporte horizontal quanto a remobilização vertical dos microplásticos em praias e áreas costeiras. (Oliveira *et al*., 2023). O vento pode afectar a distribuição de microplásticos nos oceanos e transportar microplásticos da superfície da água para áreas costeiras e mar aberto (Reisser *et al*., 2015). Estudos em praias da Ilha de Santa Catarina, no Brasil, demonstram que a orientação da praia e a exposição ao vento afectam significativamente os padrões de acúmulo de Microplásticos. Praias voltadas para correntes predominantes e ventos fortes apresentam maior concentração de Microplásticos na linha de deixa, enquanto áreas mais protegidas tendem a acumular menos resíduos (Oliveira *et al*., 2023).

1.4.8. Eventos Extremos

Os eventos extremos, como tempestades, furacões e enchentes, têm um impacto importante no transporte e dispersão de microplásticos no ambiente marinho e costeiro. Esses eventos aumentam a energia e a dinâmica dos sistemas aquáticos, resultando em alterações nos padrões de distribuição dos microplásticos.

Durante tempestades e furacões, a energia das ondas e correntes aumenta expressivamente, o que pode re-ssuspender microplásticos depositados no fundo marinho e transportá-los para a coluna de água ou mesmo para outras áreas costeiras. Os eventos de enchente têm o potencial de remover microplásticos dos sedimentos e transportá-los para áreas mais distantes, afectando a distribuição espacial desses poluentes (Hurley *et al*. 2018).

Além disso, furacões e tempestades podem causar a mistura vertical dos microplásticos na coluna de água. O aumento da turbulência na superfície do mar durante esses eventos pode resultar na submersão de microplásticos flutuantes para camadas mais profundas do oceano. As condições de vento forte associadas a tempestades podem promover a movimentação vertical dos microplásticos, alterando sua distribuição tanto na superfície quanto em profundidades maiores. As chuvas intensas associadas a eventos extremos também podem aumentar a entrada de microplásticos nos sistemas fluviais e costeiros (Reisser *et al*.**,** 2015).

1.4.9. Ciclones Tropicais

A costa norte de Moçambique, particularmente as províncias de Cabo Delgado e Nampula, constitui uma zona de elevada exposição aos ciclones tropicais, sobretudo pela sua localização geográfica dentro da rota habitual dos sistemas meteorológicos originados no sudoeste do Oceano Índico. Esta região é frequentemente afetada por ciclones que se formam nas águas quentes do Canal de Moçambique ou se deslocam a partir da bacia de Madagáscar em direção ao continente africano. Devido à interação entre os sistemas de baixa pressão atmosférica e a topografia costeira local, os efeitos destes eventos sobre os ecossistemas marinhos e costeiros podem ser particularmente severos.

Foi realizado uma análise climatológica abrangente sobre a ocorrência de ciclones tropicais em Moçambique e identificaram um padrão de alta frequência na região norte, especialmente entre os meses de dezembro e abril (Mavume *et al.,* 2010). A pesquisa apontou que ciclones como Eline (2000), Favio (2007) e Kenneth (2019) demonstraram grande capacidade destrutiva, não apenas em termos de infraestrutura, mas também na alteração das dinâmicas ambientais, incluindo modificação dos regimes de maré, elevação do nível do mar e intensificação das correntes costeiras. No caso do ciclone tropical Kenneth, que atingiu diretamente a província de Cabo Delgado em abril de 2019, observou-se uma combinação de ventos superiores a 220 km/h, precipitações torrenciais e marés ciclônicas, que resultaram na inundação de vastas áreas litorâneas (Mavume *et al.,* 2010). Conforme descrito por Haque e Fan (2023), tais eventos extremos são responsáveis por perturbações substanciais na hidrodinâmica costeira, provocando ressuspensão de sedimentos, erosão acelerada das margens e aumento no transporte de partículas, como os microplásticos, para zonas previamente não impactadas. Essas perturbações são agravadas em ambientes costeiros semi-fechados como a Baía de Pemba, cuja morfologia favorece o aprisionamento e recirculação de contaminantes suspensos.

1.4.10. Circulação Hidrodinâmica do Canal de Moçambique

No interior do Canal de Moçambique a circulação é dominada pelos vórtices de mesoescala, com escala espacial aproximada a 300-350 km, observados num período médio 5-6 anos. Estes vórtices são originados na região norte pelas instabilidades barotrópicas e baroclínicas da SEC (Collins *et al*., 2012), antes de se desenvolverem no centro e dissiparem no sul do canal (Halo, *et al*., 2014)

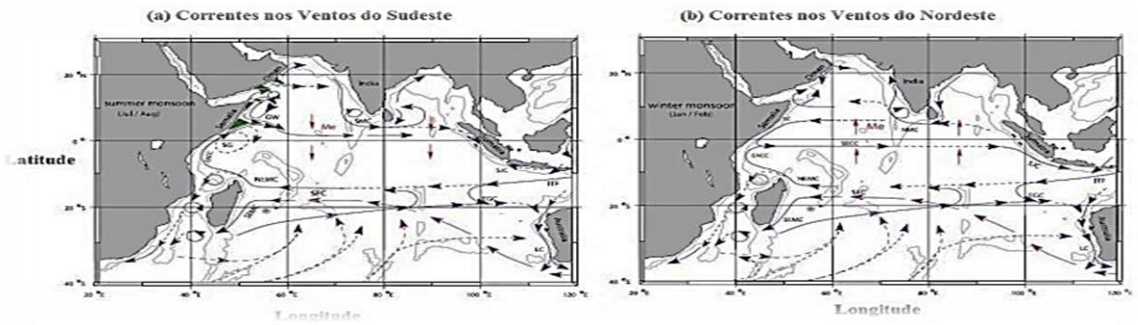


Figura 4: *Padrão das correntes durante as monsões do Verão (a) e do Inverno (b) (Schott et al., 2009).*

Sendo esta região caracterizada por uma circulação complexa, dominada por redemoinhos de grande escala, correntes de fronteira oeste e interacção com massas de água do Oceano Índico. Essas correntes transportam nutrientes, sedimentos e poluentes, conectando ecossistemas costeiros e estuarinos da região (Mucova *et al*., 2021), As baías tropicais, como a Baía de Pemba, apresentam características hidrodinâmicas complexas devido à combinação de forças de maré, ventos, entrada de água doce e interacção com o oceano aberto (INAHINA, 2013). Esta baía é alimentada pela corrente quente do canal de Moçambique que se dirige para SW e S ao longo da Costa ocidental do Canal (Silva, 1996).

1.4.11. Modelação Numérica

A modelação numérica é uma ferramenta essencial para compreender processos complexos em ambientes naturais, permitindo a simulação de interacções físicas, químicas e biológicas em escala espacial e temporal (Dronkers, 2005). No contexto de ambientes marinhos e costeiros, a modelação oferece uma abordagem robusta para estudar o transporte de sedimentos, poluentes e dinâmicas hidrodinâmicas, proporcionando *insights* que seriam difíceis de obter apenas por métodos experimentais ou observacionais.

Em decorrência desse grande cenário de mares de microplásticos, são apresentados, no actual mercado, alguns modelos computacionais que vêm sendo utilizados para simular a trajectória dos detritos plásticos em rios, baías e oceanos, em que são utilizadas dinâmicas baseadas em processos úteis na quantificação dos fluxos e concentrações ao longo do sistema. Modelos hidrodinâmicos têm sido amplamente utilizados para simular o comportamento de partículas no ambiente marinho. Eles permitem prever padrões de dispersão, acumulação e deposição de microplásticos em função de factores como correntes, ondas, ventos e densidade das partículas (Kooi *et al.*, 2017; Lebreton *t al*., 2018). O Delft3D é um software de modelação hidrodinâmica tridimensional amplamente reconhecido por sua versatilidade.

Ele é utilizado para simular processos em ambientes costeiros e marinhos, como o transporte de sedimentos e poluentes, qualidade da água e dinâmica morfodinâmica. Sua capacidade de integrar diferentes fontes de dados e simular condições extremas torna-o ideal para estudos de microplásticos, especialmente em regiões sujeitas a eventos climáticos extremos (Van Ormondt *et*

al., 2020). Estes modelos são alimentados com dados batimétricos obtidos a partir de cartas náuticas digitalizadas, dados hidrodinâmicos derivados de reanálises climáticas (como os disponibilizados pela ERA5) e medições *in situ* de correntes, ventos e marés. Esses dados fornecerão as condições iniciais e de contorno necessárias para as simulações.

1.5.Métricas estatísticas

A análise estatística métrica constitui um conjunto de ferramentas fundamentais na avaliação de desempenho de modelos numéricos, especialmente na área das ciências ambientais e da modelação hidrodinâmica. Dentre os principais indicadores utilizados para quantificar o grau de ajuste entre valores observados e valores simulados destaca-se o Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error – RMSE*).

1.5.1. RMSE (*Root Mean Square Error)*

O RMSE é uma métrica amplamente utilizada para avaliar a precisão de previsões ou simulações, medindo a média quadrática das diferenças entre os valores preditos pelo modelo e os dados observacionais. Esta métrica penaliza erros maiores, uma vez que os resíduos são elevados ao quadrado antes de serem agregados, o que torna o RMSE particularmente sensível a discrepâncias elevadas entre simulado e observado (Willmott & Matsuura, 2005).

Um RMSE próximo de zero indica alta acurácia do modelo. No entanto, o RMSE deve ser interpretado em conjunto com outras métricas, como o coeficiente de correlação de Pearson (r), o erro absoluto médio (MAE) e o índice de concordância de Willmott, para fornecer uma análise estatística mais robusta sobre o desempenho do modelo (D. N. Moriasi *et al.*, 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - p_i)^2}$$

Onde:

- n é o número de amostras
- y_i é o valor observado para a amostra i
- p_i é o valor previsto pelo modelo para a amostra i

Figura 5. *Fórmula Matemática da Raiz quadrática do Erro Médio*

2. Metodologia

2.1.Área de estudo

A Baía de Pemba (Figura 5) é a terceira maior baía do mundo em termos de profundidade e a primeira na África, com mais de 40 km^2 de extensão, numa área de quase 150 km^2. A sua enorme área aliada às suas características ecológicas, que a colocam a Baía de Pemba numa posição distinta ao largo do oceano Índico com relação ao desenvolvimento da pesca (Alberto, 2022). As características geográficas e ambientais da baía de Pemba incluem uma boa profundidade que permite a ancoragem de grandes navios, tornando-a um ponto crucial para a indústria de hidrocarbonetos na região. O porto de Pemba é particularmente importante para as prospecções e exploração de gás natural na área de Palma, que se servem deste local para a sua logística (INAHINA, 2013).

Oceanografia

O regime das correntes em questão é condicionado pela existência de uma corrente permanente, pelas particularidades do regime de ventos e pelos fenómenos de marés (Silva, 1996). A baía de Pemba experimenta marés semidiurnas, com um ciclo de aproximadamente 12 horas. As amplitudes de maré podem variar, mas são geralmente moderadas, o que afecta a velocidade e a direcção das correntes dentro da baía (INAHINA, 2013).

Metade da zona costeira do distrito está dentro da baía de Pemba com profundidades que não excedem os 50 m. Na boca da baía aparece um desfiladeiro, cuja profundidade aumenta acentuadamente para os 1000 m. A baía é uma das baías mais propícias e abrigadas contra os ventos e ondulação, utilizável para navios de grande calado (MCAA, 2012).

Clima

A baía de Pemba é influenciada pelo vale equatorial de baixa pressão, com uma estação quente e chuvosa, este também designado zona de convergência intertropical invade a parte norte de Moçambique em Novembro e Dezembro (Silva, 1996).

2.1.1. Método

Este estudo combinou análises laboratoriais e modelagem numérica para avaliar a distribuição espacial de microplásticos na Baía de Pemba. A componente laboratorial envolveu o processamento físico-químico de amostras de água e sedimentos, seguindo protocolos padronizados para identificação e quantificação de partículas. Paralelamente, a modelagem permitiu correlacionar os dados analíticos com variáveis ambientais (correntes, vento e proximidade de fontes poluidoras), identificando padrões de acumulação.

Para a avaliação dos locais de maior ocorrência dos microplásticos, foram efectuadas análises das amostras de água e sedimentos costeiros, obtidas ao longo da baía de Pemba. A colecta das amostras foi realizada em diversos pontos da baía, a partir do qual foram selecionados 16 pontos de amostragem no interior da baía (Figura 6). A selecção dos pontos de amostragem foi baseada em critérios estratégicos, priorizando áreas próximas a potenciais fontes de poluição a partir das descargas urbanas, portuárias e zonas de actividade pesqueira. Foram colectadas 7 amostras de sedimentos e 9 amostras de água a uma profundidade de 50 cm da superfície da água, nos dias 4 e 5 de Março de 2024.

Designação	**Massa(g)**
SS_1A	161
SS_1B	123.2
SS_3	174
SS_4	202.4
Designação	**Massa(g)**
SS_2A	179.8
SS_2B	100.3
SS_5	101.2
Designação	**Volume de água (ml)**
WS_1	500
WS_2	500
WS_3	500
WS_4	500
WS_5	450
WS_6	500
WS_7	500
WS_8	500
WS_9	500

Tabela 1. *Características das Amostras de Sedimento costeiros (SS) e de Água (WS).*

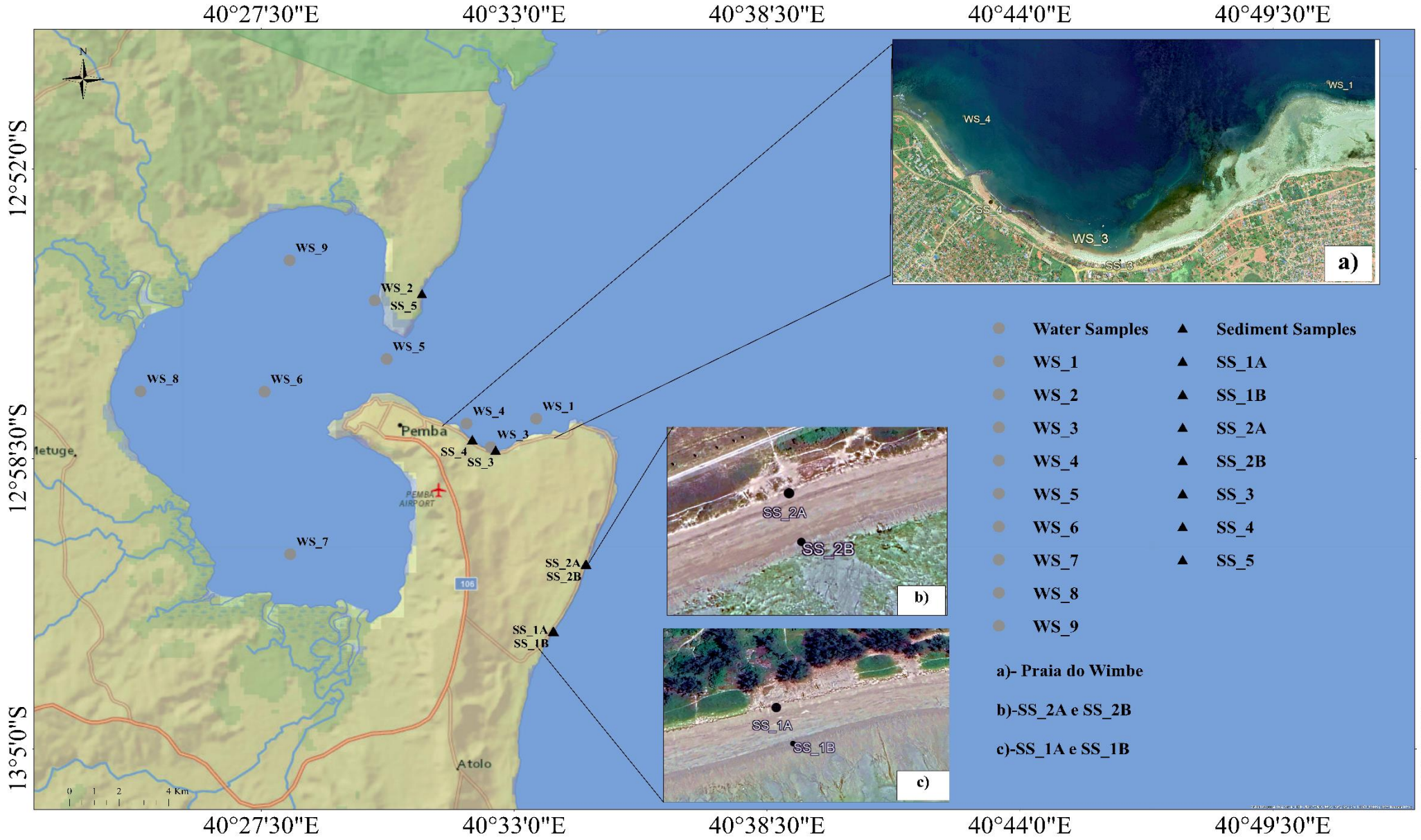


Figura 6. *Mapa de Localização da Baía de Pemba, amostras de sedimentos (sediment samples), amostras de água (water samples).*

2.1.1.1.Análises Laboratoriais

As 16 amostras de água e sedimentos usadas no presente trabalho, foram examinadas no laboratório de Química e Biologia da Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras (ESCMC). A análise consistiu na extracção, identificação e posterior classificação dos microplásticos encontrados, considerando directrizes prescritos no *Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas (2015).*

Etapa 1: Tratamento Inicial das Amostras de sedimento

1. **Secagem:** as amostras de sedimentos foram secas em uma incubadora à 60°C, por 24 horas para eliminar a humidade.
2. **Peneiramento e Pesagem:** após a secagem, as amostras foram peneiradas para remover partículas maiores (insignificantes para detecção de microplásticos, isto é, partículas com diâmetro superior a 5mm). Em seguida, as amostras de sedimentos foram pesadas com recurso a uma balança analítica, para garantir a precisão nas etapas subsequentes.

Etapa 2: Separação de Microplásticos por Densidade (Métodos baseados em Crawford & Quinn, 2017 e Litter, 2013).

3. **Solução de NaCl (amostras de sedimento)**

(i) Preparação: diluição de 150ml de solução salina em 100ml de água destilada, seguida de filtração com filtros de celulose (0.7 μm), para remover antiglomerantes.

(ii) Adição às amostras: a solução filtrada foi misturada ao sedimento e agitada vigorosamente por 10 minutos de forma manual.

(iii) Repouso: a solução foi deixada em repouso por 2 horas para os microplásticos flutuarem e sedimentos depositarem-se no fundo do mar.

4. **Solução de NaCl (amostras de água)**

(i) Preparação: 12.9 *g* de NaCl para 170 *ml* de água destilada (densidade ≈ 1.2 $g\ cm^{-3}$), filtrada com filtros de celulose.

(ii) Adição e agitação: procedimento idêntico ao das amostras de sedimento (10 min de agitação + 2 horas de repouso).

5. **Solução de Etanol (apenas para sedimentos).**

(i) Preparação: diluição de 100 *ml* de etanol em 150 *ml* de água destilada.

(ii) Adição e agitação: seguido o mesmo protocolo de agitação (10 min) e repouso (3 horas).

Etapa 3: Filtração e Secagem

6. Colecta do sobrenadante após repouso.
7. Filtração a vácuo com filtros de fibra de vidro (0.7 µm).
8. Secagem em incubadora a 40°C por 3 horas.

Etapa 4: Análise Microscópica e Caracterização

Esta etapa consistiu na utilização de microscópio estereoscópico trinocular (LEICA) com câmera digital (10 MP) cujo uso teve como finalidade possibilitar a visualização ampliada, identificação morfológica, contagem precisa e caracterização física (forma, cor, tipo) dos microplásticos retidos nos filtros após o processo de filtração. O microscópio permitiu distinguir partículas de diferentes tamanhos e formatos, enquanto a câmera acoplada possibilitou o registro fotográfico e documentação das partículas para análises posteriores.

Tabela 2: *Categorias usadas para descrever a aparência dos Microplásticos. Fonte: Adapted in Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas,2013; Castro et al., 2020 e Corrêa (2022).*

Tipo	Fragmentos, ***pellets***, filamentos, filmes, espumas de plásticos e isopor.
Forma	Para pellets: cilíndrico, discos, planos, ovóides, esferóides; Para fragmentos: arredondado, subarredondado, subangular, angular; Para geral: bordas irregulares, alongadas, degradadas, ásperas e quebradas.
Tamanho	0.01-1.9*mm*/ 2.9-3.9*mm*/ 4.0-5.0*mm*
Cor	Transparente, cristalino, branco, vermelho, laranja, azul, opaco, preto, cinza, marrom, verde, rosa, bege, amarelo.

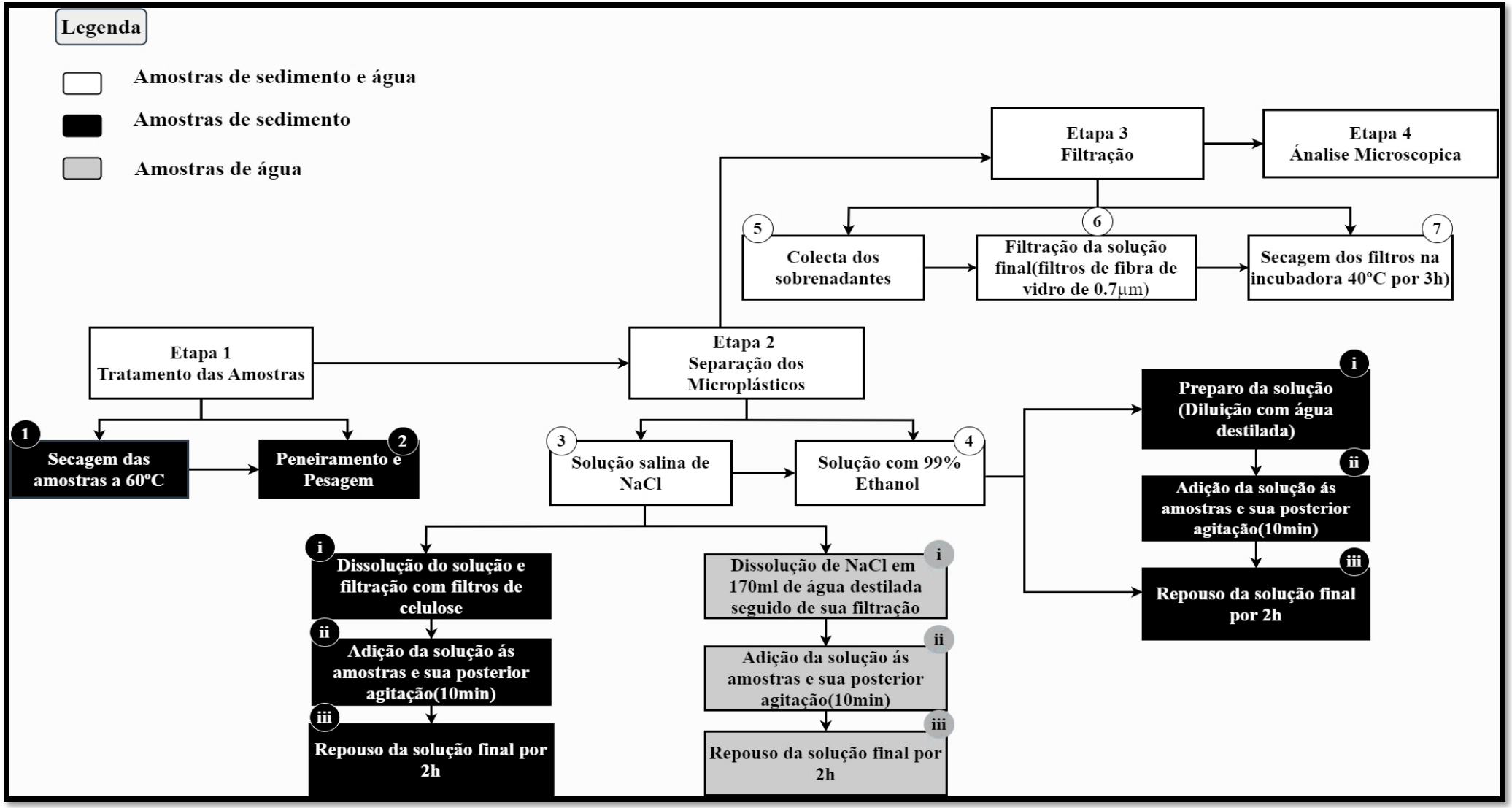


Figura 7: *Etapas de processamento e separação dos Microplásticos em amostras de sedimento e de água.*

2.1.2. Modelação numérica

Esta parte do trabalho consistiu na implementação de um modelo bidimensional (2D), utilizando o programa computacional Delft3D, especificamente os módulos *FLOW e PARTICLE TRACKING* para simular a circulação hidrodinâmica e transporte dos microplásticos, respectivamente. Foram construídos três modelos numéricos, nomeadamente: ***(1)*** um modelo base com forçantes atmosféricos e oceânicos em condições normais; ***(2)*** um modelo forçado com dados atmosféricos realísticos, considerando os ventos associados ao Ciclone Tropical Kenneth a fim de representar o evento extremo; e ***(3)*** um modelo especifico para o transporte de microplásticos foi produzido a partir de simulações numéricas envolvendo a introdução de 128 partículas de microplásticos em condições normais e induzida por eventos extremos permitindo comparar os padrões de dispersão, retenção e exportação desses poluentes sob diferentes cenários hidrodinâmicos.

2.1.3. Simulação da Circulação Hidrodinâmica

O *Delft3D-FLOW* é amplamente utilizado devido à sua capacidade de simular processos hidrodinâmicos complexos e a interacção entre água, sedimentos e poluentes, na qual oferece módulos para a simulação de fluxo, qualidade da água e morfologia. Os módulos são ideais para o estudo da distribuição de partículas comos os microplásticos tendo em consideração a hidrodinâmica local. A implementação do modelo Delft3D foi realizada através das seguintes etapas:

Definição do Contorno do Sistema: que consiste na delimitação precisa da área de estudo, estabelecendo as fronteiras do domínio modelado, incluindo a linha de costa e as bordas do corpo de água. Nesta primeira etapa, a delimitação da linha de costa da baía de Pemba foi feita à partir de dados obtidos na plataforma do *Google earth pro*.

Criação da Grelha Computacional e Interpolação da Batimetria: foi feita a construção a grelha computacional para o modelo espaçamento Δx=200 m e Δy=150 m. Em seguida, foi feita a interpolação dos dados batimétricos para representar a profundidade e topografia do fundo do mar de forma precisa. Para a geração da grelha computacional e da batimetria foi usado o programa *Delft Dashboard* que é um programa de código aberto, no qual possui uma interface gráfica de usuário projectada para criar, editar rapidamente parâmetros de entrada e visualizar entradas de

modelos para vários modelos hidrodinâmicos, usando conjuntos de dados locais e globais privados ou publicamente disponíveis (Van Ormondt *et al*., 2020).

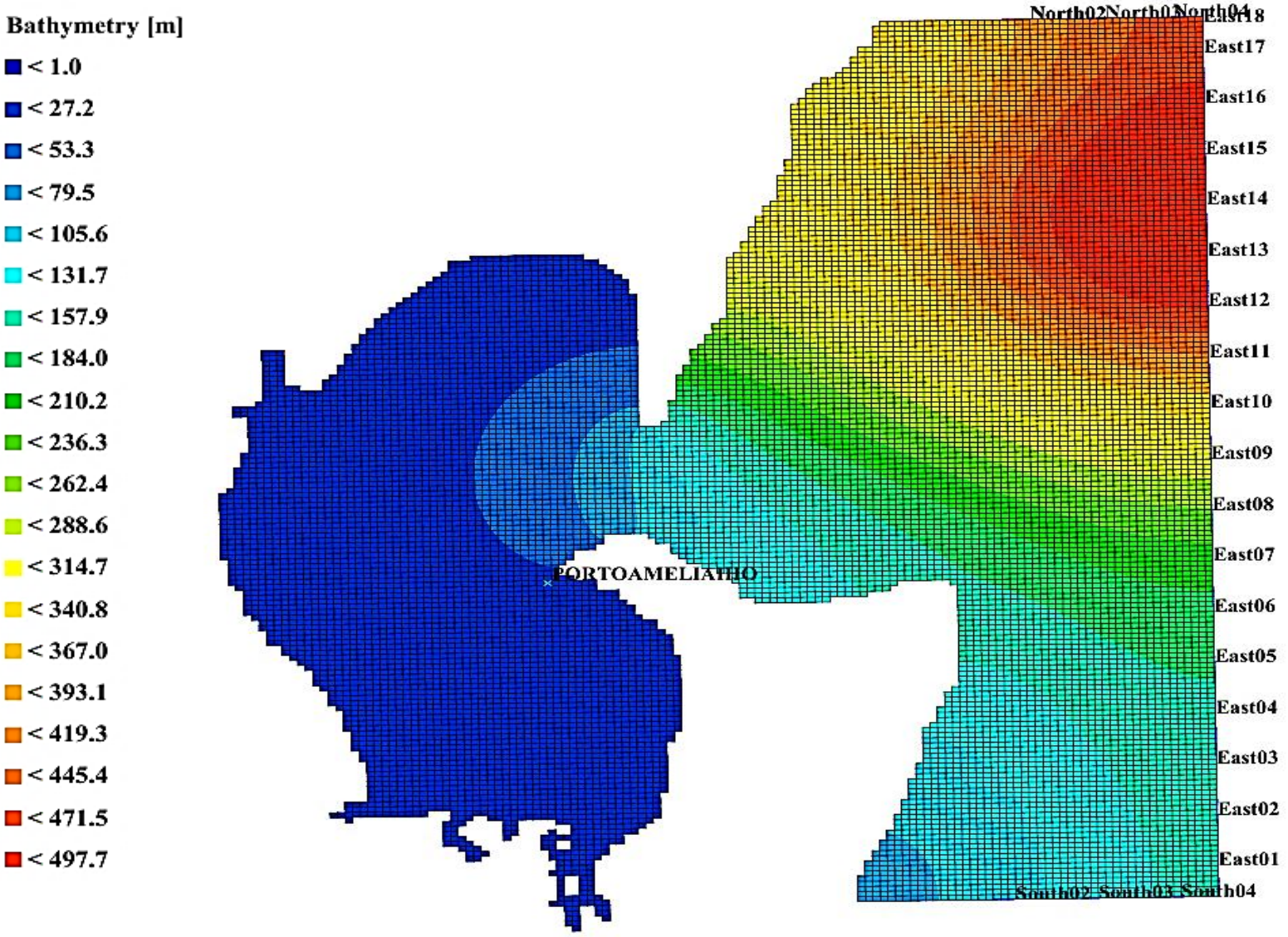


Figura 8*.Batimetria da Baia de pemba interpolada na grelha com as fronteiras abertas referenciando à estação do Porto Amelia.*

Estabelecimento das Condições Iniciais: no qual foi feita a configuração das condições iniciais do sistema, incluindo a distribuição inicial de microplásticos, parâmetros hidrodinâmicos (marés, correntes), atmosféricos (pressão e vento) e outras variáveis ambientais descritas na tabela 2.

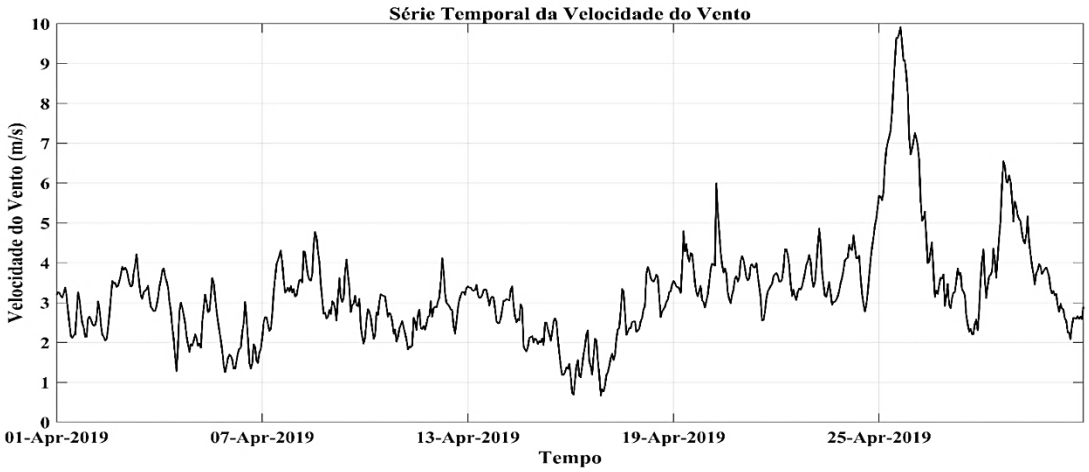


Figura 9.*Magnitude do vento usado na construção do modelo para o ano de 2019.*

A Figura 9 apresenta a série temporal da velocidade do vento em m/s para a região da Baía de Pemba, no mês de abril de 2019, obtida a partir do reanálise ERA5 do ECMWF. Este dado foi utilizado como condição de contorno atmosférico na simulação hidrodinâmica, visando representar adequadamente a forçante de superfície durante o período de análise. De modo geral, observa-se que a velocidade do vento ao longo do mês manteve-se predominantemente entre 2 e 4 $m\ s^{-1}$, com variações de curta duração indicando flutuações de menor escala típicas da circulação atmosférica costeira. Os menores valores situaram-se ligeiramente abaixo de 2 $m\ s^{-1}$ em alguns dias da primeira quinzena, sugerindo períodos de baixa atividade eólica. Destaca-se, entretanto, um evento de intensificação significativa do vento entre os dias 23 e 25 de abril, atingindo um pico superior a 9 $m\ s^{-1}$

Estabelecimento das Condições de Fronteira: nesta fase foi feita a definição das condições de contorno hidrodinâmicas e meteorológicas nas fronteiras do modelo, como níveis de água, fluxos de entrada e saída, vento e precipitação. As condições de contorno hidrodinâmicas e meteorológicas foram definidas de forma a capturar o comportamento do sistema em diferentes cenários. As **fronteiras hidrodinâmicas** consistem na definição dos níveis de água e fluxos de

entrada e saída nas fronteiras do modelo, com base em séries temporais históricas ou medições *in situ* e as **fronteiras atmosféricas** onde se fez a introdução de dados de vento, sendo neste estudo sido usados dados provenientes de reanálises climáticas da ERA 5. Para garantir a estabilidade numérica das simulações realizadas com o modelo ***Delft3D-FLOW*** acoplado ao ***Delft3D-PART***, o número de *courant* foi determinado tendo em conta o passo de tempo usado no modelo de 120s

Validação: esta foi a última fase da modelagem numérica. De modo a garantir a confiabilidade e a precisão das previsões, o modelo numérico foi calibrado e validado em etapas distintas. Primeiramente, foi ajustado utilizando dados anuais da elevação de marés dos anos de 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 e 2006. Em seguida, o modelo foi validado para o ano de 2004, com recurso à dados *in situ* e simulações efectuadas para o ano ora em referência.

Tabela 3.*Descrição dos dados e constantes hidrodinâmicas usados na configuração do modelo.*

Dados/const. Hidrodinâmicas	Fonte	Resolução Espacial	Observações/Resolução Temporal
Batimetria	**GEBCO** https://www.gebco.net/	15 *arc-seconds*	Dados referentes ao ano de 2024
Vento U, V	**ERA 5** https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels	0.25°x 0.25º/30 *Km*	Dados de Reanálise dos anos 2000-2006 e 2019.
Elevação de Maré	**Delft Dashboard** Modelo TPX0 8.0 (Egbert & Erofeeva, 2002)	-------	Série temporal de 30 dias equivalente a um ciclo completo
Densidade da água	----------	--------	1024 $kg\ m^{-3}$ Típica de regiões costeiras tropicais com salinidade média de ~35 PSU.
Time step	----------	--------	120s
Coeficiente de arrasto	(Deltares, 2024)	-------	Valor usado: 0.03
Rugosidade do fundo (coeficiente de *Manning*)	(Deltares, 2024)	--------	Valor usado: 0.025
Parâmetros de Forçamento do Ciclone	**JTWC** https://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html	Raio do ciclone equivalente 500km	Dados de Velocidade do vento ($m\ s^{-1}$), pressão atmosférica (*hPa*) e posição central referentes ao ciclone Kenneth para o ano de 2019

2.1.4. Simulação do Transporte de Microplásticos

A simulação de transporte de Microplásticos contou com o uso do módulo *Particle Tracking* associada ao software Delft3D, que se baseia no princípio *Lagrangiano*, onde as partículas individuais que se movem com o fluxo do fluido são rastreadas (Deltares, 2024). O módulo ora referido simula o movimento de partículas em ambientes aquáticos, considerando a advecção (transporte pelas correntes).

2.1.5. Configuração do Modelo Hidrodinâmico de Transporte de Microplásticos

A primeira etapa consistiu na configuração do modelo hidrodinâmico. Para o efeito, foi utilizada a mesma grelha computacional gerada no modelo das condições normais da Baía.

2.1.6. Lançamento Instantâneo das Partículas (*instantaneous release)*

A simulação do transporte de microplásticos foi realizada tendo em conta o lançamento instantâneo das partículas. Este tipo de lançamento consiste em projectar partículas de um modo uniforme, isto é, de uma só vez, em um único instante de tempo, em posições pré-definidas conforme ilustradas na Figura 8.

Foram considerados dois cenários distintos para o lançamento das partículas: ***(1)*** fontes reais de microplásticos, baseadas em dados de microplásticos identificados, correspondentes aos locais aonde os microplásticos foram encontrados; e ***(2)*** uma fonte idealizada localizada no estreitamento da baía, região caracterizada por correntes mais intensas.

2.1.7. Cenário 1: Fontes Reais de Microplásticos

No primeiro cenário, conforme foi mencionado no parágrafo anterior, as fontes de lançamento das partículas foram definidas com base em locais onde as concentrações dos microplásticos que foram previamente identificados, como em alguns pontos das áreas costeiras e na coluna de água. As coordenadas geográficas das fontes foram inseridas no modelo, e a quantidade inicial de partículas foi estimada com base nos dados de campo. O período de simulação foi estabelecido em 30 dias, tempo suficiente para observar padrões de transporte e dispersão.

2.1.8. Cenário 2: Fonte idealizada localizada na Zona de Estreitamento da Baía

No segundo cenário, uma fonte de lançamento dos microplásticos foi posicionada no estreitamento da baía. A região é conhecida por apresentar correntes mais intensas devido ao efeito de confinamento geográfico (Simonetti, 2016). A configuração do modelo manteve as condições hidrodinâmicas do primeiro cenário, mas com foco na dinâmica específica da área. A quantidade inicial de partículas foi mantida semelhante ao cenário anterior, para permitir uma comparação directa entre os dois casos.

Tabela 4: *Descrição dos cenários modelados.*

Parâmetro usados em ambos os cenários (1 e 2)	**Condição Normal**	**Evento Extremo (Ciclone Kenneth)**
Período de Simulação	01/04/2019 – 30/04/2019	01/04/2019 – 30/04/2019
Forçante Atmosférico	Vento médio regional	Vento associado ao Ciclone Kenneth
Forçante oceânico	Maré semi-diurna (normal)	Maré semi-diurna com influência ciclônica
Tipo de Lançamento	Instantâneo	Instantâneo
Raio de Dispersão das Partículas	200 m	100 m
Quantidade de Partículas	128	128

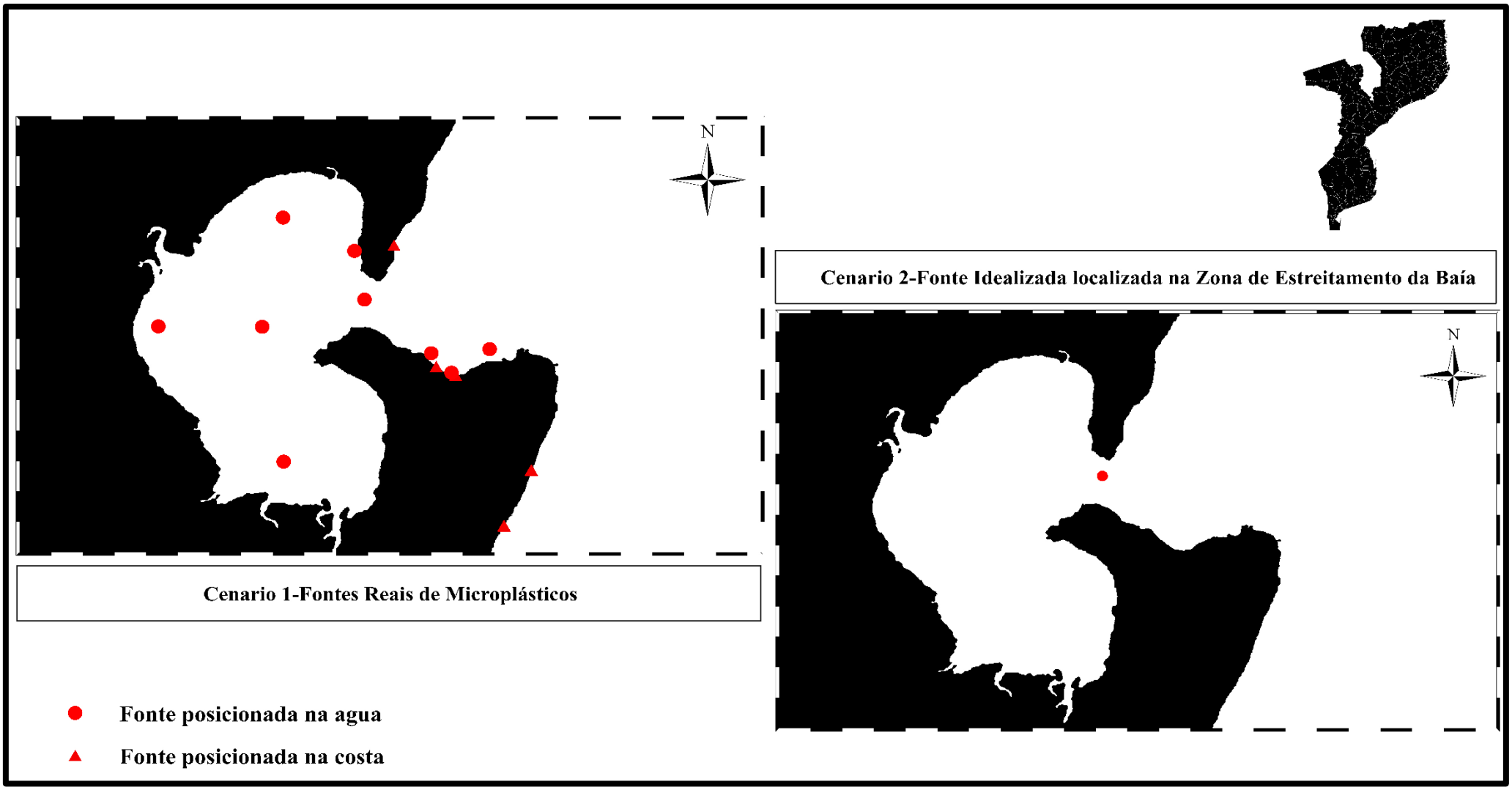


Figura 10.*Localização das fontes em ambos cenários analisados no modelo de transporte.*

***Tabela 5**.Descrição dos dados e constantes hidrodinâmicas usados na configuração do modelo.*

Dados/const. Hidrodinâmicas	Fonte	Resolução Espacial	Observações/Resolução Temporal
Batimetria	**GEBCO** https://www.gebco.net/	15 arc-seconds (~450 m)	Dados referentes ao ano de 2024
Vento *U,V*	**ERA 5** https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels	0.25°x 0.25º/30 Km	Dados de Reanálise dos anos 2000-2006 e 2019.
Elevação de Maré	**Delft Dashboard** Modelo TPX0 8.0 (Egbert & Erofeeva, 2002)	--------	Série temporal de 30 dias equivalente a um ciclo completo
Densidade da água	----------	--------	1024 $kg\ m^{-3}$ Típica de regiões costeiras tropicais com salinidade média de ~35 PSU.
Time step	----------	--------	120s
Coeficiente de arrasto	(Deltares, 2024)	-------	Valor usado: 0.03
Rugosidade do fundo (coeficiente de *Manning*)	(Deltares, 2024)	--------	Valor usado: 0.025
Parâmetros de Forçamento do Ciclone	**JTWC** https://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html	Raio do ciclone equivalente 500km	Dados de Velocidade do vento ($m\ s^{-1}$), pressão atmosférica (hPa) e posição central referentes ao ciclone Kenneth para o ano de 2019

3. Resultados

Os resultados das simulações hidrodinâmicas desenvolvidas neste estudo, incluindo a distribuição e dispersão de microplásticos em diversos pontos da Baía de Pemba, sob condições normais e durante a ocorrência do ciclone Kenneth, são apresentados em seguida. De salientar que os resultados têm como foco, a descrição dos padrões de circulação, magnitude das correntes e comportamento sob diferentes condições de fronteira na Baía de Pemba.

Os resultados incluem ainda a classificação e quantificação dos microplásticos, obtida a partir de dados *in situ* da baía, considerando como atributos, o tipo e o tamanho dos mesmos. A abordagem possibilitou uma discussão mais aprofundada da influência e interacção de microplásticos, tendo em consideração a dinâmica dos processos costeiros que são parte do ecossistema da Baía de Pemba, incluindo as possíveis fontes de contaminação.

3.1.Circulação Hidrodinâmica: Condições Normais da Baía de Pemba

Os resultados obtidos das simulações referente ao ano de 2019 (Figura 11), apontam para uma oscilação definida do nível da maré, caracterizado pela alternância entre as marés vivas e as marés mortas ao longo do ciclo lunar. A curva mostra uma clara oscilação semidiurna, evidenciada pela ocorrência de aproximadamente dois ciclos completos de maré por dia. Essa oscilação alterna entre marés altas (preia-mar) e marés baixas (baixa-mar), com variações de amplitude ao longo do período. Além da oscilação diária, é possível observar um envelope modulador de maior escala, correspondente ao ciclo sizígia-quadratura. Este envelope indica que por volta dos dias 7 e 20 de abril, ocorrem marés de sizígia — caracterizadas por amplitudes máximas, que ultrapassam 2 *metros* nos picos de preia-mar e descem abaixo de -2 *metros* nos picos de baixa-mar. Já nos dias aproximadamente entre 12 e 27 de abril, observa-se a maré de quadratura, em que a amplitude se reduz visivelmente, ficando entre ±1 metro, aproximadamente. Esse comportamento é compatível com a acção combinada dos forçantes astronômicos principais (Lua e Sol) e confirma a presença de um regime misto, predominantemente semidiurno na Baía de Pemba. A amplitude média da maré, estimada visualmente, varia entre 1.5 *m* a 2.2 *m* nas sizígias e cerca de 0.8 *m* a 1.2 *m* nas quadraturas.

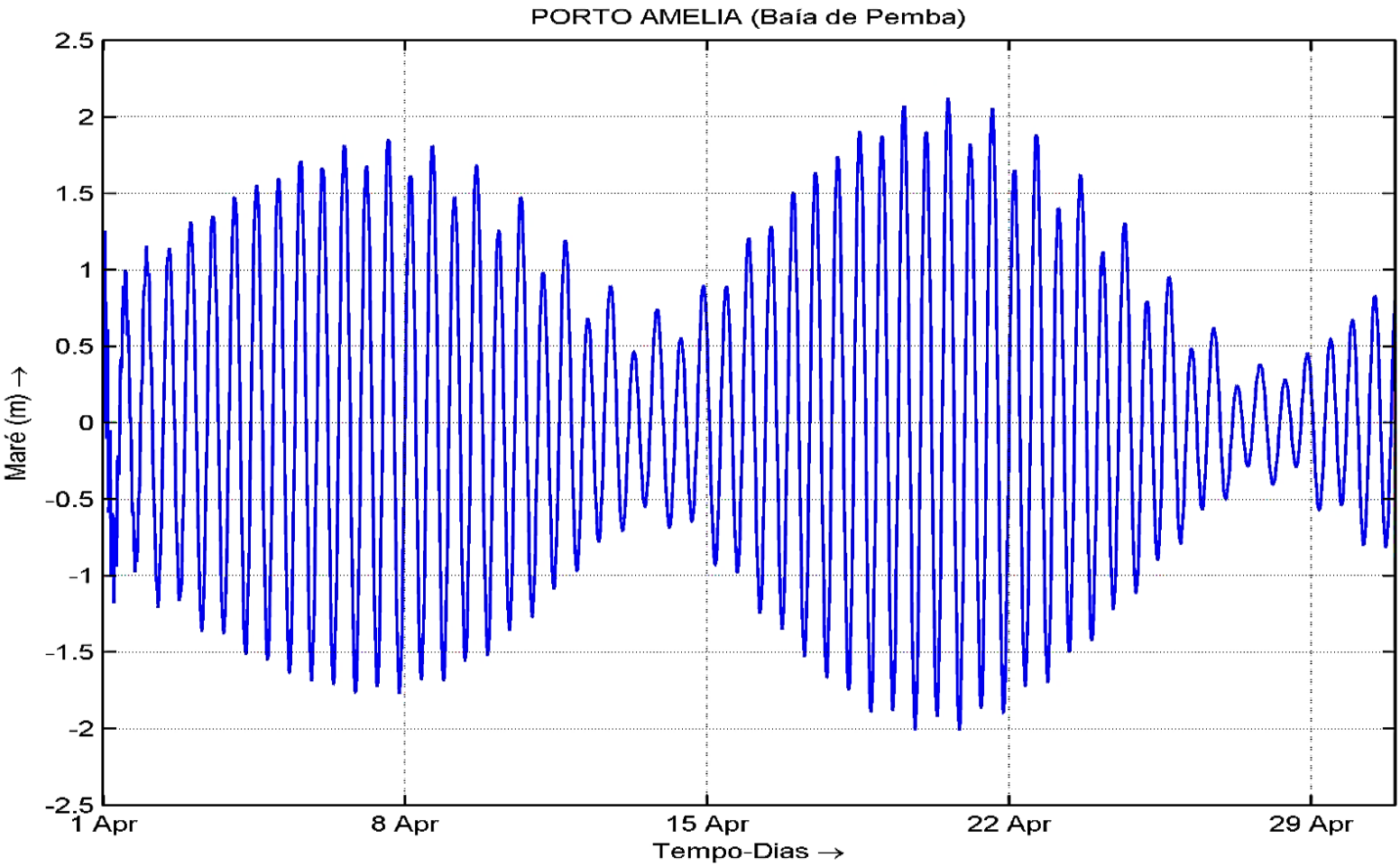


Figura 11. *Oscilação da Maré para o ano de 2019, 30 dias de simulação para o mês de Abril.*

3.1.1. Corrente de Maré

A Figura 12 a) ilustra a série temporal da maré com destaque em períodos da maré de quadratura e de sizígia nos painéis 12b) e 12c). Nos primeiros dias da simulação observou picos anómalos na intensidade da corrente, atingindo valores superiores a 1 $m\,s^{-1}$. Este comportamento é interpretado como decorrente do período de estabilização hidrodinâmica do modelo numérico, comum nas simulações com acoplamento hidrodinâmico e forçantes iniciais especialmente quando há descontinuidade entre as condições de contorno e o campo inicial. Ao longo do mês, a magnitude da corrente apresenta uma uma modulação associada ao ciclo de sizígia e quadratura, refletindo o comportamento das marés astronômicas.

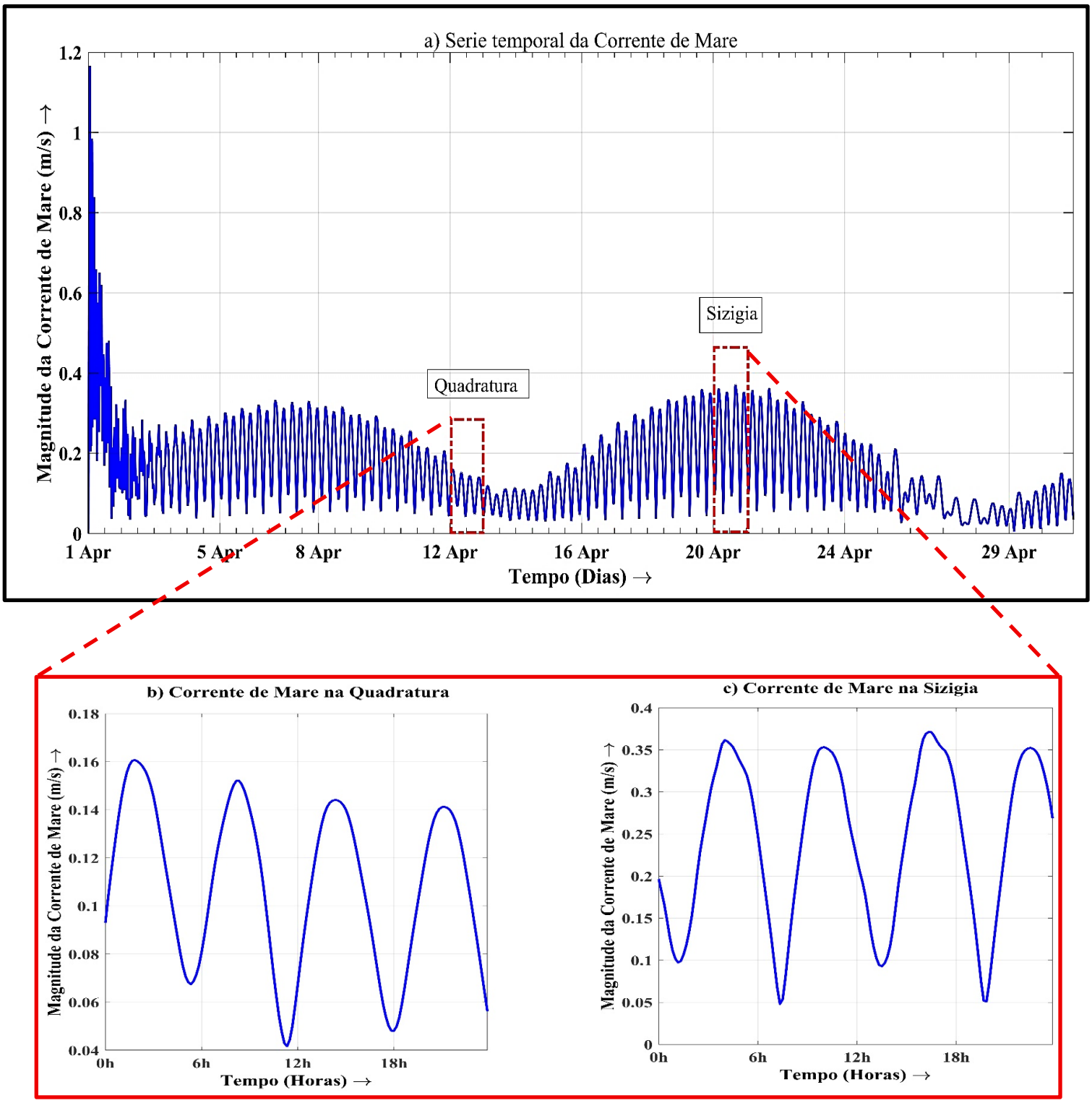


Figura 12. *Representação da série temporal da corrente de maré para o período de 30 dias do mês de Abril.*

Para as análises espaciais da circulação durante enchente e vazante, foram selecionados instantes específicos dentro das fases de sizígia e quadratura, conforme indicado na Figura 12 b) e c). A Figura 13 mostra a distribuição espacial das velocidades das correntes durante os períodos de enchente e vazante da maré de quadratura e de sizígia.

Durante o período da ocorrência da enchente da maré de quadratura (Figura 13 a), foram selecionados instantes específicos de tempo para a fase da vazante e enchente no sentido de observar qual seria o comportamento da corrente de maré para aquele instante. Observou-se que para o período 5h00 correspondendo a enchente a corrente flui para dentro da baía com padrões canalizados nos estreitos atingindo valores máximos da corrente até cerca de 0.12 $m\ s^{-1}$, especialmente nas proximidades da entrada da baía. Na fase da vazante ocorrida no dia 12 de Abril, a partir do qual o fluxo é direccionado para fora da baía, foi analisado para o período das 10h00 que a magnitude foi relativamente maior em relação à enchente, os seus valores atingem mais de 0.12 $m\ s^{-1}$, principalmente na região mais estreita de acesso à Baía.

Na Figura 13 b), que representa a maré de sizígia, para o dia 20 de Abril de 2019, notou-se um aumento considerável na velocidade da corrente. Na fase de vazante para o instante selecionado das 6h00, os valores mínimos permaneceram próximos de 0.02 $m\ s^{-1}$, mas os máximos aumentam relativamente atingindo cerca de 0.35 a 0.4 $m\ s^{-1}$ nas zonas de maior aceleração do fluxo. Durante a enchente, ocorrida às 10h00, o comportamento repete-se, com intensificação das correntes nas passagens mais confinadas, onde a velocidade máxima também alcançou os 0.4 $m\ s^{-1}$. A diferença outrora referida, denota a importância das marés na hidrodinâmica na Baía de Pemba. As fortes correntes de maré de sizígia podem ter uma enorme influência na dispersão de material em suspensão, incluindo sedimentos, para locais distantes da sua origem (Oliveira *et al.,* 2023).

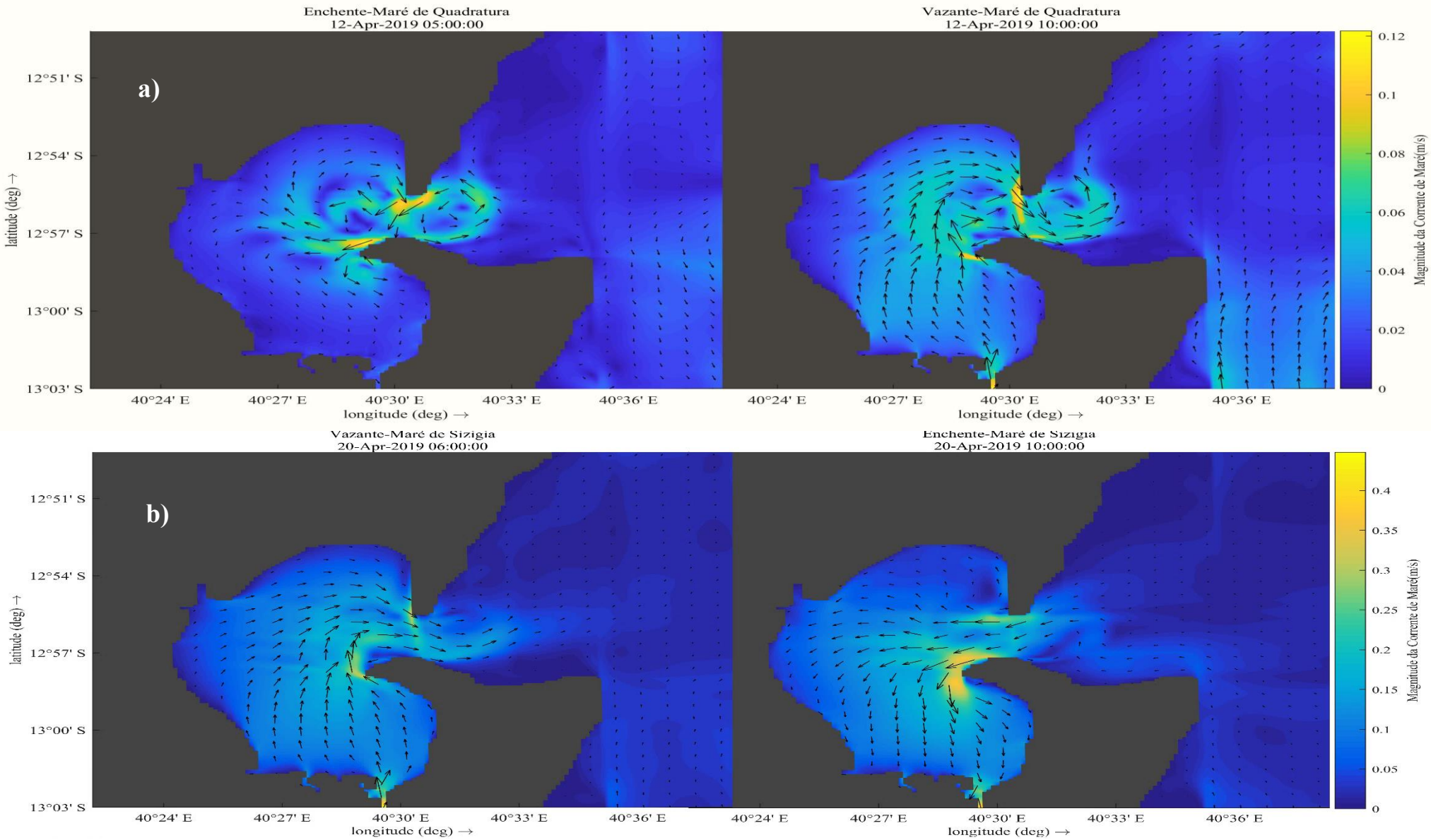


***Figura 13**. Direcção e magnitude das correntes durante a fase da maré de Quadratura e de Sizígia, representação dos fluxos de entrada (enchente e n vazante) para o ano de 2019.*

3.1.2. Circulação Hidrodinâmica: Condições extremas da Baia de Pemba

As condições de fronteira, referente à hidrodinâmica e meteorologia das simulações considerando a passagem do ciclone Kenneth, ocorrido em 25 de Abril de 2019, são descritas neste ponto na Figura 14. As simulações focaram-se na análise da velocidade do vento e da magnitude da corrente de maré, com o intuito de compreender os impactos dos fenómenos extremos na circulação e na dispersão dos microplásticos na Baía de Pemba.

3.1.3. Direcção e velocidade do vento

Para as simulações da hidrodinâmica da Baía de Pemba efectuadas para o presente estudo considerando a ocorrência do ciclone Kenneth, as velocidades máximas do vento atingiram valores elevados, cujas magnitudes variaram entre 24 $m\ s^{-1}$ e 25.5 $m\ s^{-1}$, concentrando-se na porção norte a nordeste da Baía. Em contrapartida, as velocidades mínimas do vento durante o período analisado apresentaram valores em torno de 21.5 $m\ s^{-1}$ e 22.5 $m\ s^{-1}$, especialmente nas áreas mais abrigadas da baía, como a sua parte sul e sudoeste.

3.1.4. Corrente de Maré

Durante a passagem do ciclone tropical Kenneth sobre a Baia de Pemba, as simulações hidrodinâmicas revelaram um aumento acentuado na intensidade das correntes de maré, com valores máximos de magnitude atingindo 0.56 $m\ s^{-1}$ e mínimos, oscilando em torno de 0.05 $m\ s^{-1}$. Estas velocidades elevadas foram registadas na zona de maior constrição geomorfológica como estreitamentos e canais de saída da Baía, onde o escoamento é naturalmente acelerado. Realçando que a intensificação da hidrodinâmica ocorreu sob o regime de maré de quadratura. A alteração na circulação da Baía, destaca o papel pertinente do vento ciclónico como amplificador da circulação costeira, mostrando a capacidade deste em intensificar o transporte horizontal, independentemente da fase do ciclo de marés.

A coexistência de regiões com correntes intensas durante o ciclone reflecte a complexa interacção entre a forçante atmosférica (vento), a morfologia costeira e o regime de maré, como descrito em trabalhos semelhantes sobre ambientes estuarinos sob influência de tempestades tropicais (Zhang *et al*., 2020).

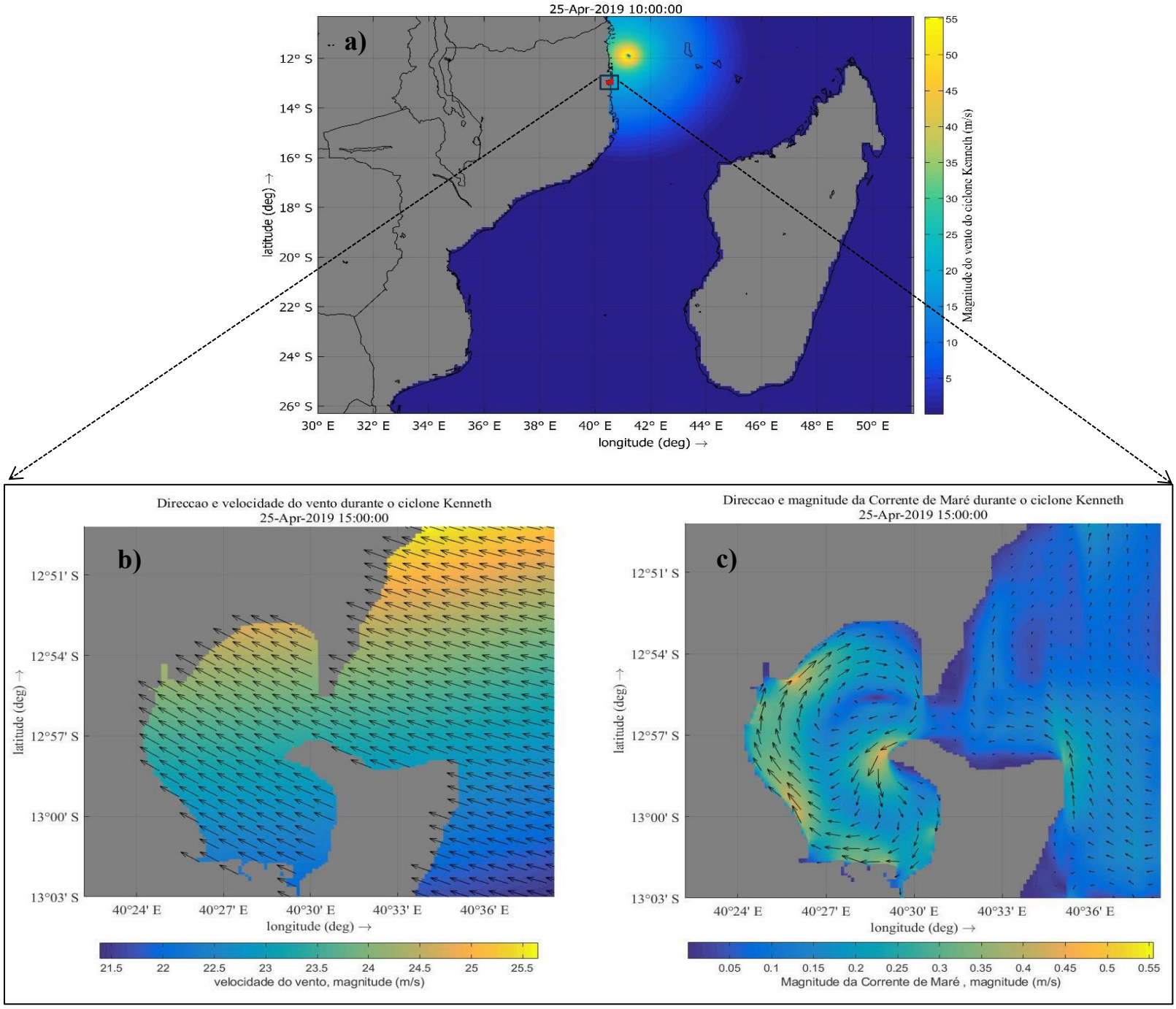


Figura 14. *Representação da velocidade do vento e Magnitude da corrente durante a ocorrência do Ciclone Kenneth,* ***a****) modelo regional ilustrando a entrada do ciclone Kenneth,* ***b****) Direcção e Magnitude do Vento para a Baia de Pemba e* ***c****) Direcção e Magnitude da Corrente de Maré.*

3.2.Distribuição de Microplásticos na Baía de Pemba

A Figura 15 apresenta imagens microscópicas representativas dos microplásticos encontrados nas amostras da Baía de Pemba. Relativamente aos tipos, foram identificados os microplásticos do tipo fibra e fragmento. Dos dois tipos de microplásticos identificados, registou-se a predominância das fibras, tanto em amostras de sedimentos como também na coluna de água, totalizando 91 e os restantes 37 foram fragmentos. Nas imagens a), e), d) g), i) e k), foram identificados como sendo microplásticos do tipo fragmento e nas imagens b), c) f), h), j) e l) classificam-se como fibra/filamentos.

Os microplásticos encontraram-se distribuídos conforme ilustra a Figura 16, em dois compartimentos ambientais distintos analisados, nomeadamente na coluna de água e em sedimentos costeiros, incluindo a quantidade de microplásticos encontrada em cada amostra. Dos 128 microplásticos identificados nas amostras colectadas na Baía de Pemba, 74 foram provenientes das amostras de água e os remanescentes 54 foram precedentes dos sedimentos.

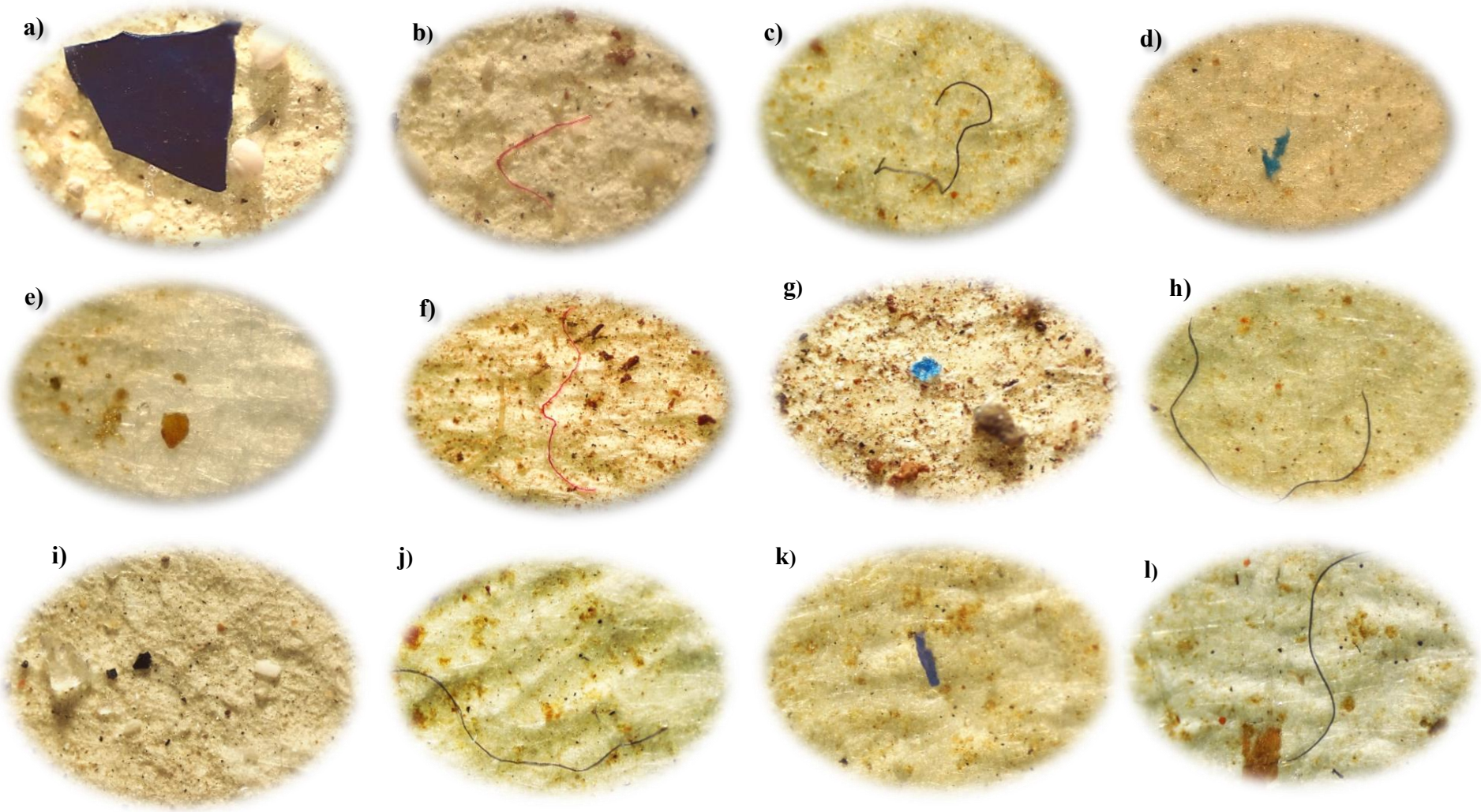


Figura 15. *Alguns dos microplásticos identificados na análise, a), e), d) g), i) e k) são fragmentos, b), c) f), h), j) e l) classificam-se como fibra/filamentos.*

As porções de microplásticos diferiram substancialmente entre as amostras de sedimento e água colectadas na área de estudo. Os pontos de maior concentração foram observados nas amostras WS_8, WS_3 e SS_1A, com 14, 11 e 11 partículas de microplásticos respectivamente, indicando zonas de maior acúmulo das partículas em referência. Seguiram-se, como locais de concentração intermediária, as amostras WS_1, WS_9, SS_2A, SS_4 e SS_5, que apresentaram entre 9 e 8 partículas, sugerindo uma presença moderada de microplásticos. Ainda dentro da categoria de locais com concentrações moderadas destacam-se as amostras SS_1B e WS_2, com 7 partículas cada. Por fim, os pontos com menores concentrações foram representados pelas amostras SS_2B, WS_4, WS_5 e WS_6, com 3, 6, 5 e 2 partículas, respectivamente. Destaca-se a amostra WS_6 como o local com menor registo de microplásticos em todo o conjunto de dados.

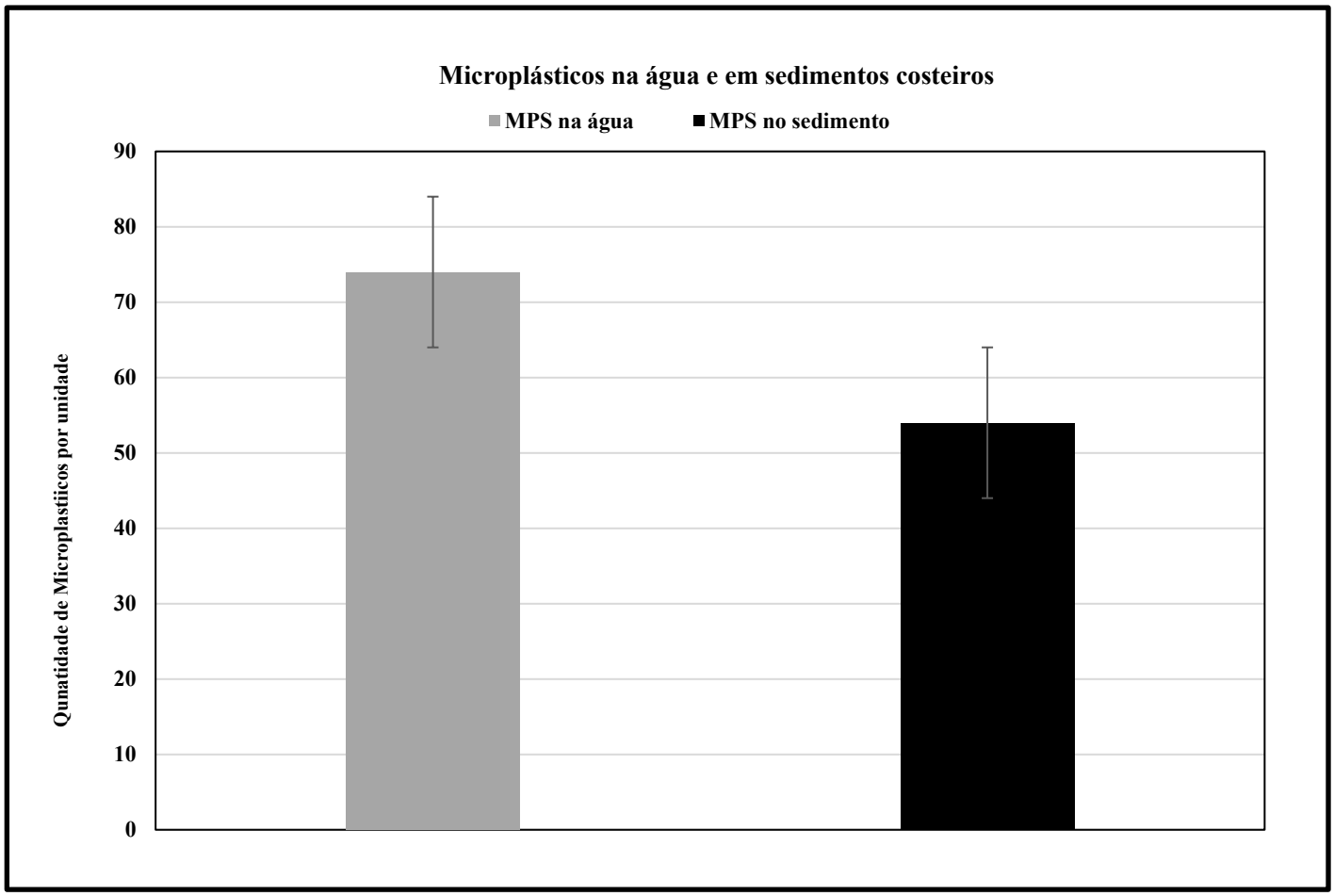


***Figura 16**. Quantidade de Microplásticos na água e em sedimentos.*

3.2.1. Classificação dos Microplásticos por Tamanho

A análise da variação do tamanho dos microplásticos na Baía de Pemba é descrita na Figura 17, com os resultados organizados em categorias como fragmentos e fibras, tanto para as amostras de sedimento quanto para as de água. De modo geral, os microplásticos analisados apresentam tamanhos que variaram em média/desvio padrão de ≤1 *mm* até ≤3 *mm*, com uma predominância de microplásticos de aproximadamente 2 *mm*. Os maiores tamanhos foram observados nas amostras de sedimento, com uma média de cerca 2 *mm*, atingindo máximos superiores a 3 *mm* e mínimos abaixo de 0.5 *mm*.

Em contraste, os microplásticos encontrados nas amostras de água apresentaram, em média, tamanhos ligeiramente menores, de cerca de 1.5 *mm*, com variações entre valores superiores a 2 mm e inferiores a 0.5 *mm*. As fibras destacaram-se como o tipo de microplástico mais amplamente distribuído na Baía de Pemba, tendo estados presentes na maioria das amostras, tanto de sedimentos quanto de água. Os microplásticos do tipo fibras apresentaram também a maior variedade de tamanhos, com vários microplásticos ultrapassando os 3 *mm*, possivelmente reflectindo sua origem em materiais sintéticos de uso pesqueiro, como cordas e redes.

Por outro lado, os fragmentos foram menos representativos em número e exibiram tamanhos predominantemente inferiores a 1 *mm*, especialmente nas amostras de água. Os tamanhos menores, com médias próximas de 0.5 *mm* em sedimentos e cerca de 0.25 *mm* em água, são possivelmente associados às partículas oriundas de processos de fragmentação ou desgaste, intensificados pela acção hidrodinâmica local.

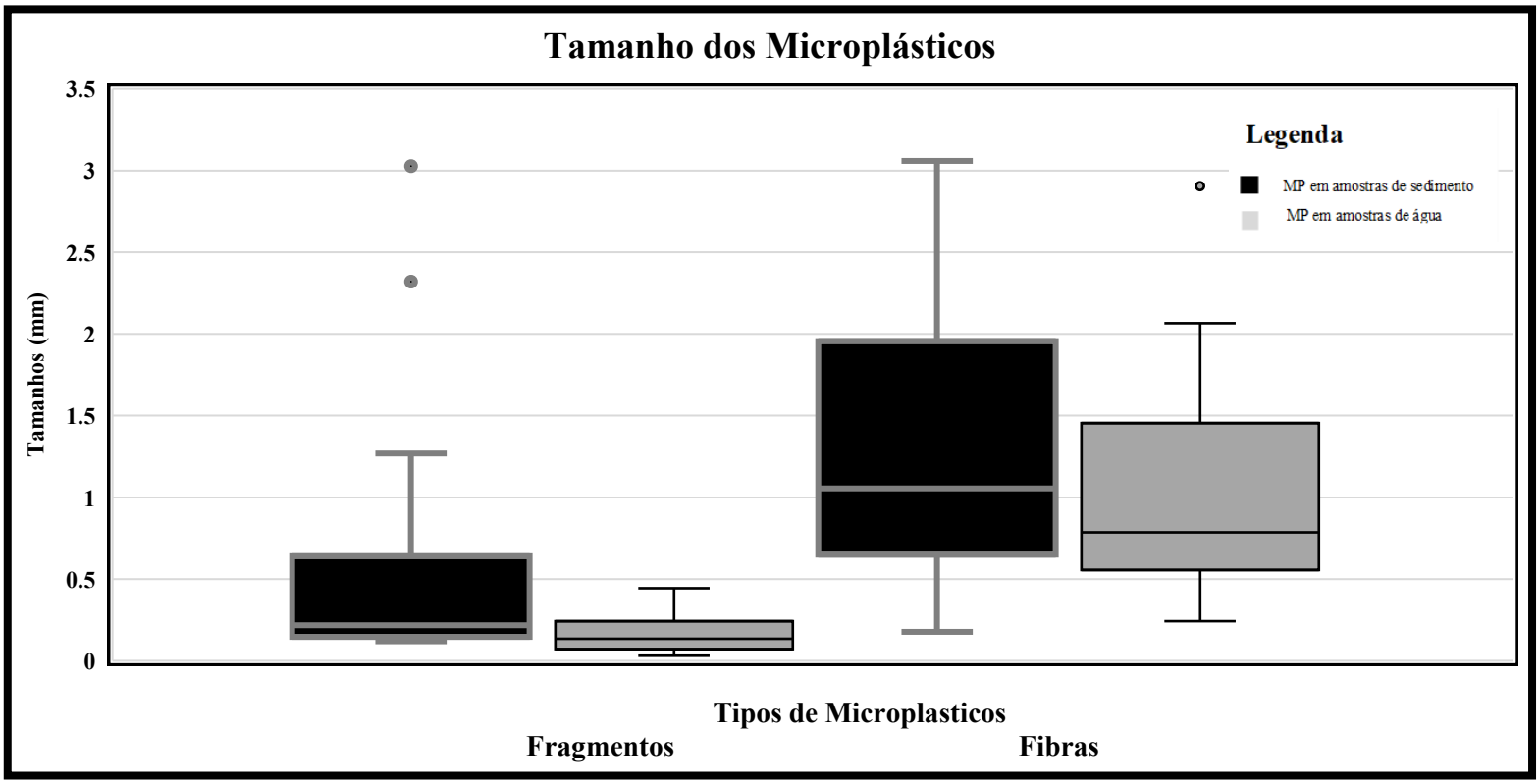


Figura 17.*Quantidade de Microplásticos na água e em sedimentos.*

3.2.2. Transporte de Microplásticos sob Condição Hidrodinâmica Normal

As concentrações de microplásticos observadas ao longo da Baía de Pemba descritas na Figura 15 e 16 serviram de base para as simulações numéricas de transporte de partículas, desenvolvidas sob os dois cenários hidrodinâmicos abordados neste trabalho, nomeadamente, circulação sob ventos normais e ciclónicos. Os resultados que se seguem mapeados e tabelados descrevem as simulações de transporte de partículas de microplásticos sob condições normais da circulação da Baía da Pemba, considerando os dois pontos diferentes de emissão das partículas.

A Figura 18, ilustra os resultados das simulações do primeiro cenário. Há registos de momentos distintos de dispersão dos microplásticos na Baía, caracterizados pelo primeiro momento, que representa o movimento inicial dos microplásticos, que foram inseridos no modelo no dia 1 de Abril, na Figura 18-a). De referir que os pontos de emissão correspondem à localização de microplásticos que foram identificados em amostras reais (Figura 18, painéis a, b e c).

No início da simulação (Figura 18 a)), verificou-se que as 128 partículas simuladas se encontravam em regiões próximas às margens e em outras regiões centrais da Baía de Pemba (pontos específicos onde foram lançadas as partículas).

Com o avanço da simulação e durante a fase de enchente da maré no dia 12 de Abril às 05:00 (Figura 18b), observou-se uma dispersão mais ampla, totalizando cerca de 62 partículas. Destaca-se o aumento da presença de partículas no alto-mar (22 partículas), ainda com predominância no interior da Baía (32 partículas) e uma redução na margem costeira (8 partículas). Esse comportamento sugere que o fluxo de entrada de água promoveu o transporte activo para regiões mais centrais, reduzindo a acumulação junto à costa.

Na fase de maré vazante (12 de Abril às 22:00, Figura 18c), ocorreu uma mudança significativa na distribuição: o número total de partículas elevou-se para 80, com um expressivo aumento no alto-mar (43 partículas) e um crescimento na margem costeira (18 partículas), enquanto a quantidade dentro da Baía caiu para 19 partículas. Este padrão evidencia que o fluxo de saída intensificou a exportação de partículas para fora da Baía, redistribuindo também parte delas ao longo da linha costeira.

No cenário 2, que representa o comportamento da baía na maré de sizígia, as partículas foram inicialmente introduzidas em uma zona de estreitamento da baía, (Figura 18, painéis d, e, f). No instante inicial (Figura 18d), a maior parte das 50 partículas registradas manteve-se no interior da Baía (33 partículas), com 10 na margem e apenas 7 no alto-mar, reflectindo o confinamento inicial do material na área de emissão.

Na fase de maré vazante, registrada às 06:00 do dia 20 de Abril (Figura 18e), verificou-se uma redução da concentração total para 51 partículas, com aumento para fora da Baia (18 partículas), e presença moderada dentro da Baía (26) e na margem (7). A maré de sizígia intensificou a capacidade de transporte para regiões mais afastadas, favorecendo a saída das partículas para o oceano. Por fim, no instante de enchente às 21:00 (Figura 18f), o número total de partículas aumentou para 90, reentrada de partículas no domínio. Destaca-se a predominância para fora da Baía (47 partículas), seguido pela margem costeira (22) e interior da Baía (21).

***Tabela 6**. Quantificação dos Microplásticos para cada ponto de observação referente a cada instante específico representado no mapa.*

Cenário	Instante	Painel	Margem Costeira	Dentro da Baía	Fora da Baia	Total Aproximado
Cenário 1 (Quadratura)	**t5h**-12-Abr-2019	**b)**	8	32	22	62
	t22h – 12-Abr-2019	**c)**	18	19	43	80
Cenário 2 (Sizígia)	**t6h** – 20-Abr-2019	**e)**	7	26	18	51
	t21h – 20-Abr-2019	**f)**	22	21	47	90

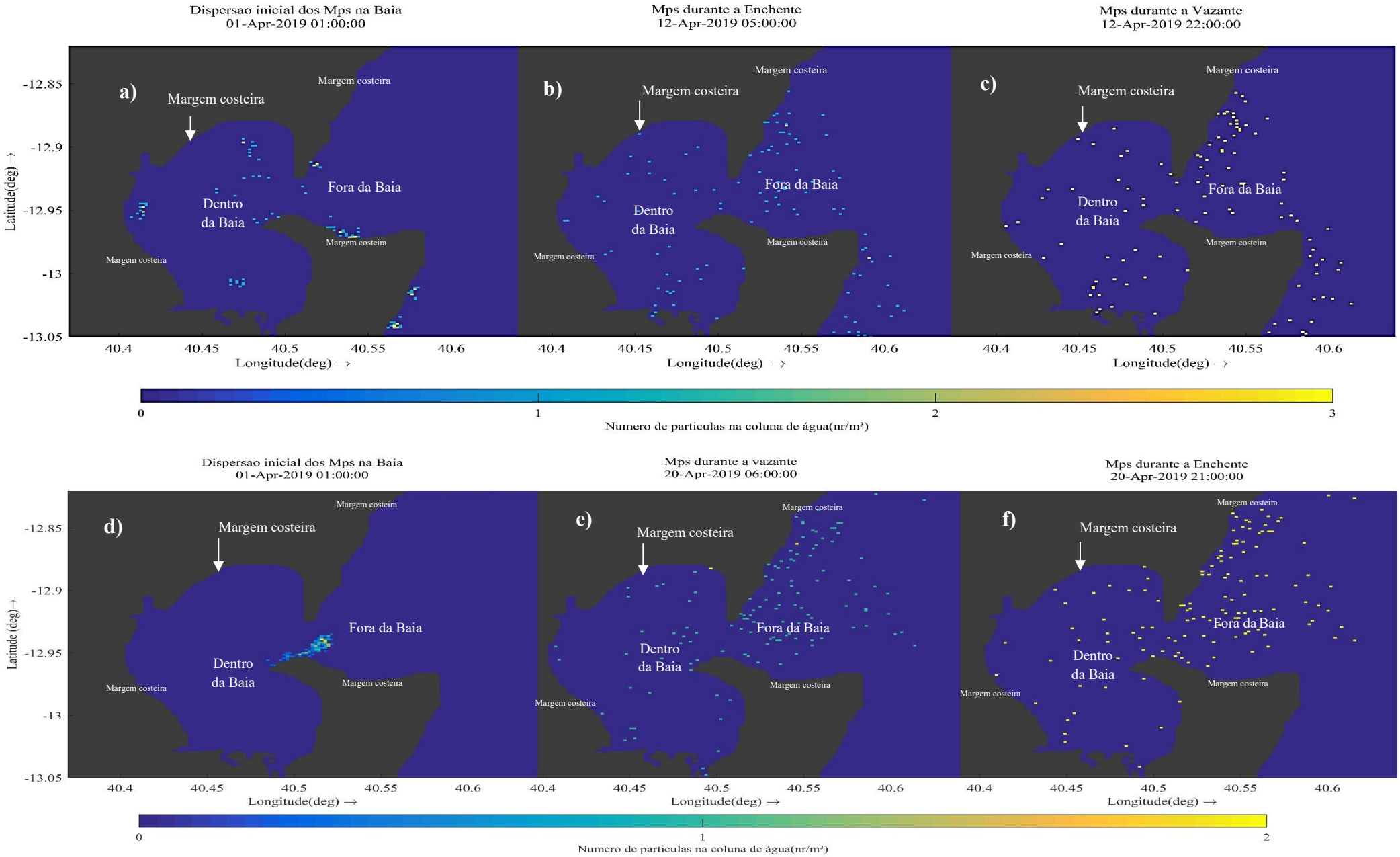


Figura 18. *Distribuição de Microplásticos durante a enchente e vazante na maré de Quadratura e Sizígia, a), b), c) Cenário 1, d), e) e f) Cenário 2.*

3.2.3. Circulação Hidrodinâmica - Condição de Ocorrência de Ciclone na Baía de Pemba com Transporte de Microplásticos

A simulação do transporte de partículas sob condições de fronteira normais, revelou padrões de dispersão influenciados pelas correntes de maré. Em seguida, na Figura 19, é apresentado o resultado que descreve o transporte de microplásticos, como resultado de duas forçantes induzidas pelo Ciclone Tropical Kenneth (vento + corrente de maré). No primeiro cenário, referente à combinação das forçantes maré e ventos ciclónicos no dia 25 de Abril às 15h00, observou-se a dispersão das partículas em vários locais ao longo de toda a Baía, com concentrações e acúmulo ao redor das margens da costa (Figura 19-a). A Tabela resume esta distribuição espacial, com 40 partículas registradas na margem, 20 partículas dentro da baía, e 45 partículas fora da baía, indicando um padrão de dispersão moderado e retenção significativa nas zonas costeiras. Na Figura 19-b, que ilustra o segundo cenário, caracterizado pela disposição inicial de partículas na zona de estreitamento da Baía, verificou-se uma maior eficiência no transporte em direcção ao oceano aberto, com 60 partículas contabilizadas fora da baía, evidenciando o papel das correntes intensificadas pela topografia e pelos ventos. Neste caso, as concentrações na margem costeira e dentro da baía reduziram para 30 e 14 partículas, respectivamente. Isso demonstra que, sob influência ciclônica, há uma tendência de exportação de microplásticos para fora da baía. As partículas libertadas na coluna de água foram transportadas predominantemente na direcção nordeste, seguindo o fluxo das correntes que denotaram alguma intensificação devido aos ventos associados ao ciclone. Este comportamento está de acordo com a literatura, que indica que ventos ciclónicos geralmente criam correntes superficiais intensas na direcção do vento (Ipinoza, 2019). O transporte das partículas em zonas de maior intensidade de corrente (próximas ao estreitamento da baía) foi mais ágil e direccionado, enquanto em áreas com correntes mais fracas, as partículas tenderam a agrupar-se, indicando zonas de retenção.

.

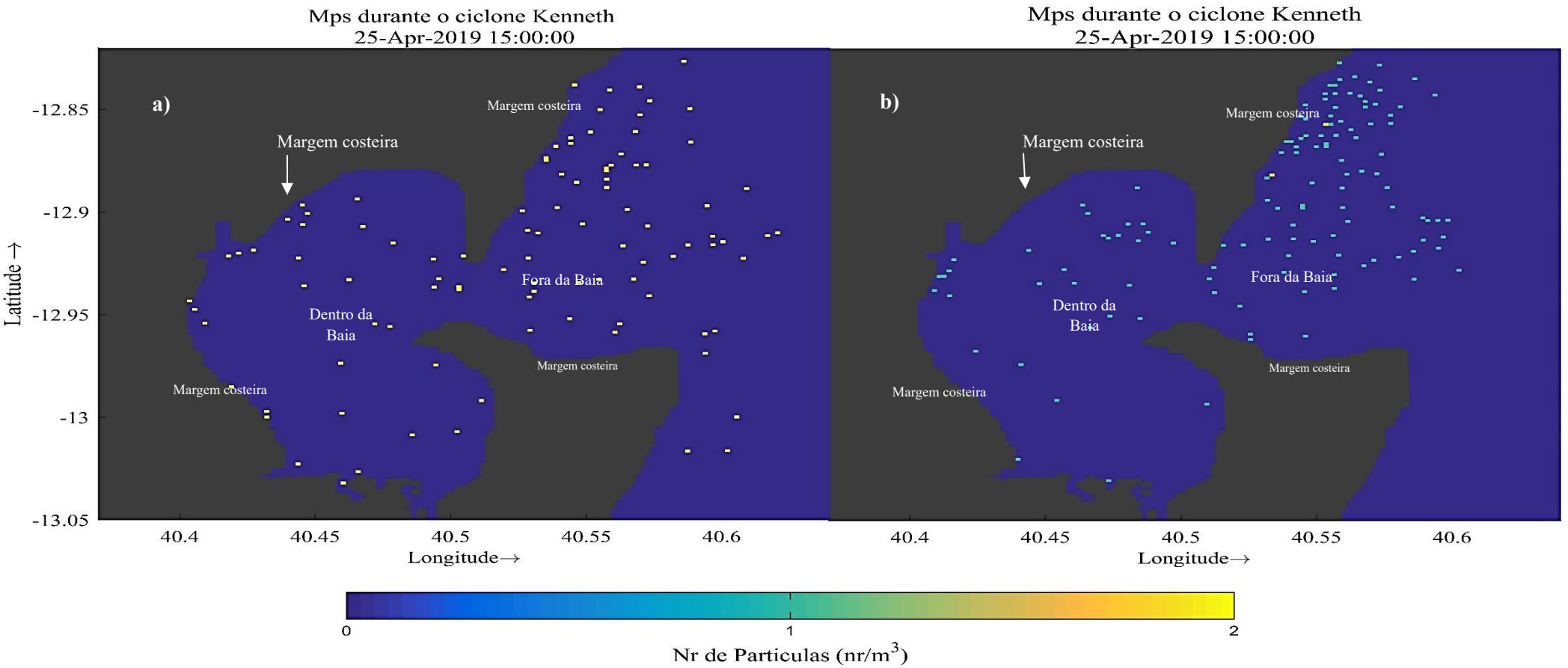


Figura 19. *Distribuição dos Microplásticos durante a ocorrência do ciclone no cenário 1 (**a**) e (**b**) cenário 2.*

3.2.4. Validação do Modelo

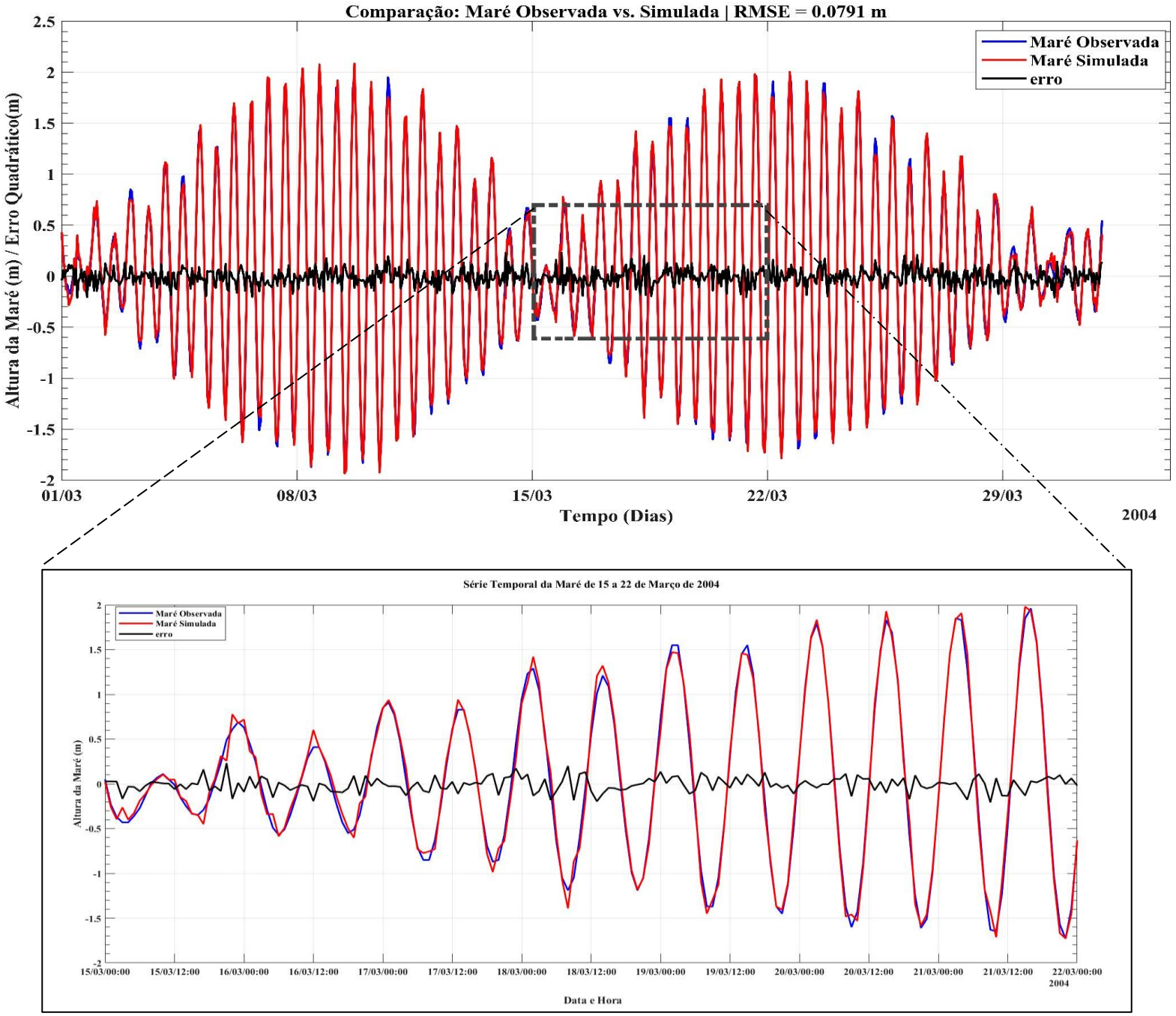


Figura 20. *Comparação entre a maré modelada e observada com representação do RMSE e o erro ou resíduo.*

A Figura 20 ilustra duas representações temporais da elevação da maré, comparando os valores observados com os simulados pelo modelo hidrodinâmico *Delft3D* ao longo do mês de Março de 2004. A série completa (gráfico superior) mostra a evolução da altura da maré em metros ao longo de aproximadamente 30 dias, enquanto o gráfico inferior apresenta um *zoom* entre os dias 15 e 22 de março, com maior resolução temporal.

As curvas da maré observada (linha azul) e da maré simulada (linha vermelha) mostram-se visivelmente semelhantes, com padrões coerentes em termos de periodicidade e amplitude. Em ambos os gráficos, é possível observar a presença de marés semidiurnas**,** com dois picos e dois vales por dia, o que está de acordo com o regime de marés predominante na costa norte de Moçambique. O gráfico a preto representa o erro pontual entre a maré simulada e a observada (diferença entre as duas curvas em cada instante). O erro oscila de forma quase simétrica em torno de zero, indicando que não há um viés sistemático na simulação (isto é, o modelo não tende a superestimar ou subestimar a maré de forma constante).

O valor médio dessas diferenças é quantificado pela Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)**,** que foi de 0.0791 *metros***.** Este valor indica que, em média, a discrepância entre os dados observados e simulados é de cerca de 7.9 *cm* ao longo do período considerado. Esta magnitude de erro está dentro dos padrões aceitáveis para modelações hidrodinâmicas costeiras, especialmente em ambientes com características geomorfológicas complexas, como a Baía de Pemba.

No intervalo ampliado (gráfico inferior), as curvas mantêm uma correspondência bastante estreita, com pequenas defasagens nos momentos de preia-mar e baixa-mar. As amplitudes estão bem representadas, embora a curva simulada (vermelha) apresente ligeiras sobre-elevações em alguns ciclos de maré, particularmente entre os dias 17 e 20. Essas diferenças são reflectidas na linha do erro, que exibe picos localizados de até ±0.15 *m*, mas que retornam rapidamente à média.

4. Discussão

4.1.1. Circulação Hidrodinâmica da Baia de Pemba (Condição Normal e Transporte de Microplásticos)

As características hidrodinâmicas que detém a Baía de Pemba em condições normais, revelam que esta região é fortemente influenciada pelo regime de marés semi-diurnas, caracterizado por duas preia-mares e duas baixa-mares ao longo do dia. Estes resultados se encontram em consonância com os achados de Silva (1996). A dinâmica da presente variação do nível do mar imposta pelo sistema da Baia de Pemba determina alternância regular entre as fases enchente e vazante, resultando em circulação oscilatória que influencia directamente os fluxos internos da Baía. Apesar de se observar um aumento nas velocidades de corrente durante a maré de sizígia, alcançando picos de até 0.4 $m\ s^{-1}$, os valores gerais da circulação de maré simulada na Baía de Pemba não se mostraram tão acentuados quanto se poderia antecipar para esse tipo de forçamento. Esta atenuação pode estar intimamente relacionada às características batimétricas da baía, notadamente sua elevada profundidade média. Em baías profundas, os forçamentos superficiais, como o vento, têm efeito limitado nas camadas inferiores da coluna de água, reduzindo a eficácia da transferência de energia mecânica verticalmente (T. Wu et al., 2022). Este comportamento foi também observado pela LNEC (2020) em seu estudo sobre correntes, ondas e transporte de sedimentos na Baia de Nacala a partir da qual o máximo estimado na velocidade da corrente durante a sizígia foi cerca de 0.5 $m\ s^{-1}$ na entrada.

Ademais, a dinâmica local dentro do contexto regional do Canal de Moçambique, é caracterizada por uma circulação caracterizada por actividade de mesoescala, dominada por vórtices e meandros de água, que se propagam em sentido sul. Os vórtices de mesoescala interagem com a plataforma continental e a batimetria costeira, podendo influenciar directamente os padrões de circulação das baías litorâneas ao longo da costa moçambicana (Halo *et al.,* 2014). No caso da baía de Pemba, sua posição geográfica estratégica inserida na borda ocidental do canal sugere que as interacções com os vórtices de mesoescala, em alguns pontos da região, podem modular, em escala mais ampla, os padrões de renovação da água na baía, como observado em vários pontos do local em estudo.

Transporte de Microplásticos

Em relação ao transporte de microplásticos, os resultados das simulações realizadas demonstram, de forma concisa, que o transporte e a dispersão dos microplásticos na Baía de Pemba é fortemente

influenciado pelos padrões de circulação hidrodinâmica, os quais são modulados, pelo regime semi-diurno de marés. A presença diferenciada de microplásticos na coluna de água pode ser explicada pela sua capacidade de permanecer em suspensão ou de sedimentar, comportamento que varia em função do tamanho, formato, densidade das partículas e das condições hidrodinâmicas locais (Pasquier *et al.*, 2024). Contudo, nenhum destes dois parâmetros foi avaliado neste trabalho.

A distribuição vertical e horizontal de microplásticos em uma coluna de água é determinada pelos efeitos conjuntos do transporte de advecção e forças de mistura turbulenta (Li *et al*., 2020). A análise comparativa entre os dois cenários simulados nos instantes ($\mathbf{t}_0$, $\mathbf{t}_{12}$ e $\mathbf{t}_{20}$) indica que, apesar das diferenças nos pontos de emissão e no regime de maré considerado, as partículas seguiram trajectórias semelhantes, com tendência de deslocamento para o sector norte da Baia. Este padrão sugere que a hidrodinâmica local exerce controle dominante sobre o transporte de partículas. A abundância de microplásticos está directamente relacionada à flutuação da maré, com maior abundância na maré cheia (sizígia) do que na maré morta isto é na quadratura (Pasquier *et al.,* 2024). No cenário 1, correspondente à circulação sob ventos normais locais e partículas emitidas a partir de zonas onde foram identificadas as concentrações em amostragens reais, observou-se, no instante inicial (01h), um acúmulo eloquente de microplásticos nas margens e no interior da baía, com presença residual para fora da baía. Após 11 dias de simulação para o primeiro cenário, observou-se uma redistribuição acentuada dos microplásticos ao longo da Baia de Pemba.

Durante a fase de maré cheia (sizígia), notou-se uma redistribuição mais homogênea das partículas. As partículas apresentaram deslocamento progressivo com menor concentração junto à costa e maior dispersão para zonas centrais interiores da baía, o que indica que os microplásticos foram transportados pela acção conjunta das correntes de maré com os ventos de superfície da região. O comportamento outrora referido pode ser atribuído à tendência das marés de enchente. Esse padrão é coerente com o descrito por L. C. M. Lebreton *et al*., (2017) que modelaram o transporte de microplásticos globalmente e destacaram que, em regiões costeiras, as marés de enchente tendem a redistribuir partículas para o interior, especialmente quando associadas a geometrias de baías profundas e estreitas. Na maré vazante, os microplásticos demonstraram um comportamento de escoamento para fora da baía, mas com retenção em algumas áreas tendo maiores quantidades de microplásticos a serem redistribuídos em relação na maré enchente, este caso foi também constatado por Rowley *et al*., (2020) que observaram maiores quantidades de microplásticos na água durante a maré vazante em oposição à maré cheia.

Em contrapartida os resultados obtidos divergem parcialmente do trabalho de Wu *et al*., (2020) em seu estudo sobre a distribuição espaço-temporal de microplásticos em águas superficiais e sedimentos do rio *Maozhou* denotaram uma maior quantidade de microplásticos durante a maré quadratura do que na maré de sizígia. No segundo cenário observou-se que durante a ocorrência da maré de sizígia, é atingido o pico de microplásticos, sobretudo na fase da maré enchente. Este padrão corrobora as observações de Pasquier *et al.* (2024), que indicaram maior abundância de microplásticos em marés de sizígia do que em quadratura, devido ao maior volume e velocidade das massas de água.

A interacção correntes geradas por marés associadas ao vento local resulta em padrões de circulação mais complexos, incluindo a formação de zonas de convergência e ressurgência, que contribuem para o acúmulo ou dispersão dos microplásticos. Segundo Isobe *et al*., (2014) ventos persistentes podem induzir a formação de células de Ekman, em que a água é deflectida 90° em relação à direcção do vento, promovendo o transporte lateral de partículas para áreas marginais ou zonas de retenção. A topografia fechada e a orientação da Baía de Pemba, associadas a ventos costeiros predominantes, parecem favorecer a retenção de microplásticos no sector norte da baía, tal como observado nos resultados simulados. A persistência de partículas nas margens ao longo dos dois cenários sugere a existência de zonas de estagnação e recirculação, o que reforça a hipótese de acúmulo em áreas de baixa energia, mesmo diante de forçamentos intensos. Este fenómeno é também descrito por Kooi *et al,.* (2017), que observaram padrões de retenção em regiões costeiras protegidas. Em ambos cenários, a saída de parte das partículas no instante selecionado da fase de vazante, e sua acumulação no Norte, indica que para além das marés e o vento, existem outras forçantes, como por exemplo a presença de estruturas de mesoescala, que contribuem para a redistribuição e transporte de microplásticos na Baía de Pemba. Estudos como Halo *et al.,* (2014) confirmam que o Canal de Moçambique é dominado por grandes vórtices anticiclónicos (giro horário no Hemisfério Sul), que se formam ao norte (próximo às Ilhas Comores) e se propagam para o sul ao longo da costa de Moçambique, esses vórtices têm a capacidade de capturar e transportar microplásticos na superfície do mar. A presença desses vórtices na região embora não se tenha analisado neste trabalho pode, portanto, explicar também a acumulação observada de microplásticos no sector norte da baía. Além disso, a circulação hidrodinâmica normal da baía, caracterizada por fluxos oscilatórios induzidos por marés e reforçada por ventos sazonais, pode interagir com esses vórtices, criando zonas de convergência que favorecem a retenção de partículas.

4.1.2. Distribuição de Microplásticos na Baía de Pemba

Os resultados obtidos nesta secção, evidenciam a distribuição heterogénea de microplásticos, representando uma quantidade de microplásticos na água equivalente a 57.81% em relação a sedimentos costeiros com uma taxa de 42.19% da quantidade de microplásticos identificada. A diferença observada esta relacionada em parte a menor quantidade de amostras colectadas em sedimentos (7) em relação à água (9), mas também é sustentada por processos ambientais como baixa densidade, alta flutuabilidade das partículas, acção das correntes de maré, vento, tempo de residência das partículas entre outros (Zhang *et al.,* 2020). Grande parte dos microplásticos flutuam nos oceanos, devido à baixa densidade (Leonor,2020), embora não se tenha analisado a densidade dos polímeros existentes em cada microplástico encontrado, este facto auxilia na compreensão de sua distribuição ao longo da coluna de água. As amostras de água foram colectadas em pontos próximos à costa situados a ~1 ± 2km do litoral. Realçar que concentração de microplásticos tende a ser maior em regiões costeiras ou estuários adjacentes a terra do que em áreas de mar aberto (Zhang *et al*., 2020). Em baías semi-fechadas podem apresentar concentrações ainda mais elevadas devido a sua morfologia. Em relação à tipologia, importa referir que as fibras foram o tipo de microplásticos encontrado em abundância na Baía de Pemba. Este resultado pode ser explicado pela distribuição das fontes de fibras ao longo do mundo, pois estima-se que cerca de 21.5 mil toneladas de fibras sintéticas são liberadas anualmente nos esgotos domésticos ao redor do mundo (Corrêa, 2022). Outro factor por detrás das possíveis fontes de entrada deste tipo de microplástico está também relacionada à actividade de pesca, dado que a região onde as amostras foram colectadas é conhecida pela prática intensiva da pesca (Alberto, 2022) e é caracterizada pela produção de macroalgas As fibras são detectadas na água do mar em regiões onde pesca é activa (Zhang *et al.,* 2020). As fibras identificadas apresentaram uma grande variabilidade de tamanho, na faixa de 0.1*mm* a 2 *mm* (em algumas amostras foram identificadas fibras como mais de 3 mm) o que pode indicar a sua entrada recente no meio ambiente marinho, visto que partículas maiores sofrem fragmentação progressiva ao longo do tempo (Cole *et al*., 2011). Os fragmentos, embora estejam em menor quantidade (37 unidades) em relação as fibras, emergem como a segunda categoria mais representativa. A sua origem está associada à fragmentação de embalagens plásticas e outros objectos descartados, especialmente em áreas urbanizadas próximas da região (Andrady, 2011; Vianello *et al*., 2013). Para além das fontes mencionadas anteriormente, os microplásticos na água do mar podem advir a partir da prática do turismo. A região da Baía de Pemba é conhecida por ser um ponto atractivo para a prática desta actividade (Azevedo, 2006). A actividade turística contribui com a introdução de grandes quantidades de plásticos

para os ambientes costeiros marinhos devido ao descarte inadequado de resíduos (Auta *et al.*, 2017). Em áreas costeiras os plásticos são liberados directamente no oceano por despejo mal administrado ou por transporte marítimo e actividades recreativas (Li *et al.,* 2020). Os plásticos por sua vez sofrem o desgaste, tornando-se em microplásticos. A análise do tamanho dos microplásticos do tipo fragmento revelou uma predominância de fragmentos com dimensão inferior a 1 *mm* e com algumas excepções abrangendo até 3 *mm* para ambos compartimentos (água e sedimento). O destaque dos microplásticos do tipo fragmento, situou-se na faixa de 0.01*mm* a 0.6 *mm*, característica comum a partículas resultantes da degradação secundária de materiais plásticos maiores. Maior parte dos microplásticos do tipo fragmentos encontrados na coluna de água eram de tamanho extremamente reduzido em relação aos fragmentos encontrados em sedimentos, facto que pode estar relacionado aos principais fenómenos que ocorrem na coluna de água como processos contínuos de degradação física, fotoquímica e biológica de plásticos maiores (Kye *et al*., 2023). A outra causa que pode estar relacionada ao tamanho reduzido dos fragmentos são as forças de degradação (exemplo, radiação ultravioleta e intemperismo) que reduzem o tamanho dos microplásticos na água e a exposição prolongada a essas forças de degradação degrada os microplásticos maiores em microplásticos menores (Cole *et al*., 2011; Deocaris *et al*., 2019).

4.1.3. Impacto dos eventos extremos na distribuição dos microplásticos na Baía de Pemba

Em relação à hidrodinâmica da Baia de Pemba face à ocorrência do ciclone Kenneth, houve um severo aumento no que concerne a velocidade da corrente de maré dos valores médios de 0.2 $m\ s^{-1}$, tendo atingido os 0.55 $m\ s^{-1}$. A ocorrência do ciclone Kenneth teve um impacto moderado na hidrodinâmica costeira da Baía de Pemba. Verificou-se forma acentuada os padrões de circulação local, devido principalmente à intensificação dos ventos e da modulação das correntes de maré. Na Baía de Pemba, os eventos ora mencionados, resultaram em mudanças abruptas na direcção e intensidade da hidrodinâmica. Ficou patente que a hidrodinâmica local tem um enorme controle no transporte e redistribuição de partículas na coluna de água, incluindo microplásticos. Adicionalmente, ocorrência do ciclone Kenneth afectou as marés residuais. O resultado sugere que durante ciclones, a interacção não linear entre marés e ondas de tempestade, pode resultar em correntes de maré amplificadas, alterando os gradientes de pressão e contribuindo para redistribuições horizontais e verticais na coluna de água. O facto pode aumentar o alcance da vazante e da enchente, forçando as águas e os materiais nelas contidos para regiões da baía normalmente menos expostas.

Durante a ocorrência do Ciclone Kenneth, os microplásticos aparecem dispersos para ambos cenários principalmente na região central e ao longo da costa norte da Baía. A redistribuição das partículas plásticas pode ser atribuída à actuação combinada de ventos intensos, correntes de maré alteradas e elevação do nível do mar induzida pelo Ciclone Kenneth. O aumento da energia hidrodinâmica e a intensificação das correntes superficiais ampliam a capacidade de transporte horizontal, favorecendo o deslocamento de microplásticos para áreas anteriormente não impactadas. Eventos de natureza similar, como tempestades tropicais e furacões, têm o potencial para espalhar detritos plásticos por longas distâncias, aumentando a área de contaminação . A magnitude do vento foi mais intensa na parte norte-nordeste da Baía, com velocidades superiores a 25 $m\ s^{-1}$, o que pode ter contribuído para a ressuspensão e transporte de partículas na coluna de água. A hidrodinâmica da Baía de Pemba também exerceu um papel fundamental na dispersão das partículas. O padrão de circulação gerado pelo ciclone favoreceu a formação de zonas de convergência, que actuaram como áreas de retenção de microplásticos. Outro factor relevante foi a interacção entre a turbulência gerada pelo vento e pelas marés com os microplásticos. Em regiões com forte hidrodinâmica, pode ocorrer o aumento da suspensão e redistribuição dos microplásticos, especialmente os de menor densidade, como polietileno e polipropileno (Mao *et al*. 2020). A presença de zonas de retenção no norte da Baía de Pemba é coerente com o que foi relatado por Zhang *et al.* (2020), em que a topografia costeira e os padrões de circulação forçada durante ciclones influenciaram na retenção de partículas em baías e enseadas. A força do vento associada às tempestades tropicais e ciclones pode gerar mistura vertical, ressuspensão de partículas sedimentadas e dispersão para regiões normalmente não afectadas. No caso da baía de Pemba, significa que partículas originalmente confinadas à zona central ou sul podem ter sido impulsionadas para o norte, onde a topografia e a hidrodinâmica permitiram sua acumulação.

4.1.4. Validação

A validação de modelos hidrodinâmicos é uma etapa essencial para assegurar a confiança nas simulações e interpretações que se seguem. No estudo actual, em virtude da escassa disponibilidade de dados observacionais na Baía de Pemba, a validação do modelo foi efetuada unicamente com a variável de elevação da maré, empregando dados colectados durante Março de 2004. Embora a validação devesse idealmente incluir as componentes *u* e *v* das correntes, a falta de séries temporais consistentes e de qualidade para essas variáveis, tanto em medições locais quanto em dados de satélite com resolução adequada, impediu tal procedimento. Ainda assim, a comparação entre a maré observada e a simulada mostrou resultados precisos. A consistência entre as curvas, tanto em relacção à periodicidade quanto à amplitude, indica que o modelo conseguiu replicar de forma apropriada a principal forçante hidrodinâmica da área: o padrão de marés semi-diurnas. O RMSE calculado (0.0791 *m*) demonstra um nível de precisão aceitável conforme os padrões comuns em modelagens costeiras, especialmente em ambientes com complexidade geomorfológica como a Baía de Pemba, que possui canais de entrada estreitos e batimetria acentuada. A variação em torno de zero indica que não existe viés sistemático, e que o modelo não apresenta uma tendência constante de superestimar ou subestimar os valores. A representação precisa da altura da maré, especialmente durante os períodos de sizígia e quadratura, que são essenciais para o transporte de partículas, garante a confiança na base hidrodinâmica utilizada para as simulações de dispersão de microplásticos. Contudo, de realçar que a ausência de validação directa das correntes constitui uma limitação. Entretanto, como os padrões de corrente no Delft3D são fortemente influenciados pela maré cuja simulação foi validada com sucesso presume-se que as correntes associadas a esse forçamento estejam representadas de forma razoável. Essa suposição é sustentada por estudos anteriores que demonstram que, em regiões dominadas por marés, a acurácia da elevação da maré é um bom indicativo do comportamento geral do campo de correntes (Elias *et al.*, 2001; Lesser *et al.,* 2004).

5. Conclusões

O presente estudo analisou os mecanismos de dispersão de microplásticos na Baia de Pemba considerando o regime hidrodinâmico em condições normais e sob influencia do Ciclone Tropical Kenneth, ocorrido em Abril de 2019. A aplicação dos modelos produzidos permitiram representar com precisão os padrões de corrente, maré e transporte das partículas ao longo dos diferentes cenários.

As simulações demonstraram que a circulação na Baia é dominada pelo regime de maré semi-diurna, com velocidades máximas de corrente em torno de 0.4 $m\ s^{-1}$ durante os períodos de sizígia.

A interacção entre correntes de maré e ventos com direcção predominante sudeste-noroeste controla de forma significativa o transporte horizontal das partículas representativas dos microplásticos utilizados no modelo.

A análise da distribuição das partículas indicou um padrão assimétrico, com 57.81% localizadas na coluna de água e 42.19% nos sedimentos costeiros. A dinâmica observada evidenciou que ambas as fases da maré preia-mar e baixa-mar contribuem para o transporte e redistribuição dos microplásticos, com intensificação do processo nas marés de sizígia. A acção conjugada de ventos intensos e correntes aceleradas aumentou a mobilidade horizontal das partículas, favorecendo sua permanência em suspensão e posterior deslocamento.

Durante a ocorrência do ciclone, padrões de vento anómalos e correntes alteradas embora tenham promovido a intensificação da dispersão dos microplásticos não foi verificada a acumulação acentuada das partículas nas margens interiores da Baia.

A maior concentração foi identificada na região central e na costa norte da baía, com evidências de exportação para áreas costeiras adjacentes. A actuação conjunta de forçantes atmosféricas e hidrodinâmicas sob condições extremas demonstrou ser um factor determinante para a expansão das zonas de contaminação e a alteracção dos padrões espaciais de distribuição de microplásticos na Baía de Pemba.

O uso de dados de elevação da maré para validar o modelo foram representados de forma coerente e precisa Embora a validação tenha se restringido à variável de elevação da maré, a precisão alcançada sugere que o modelo foi capaz de reproduzir com sucesso os principais padrões hidrodinâmicos da região.

Os resultados alcançados permitiram compreender a influência das variabilidades hidrodinâmicas normais e extremas no transporte de Microplásticos na Baia de Pemba evidenciado o papel determinante dos eventos extremos na intensificação do processo.

6. Limitações e Recomendações

O presente trabalho apresentou as seguintes limitações:

- A falta de dados *in situ* da corrente (*u, v*) para validar os resultados.
- A falta de informação a nível regional relacionada a dispersão de Microplásticos.

Para trabalhos futuros recomenda-se que:

- Se avalie a influência directa dos vórtices de mesoescala na dispersão dos microplásticos;
- Se faça a modelagem com o isolamento do efeito do forçamento eólico.
- Se faça acoplamento em modelos biofísicos (*DELFT3D-WAQ*) para simular interacções entre microplásticos, biogeoquímica (degradação) e biota (ingestão por organismo).

Referências Bibliográficas

- ALBERTO, D. N.; AMADO, N. A. (2022), Mudanças climáticas e seus impactos na pesca artesanal em Moçambique: perceções dos pescadores da Baía de Pemba. Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade, p. 85–100.
- ANDRADY, A. L. Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, v. 62, n. 8, p. 1596–1605, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
- AQUADOCS. Relatório final do levantamento da Baía de Pemba. INAHINA – Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação. Departamento de Hidrografia. Maputo, 2013. Disponível em: https://aquadocs.org/handle/1834/1551
- AUTA, H. S. (2017) Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. Environmental International, v. 102, p. 165–176,.DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013
- BROWNE, M. A.; GALLOWAY, T. S.; THOMPSON, R. C. Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines. Environmental Science & Technology, v. 44, p. 3404–3409, 2010. DOI: https://doi.org/10.1021/es903784e
- CARVALHO, J. S. Variabilidade espaço-temporal de curto prazo de microplásticos. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2021. Dissertação (Mestrado em Oceanografia).
- CASTRO, R. O. et al. Spatio-temporal evaluation of macro, meso and microplastics in surface waters, bottom and beach sediments of two embayments in Niterói, RJ, Brazil. Marine Pollution Bulletin, v. 160, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111558
- CLAESSENS, M. et al. Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian Coast. Marine Pollution Bulletin, v. 62, n. 10, p. 2199–2204, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.030
- COLE, M. et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. Marine Pollution Bulletin, v. 62, n. 12, p. 2588–2597, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025

- CORRÊA, L. F. Ocorrência e distribuição de microplásticos nos sedimentos de fundo, margem e nas águas superficiais do sistema lagunar Maricá-Guarapina (RJ). São Gonçalo: UERJ, 2022. Monografia (Graduação).
- CRAWFORD, C. B.; QUINN, B. The emergence of plastics. In: CRAWFORD, C. B.; QUINN, B. (Ed.). Microplastic pollutants. Elsevier, 2017. p. 1–17.
- D. N. Moriasi,et al. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, *50*(3), 885–900. https://doi.org/10.13031/2013.23153
- Damas, R. C. (n.d.). *Gestão dos Resíduos Sólidos nos bairros de Paquitequete, Natite e Cimento na Cidade de Pemba*.
- Deocaris, C. C., Allosada, J. O., Ardiente, L. T., Bitang, L. G. G., Dulohan, C. L., Lapuz, J. K. I., Padilla, L. M., Ramos, V. P., & Padolina, J. B. P. (2019). Occurrence of microplastic fragments in the Pasig River. *H2Open Journal*, *2*(1), 92–100. https://doi.org/10.2166/h2oj.2019.001
- DELTARES. Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Delft: Deltares, 2021.
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *19*(2), 183–204. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2
- Elias, et al. (2001). Hydrodynamic Validation of Delft3D with Field Measurements at Egmond. *Coastal Engineering 2000*, 2714–2727. https://doi.org/10.1061/40549(276)212
- FIGUEIRA, L. X. Simulação do transporte de microplástico em zona costeira empregando a Plataforma MOHID. Nova Friburgo: UFF, 2022. Dissertação (Mestrado).
- GESAMP. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment. GESAMP Reports and Studies, n. 90, 2015.
- GESAMP. Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean. GESAMP Reports and Studies, n. 99, 2019.
- GIGAULT, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? Environmental Pollution, v. 235, p. 1030–1034, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024

- HALO, I. et al. Eddy properties in the Mozambique Channel: a comparison between observations and two numerical ocean circulation models. Deep-Sea Research Part II, v. 100, p. 38–53, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.10.015
- HARTMANN, B. N. et al. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. Environmental Science & Technology, v. 53, n. 3, p. 1039–1047, 2019. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297
- HAQUE, F. N.; FAN, C. Fate of microplastics under the influence of climate change. iScience, v. 26, n. 9, p. 107649, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107649
- HIDALGO-RUZ, V. et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. Environmental Science & Technology, v. 46, n. 6, p. 3060–3075, 2012. DOI: https://doi.org/10.1021/es2031505
- *Science & Technology*, *51*(14), 7963–7971. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04702
- Kye, H., Kim, J., Ju, S., Lee, J., Lim, C., & Yoon, Y. (2023). Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards. *Heliyon*, *9*(3), e14359. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14359
- KOOI, M. et al. The effect of particle properties on the depth profile of buoyant plastics in the ocean. Environmental Science: Processes & Impacts, v. 19, n. 7, p. 939–950, 2017. DOI: https://doi.org/10.1039/C7EM00062D
- LEBRETON, L. et al (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, *8*(1), 15611. https://doi.org/10.1038/ncomms15611
- LEBRETON, L. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. Scientific Reports, v. 8, p. 4666, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w
- LEONOR. Microplásticos em águas e sedimentos da costa algarvia. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Universidade do Algarve, 2020.
- Lesser, et al. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, *51*(8–9), 883–915. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014

- LITTER, M. T. Guidance on monitoring of marine litter in European seas. Joint Research Centre – EU, 2013.
- Li, Y., Zhang, H., & Tang, C. (2020). A review of possible pathways of marine microplastics transport in the ocean. *Anthropocene Coasts*, *3*(1), 6–13. https://doi.org/10.1139/anc-2018-0030
- Lo, H. S., Lee, Y. K., Po, B. H.-K., Wong, L. W., Xu, X. Y., Fung, W. C., . . . Tam, N. F.-Y. (2020). Impactos do tufão Mangkhut em 2018 na deposição de detritos marinhos e microplásticos nas praias de Hong Kong. 716. Fonte: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137172
- Mavume, A., Rydberg, L., Rouault, M., & Lutjeharms, J. (2010). Climatology and Landfall of Tropical Cyclones in the South- West Indian Ocean. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, *8*(1). https://doi.org/10.4314/wiojms.v8i1.56672
- MARTINHO, E. Lixo plástico ameaça futuro da Baía de Pemba. O País, 2018. Disponível em: https://opais.co.mz/lixo-plastico-ameaca-futuro-da-baia-de-pemba/
- Moura, D., Mendes, I., Aníbal, J., & Gomes, A. (2023). *Micro e nanoplásticos: Um macroproblema*. Universidade do Algarve, CIMA - Centro de Investigação Marinha e Ambiental e ARNET - Rede de Infraestrutura em Recursos Aquáticos. https://doi.org/10.34623/TZ6D-K552
- Mucova, et al. (2021). Approaching Sea-Level Rise (SLR) Change: Strengthening Local Responses to Sea-Level Rise and Coping with Climate Change in Northern Mozambique. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(2), 205. https://doi.org/10.3390/jmse9020205
- MCAA – Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental. Perfil ambiental e mapeamento do uso actual da terra nos distritos da zona costeira de Moçambique: Distrito de Pemba-Metuge, Cabo Delgado. Maputo, 2012.
- NOVAES, G. de. Microplásticos em praias flúvio-estuarinas. Universidade Federal do Pará, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso.
- OLIVEIRA, A. M.; SANTOS, C. J.; LIMA, N. A. Processamento digital de imagens para mapeamento do coeficiente de Manning em ambiente semiárido. International Journal of Development Research, v. 11, n. 1, p. 43921–43928, 2021. DOI: https://doi.org/10.37118/ijdr.20915.01.2021

- ORMONDT, M. v.; NEDERHOFF, K.; DONGEREN, A. v. Delft Dashboard: a quick set-up tool for hydrodynamic models. Journal of Hydroinformatics, v. 22, p. 61–74, 2020. DOI: https://doi.org/10.2166/hydro.2019.140
- PASQUIER, V. et al. Do tidal fluctuations affect microplastics distribution and composition in coastal waters? Science of the Total Environment, v. 858, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160084
- PINTO, L.; LIMA, P. Microplastics in the ocean: under the blue economy perspective. Journal of Marine Science and Engineering, v. 10, n. 1, 2022.
- PUGH, D. Tides, surges and mean sea level. Chichester: John Wiley & Sons, 1987.
- REINALDO, C. B. Ocorrência e caracterização de microplásticos na avaliação de parâmetros governantes na dinâmica no estuário do Rio Pacoti, Ceará. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2023. Dissertação (Mestrado).
- REISSER, J. et al. The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre. PLOS ONE, v. 10, n. 11, e0142071, 2015. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142071
- ROCHMAN, C. M. et al. Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. Environmental Toxicology and Chemistry, v. 38, n. 4, p. 703–711, 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/etc.4371
- SILVA, J. C. Aspectos ambientais do litoral da Cidade de Pemba. Maputo, 1996.
- SMITH, A. et al. Quantification and characterization of plastics in near-shore surface waters of Atlantic Canada. Marine Pollution Bulletin, v. 180, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113768
- THOMPSON, R. C. et al. Lost at Sea: Where is all the plastic? Science, v. 304, n. 5672, p. 838, 2004. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1094559
- Turra, A., Manzano, et al (2014). Three-dimensional distribution of plastic pellets in sandy beaches: Shifting paradigms. *Scientific Reports*, *4*(1). https://doi.org/10.1038/srep04435
- VIANELLO, A. et al. (2013) Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: first observations on occurrence, spatial patterns and identification. Estuarine,

Coastal and Shelf Science, v. 130, p. 54–61,. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.022

- WORM, B. et al. Plastic as a persistent marine pollutant. Annual Review of Environment and Resources, v. 42, p. 1–26, 2017. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060700
- Willmott, C., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, *30*, 79–82. https://doi.org/10.3354/cr030079
- Wu, P., Tang, et al. (2020). Spatial-temporal distribution of microplastics in surface water and sediments of Maozhou River within Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Science of The Total Environment*, *717*, 135187. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135187
- Wu, T., Qin, B.,et al. (2022). Reconsideration of wind stress, wind waves, and turbulence in simulating wind-driven currents of shallow lakes in the Wave and Current Coupled Model (WCCM) version 1.0. *Geoscientific Model Development*, *15*(2), 745–769. https://doi.org/10.5194/gmd-15-745-202
- WU, P. et al.(2020), Spatial-temporal distribution of microplastics in surface water and sediments of Maozhou River within Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Science of the Total Environment, v. 135187,. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135187
- ZHANG, H. et al. Microplastic pollution in water, sediment, and fish from artificial reefs around the Ma'an Archipelago, Shengsi, China. Science of the Total Environment, v. 708, p. 134768, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134768
- ZHANG, H. et al. Spatio-temporal distribution of plastic and microplastic debris in the surface water of the Bohai Sea, China. Marine Pollution Bulletin, v. 157, p. 111343, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111343

ANEXOS

Tabela 7: *Descrição dos materiais e equipamentos utilizados, com suas respectivas quantidades.*

Descrição dos Materiais e Equipamentos	Quantidade
Peneiras de diferentes malhas	1
Béquer	2
Pipetas	2
Placas de Petri	10
Sistema de Filtração a vácuo	1
Filtros de fibra de vidro	19
Filtros de fibras de celulose	19
Pinças	2
Água destilada	10 litros
NaCl (sal de cozinha)	1000g
Etanol	99%
Pipetas	2
Balança Analítica	1
Proveta	1
Funil	1
Erlenmeyer	9
Tesoura	1
Colher	1
Algodão	1
Luvas	1
Bata	1
Incubadora	1
Papel de Alumínio	1 rolo
Multiparâmetro	1
Microscópio estereoscópico trinocular com câmera digital de 10 mpx	1
Tesoura	1
Isqueiro	1

Tabela 8: *Dados referentes á massa inicial das amostras de sedimento, volume de água inicial das amostras de água, volume das soluções usadas no processamento.*

Designação	**Massa(g)**	**Volume de água(ml)**	**Ethanol(ml)**		**Volume da solução total(ml)**	**Volume da solução á ser filtrada(ml)**
SS_1A	161	150	100		250	200
SS_1B	123.2	150	100		250	200
SS_3	174	150	100		250	200
SS_4	202.4	200	100		300	200
Designação	**Massa(g)**	**Volume de água(ml)**	**NaCl(g)**		**Volume da solução total(ml)**	**Volume da solução á ser filtrada(ml)**
SS_2A	179.8	500	40		509.4	450
SS_2B	100.3	500	40		509.4	450
SS_5	101.2	500	40		509.4	450
Designação	**Volume de água inicial(ml)**	**Volume de água para cada sal(ml)**	**NaCl(g)**	**PPT**	**Volume total da solução salina(ml)**	**Volume da solução á ser filtrada(ml)**
WS_3	500	170	12.9	34.5	174.3	500
WS_4	500	170	12.8	40.2	174.1	500
WS_2	500	170	12.8	34.8	174.1	500
WS_1	500	170	12.8	36.6	174.1	500
WS_8	500	170	12.8	36.5	174.1	500
WS_9	500	170	12.8	36.6	174.1	500
WS_6	500	170	12.8	34.1	174.1	500
WS_7	500	170	12.8	24	174.1	500
WS_5	450	170	12.8	32	174.1	500