REDE Revista Eletrônica do PRODEMA
Journal Homepage: www.revistarede.ufc.br

Monitoramento de detritos depositados em zona costeira: estratégias de monitoramento dos impactos antropogênicos através de aeronaves remotamente pilotadas

Monitoring of Waste Deposited in Coastal Areas: Strategies to Address Anthropogenic Impacts Using Remotely Piloted Aircraft..

Luísa Janaina Lopes Barroso Pinto[1]
Marcio Régys Rabelo de Oliveira[2]
Francisco José Lopes Cajado[3]
Francisco Davy Braz Rabelo[4]

RESUMO

O deposito de detritos antropogênicos na zona costeira além dos consequentes efeitos negativos exercem influência direta dos oceanos, mares e do ambiente costeiro. Assim, a proposta do estudo foi mostrar a aplicação instrumental para diagnóstico da poluição de resíduos sólidos em ecossistemas costeiros, utilizando ferramentas de sensoriamento remoto ante a degradação provocada por fatores antropogênicos. O percurso metodológico foi instaurado através da tecnologia de drones para sobrevoar os mesmos transectos em uma área de zona costeira no extremo nordeste do município de Fortaleza, Ceará, Brasil. Desta forma a pesquisa teve como objetivo avaliar qualitativamente detritos sólidos depositados ao longo de uma faixa litorânea em uma abordagem baseada em Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). Foi evidenciado que mapeamento dos resíduos por meio de ARPs foi influenciado pela relação entre a altitude de voo e o tipo dos resíduos. Os dois métodos de classificação não supervisionada, quando em voos de 10 e 20 m de altitude, mostraram-se eficazes no mapeamento de resíduos sólidos incorretamente depositados nas faixas de areia.
PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos; Ecossistemas costeiros; Geotecnologias; Imagens suborbitais.

ABSTRACT

The deposition of anthropogenic debris in coastal zones, in addition to its consequent negative effects, directly impacts oceans, seas, and coastal environments. Thus, the purpose of this study was to demonstrate the application of instrumental techniques for diagnosing solid waste pollution in coastal ecosystems, using remote sensing tools to assess degradation caused by anthropogenic factors. The methodological approach was implemented through drone technology, which was used to fly over the same transects within a coastal area located in the northeastern sector of the municipality of Fortaleza, Ceará, Brazil. Therefore, this research aimed to qualitatively evaluate solid debris deposited along a coastal strip using an approach based on Remotely Piloted Aircraft (RPA). The results showed that waste mapping using RPAs was influenced by the relationship between flight altitude and the type of waste. The two unsupervised classification methods, applied to flights conducted at altitudes of 10 and 20 meters, proved effective in mapping solid waste improperly deposited along sandy beach areas.
KEYWORDS: Solid waste; Coastal ecosystems; Geotechnologies; Suborbital imagery.

[1]Universidade de Fortaleza-Unifor; Fortaleza, Ceará, Brasil;luisalopes@unifor.br;
[2]Universidade Federal do Ceará-UFC; Fortaleza, Ceará, Brasil; marcioregys01@gmail.com
[3]Professor da Faculdade Metropolitana de Horizonte-FMH; Horizonte, Ceará, Brasil; lopes.cajado@fmh-ce.com.br;
[4]Professor Adjunto da Universidade do Estado do Amazonas- UEA; Tefé, Amazonas, Brasil; frabelo@uea.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Os avanços das atividades humanas nas regiões costeiras e marinhas, incluindo a construção de indústrias, portos e aglomerados urbanos, têm introduzido inúmeros contaminantes em ambientes litorâneos ao longo de muitas décadas (VALLE; LAGE 2019). Entre esses contaminantes, os resíduos em margens de praias geram uma preocupação significativa devido à morte de milhões de organismos marinhos por ingestão ou emaranhamento (GALL; THOMPSON, 2015), além dos consequentes efeitos negativos nas atividades que sofrem e exercem influência direta dos oceanos, mares e do ambiente costeiro, ainda que não extraiam do mar sua matéria-prima (CARVALHO, 2018).

A organização das nações unidas em seu relatório aponta que a humanidade gera cerca de 2,24 bilhões de toneladas de resíduos sólidos anualmente, dos quais apenas 55% são gerenciados em instalações controladas, sendo que todos os anos, cerca de 931 milhões de toneladas de alimentos são perdidos ou desperdiçados e até 14 milhões de toneladas de resíduos plásticos entram nos ecossistemas aquáticos (ONU ,2023).Cerca de 2,5 bilhões de toneladas de resíduos sólidos são gerados anualmente em todo o planeta (BOUCHER *et al.*, 2020), dos quais 275 milhões são compostos principalmente por plásticos, com aproximadamente 8 milhões de toneladas chegando aos oceanos (WILLIAMS; RANGEL-BUITRAGO, 2019).

Os resíduos podem ser classificados de acordo com a sua origem, como provenientes de estabelecimentos comerciais ou prestadores de serviços; oriundos de residências e limpeza urbana; serviços públicos de saneamento básico; transportes; construção civil; indústria; serviços de saúde; atividades agrossilvopastoris; mineração. Já os resíduos sólidos urbanos são “os resíduos domésticos gerados em áreas urbanas, incluindo os materiais decorrentes de atividades de varrição, limpeza de logradouros, vias públicas e outros serviços de limpeza” (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019).

Assim, é versado que a proximidade de áreas altamente urbanizadas ou com atividades antrópicas e intensas geralmente está associada a ambientes com maior nível de poluição por esses detritos (CHANG *et al.*, 2020), por exemplo, áreas expostas a atividades antropogênicas como os ambientes derivados da ação da pesca, são muitas vezes associadas a *hot spots* de artes de pesca abandonadas, perdidas ou de outra forma descartadas (FAO, 2009). Além disso, diferentes ambientes com distintos níveis de pressão terão macro e microplásticos em diferentes concentrações e com diferentes características (CHANG *et al.*, 2020).

Nesta conjuntura em que o nível de poluição por detritos sólidos em zonas de costa se eleva continuamente, os contemporâneos meios de detecção e mitigação são insuficientes para detectar concentrações reais, revela-se a necessidade de desenvolvimento de práticos processos de diagnóstico no fluxo destes materiais por intermédio, por exemplo, nas imagens de alta resolução, através inclusive do sensoriamento remoto. Pressupõe-se um entendimento profundo do destino via de transporte, juntamente com fontes e pontos de acesso da cadeia de valor dos resíduos. Uma vez que esses detritos atingem as águas costeiras, e suas vias de dispersão e transporte são governadas pela dinâmica do oceano e da atmosfera (ATWOOD *et al*., 2019; GARABA; DIERSSEN, 2018; ZHANG, 2017)

Com aparelhos satisfatórios de diagnóstico, é possível entender as causas, destino e sumidouro residual nas matrizes terrestre e aquática dos ambientes litorâneos. O diagnóstico de fluxo destes materiais tem se tornado mais concreto por intermédio das geotecnologias que abrangem as tecnologias do ramo espacial, como sistemas de posicionamento global, sensoriamento remoto, geoprocessamento, cartografia digital, sistemas de informações geográficas, processamento digital de imagens através de ferramentas em distintos níveis de aquisição (MAS *et al*., 2020). Além de plataformas equipadas com sensores em níveis suborbitais (aviões ou Aeronave Remotamente Pilotada) que podem fornecer informações com um maior nível de detalhamento acerca da superfície analisada (JENSEN *et al.*, 2011).

Assim, diante dessas considerações estabeleceu-se a seguinte questão de pesquisa: Estratégias na gestão de ferramentas de sensoriamento remoto teriam eficácia no diagnóstico de detritos sólidos em regiões de costa? De imediato considerou-se o como objetivo avaliar qualitativamente detritos sólidos depositados ao longo de uma faixa litorânea em uma abordagem baseada em Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). O percurso metodológico foi instaurado através da tecnologia de drones para sobrevoar os mesmos transectos. A área de estudo pertence a uma zona costeira no extremo nordeste do município de Fortaleza, Ceará, Brasil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Detritos costeiros: um problema global onipresente

Apesar de toda a legislação existente, o volume de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) que segue para locais de destino inadequado e é crescente. Isto remonta a escassez do debate

com a temática e a carência de recursos para soluções que, além de dar cumprimento às determinações legais, trazem inúmeros benefícios para a população, tais como proteção da saúde pública: melhoria na qualidade da água, do solo e do ar, redução na disseminação de vetores e doenças; redução imediata dos impactos ambientais e das emissões de gases de efeito estufa (metano e o carbono), além do desenvolvimento econômico e social ao promover novos mercados e a criação de postos de trabalho (COSTA , 2021).

Ainda nesta perspectiva Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA,2023) adverte que os oceanos recebem cerca de 13 milhões de toneladas de plástico anual, o equivalente a descarregar um caminhão de lixo no oceano por minuto. Esta quantidade poderia aumentar até 17,5 milhões de toneladas anuais em 2025 com esse nível de descargas. Neste cenário, estima-se que por exemplo, até 80% do plástico no oceano se origina de fontes terrestres e o restante de fontes marinhas, como pesca e navegação (ANDRADY, 2011). Somente em 2010, realizou-se uma estimativa que constatou que entre 4,8 e 12,7 milhões de toneladas métricas apenas deste tipo de detrito, entraram no oceano de países costeiros (JAMBECK *et al*., 2015). Esses materiais persistentes podem ser transportados por longas distâncias nas correntes oceânicas e resistem à biodegradação, quebrando-se em pedaços "microplásticos" cada vez menores, o que permitiu que eles se acumulassem ao longo do tempo para causar a contaminação onipresente e quase permanente do ambiente marinho (GEYER *et al*., 2017).

Relevante ainda expor o fato de que os oceanos globais, o destino dos detritos costeiros, são o maior sumidouro natural de CO_2 e desempenham um papel importante na redução do nível de CO_2 atmosférico e no aquecimento global. Uma vez que a capacidade dos oceanos de CO_2, se o sequestro for perturbado, o padrão global do ciclo do carbono mudará drasticamente, ameaçando as condições básicas da sobrevivência humana, a presença generalizada destes detritos nos oceanos tem um impacto negativo no crescimento do fitoplâncton, causando a mudança da comunidade fitoplanctônica, destruindo a estabilidade do ecossistema marinho (SHEN *et al*., 2019).

Embora grandes concentrações de detritos antropogênicos estejam sendo observadas em habitats litorâneos com maior frequência, uma análise precisa da extensão espacial e variedade dos detritos ainda é um fator limitante. É neste contexto que, como consequência, as ferramentas de monitoramento não estão se mostrando exitosas para avaliar as distribuições globais (VAN SEBILLE *et al*., 2015). Com este apelo é consenso que uma discussão interdisciplinar sobre resíduos antrópicos no ambiente natural costeiro, é necessária para

documentar o aumento acelerado nos usos globais ao longo do último meio século (LI *et al*., 2020). Há necessidade de abordagens integrativas de monitoramento direto e indireto (MAXIMENKO *et al*., 2016). Assim, estudos distintos delinearam vários desafios metodológicos e analíticos para avaliar os sedimentos, principalmente de origem antrópica, abundância e tipos de detritos (MANZOOR *et al*., 2020).

As geotecnologias, em seus distintos recursos nesse cenário, destacam-se como ferramentas metodológicas que fornecem as coberturas espacial e temporal necessárias para estimar a abundância global de detritos próximos à superfície dos oceanos. Imagens de sensoriamento remoto (SR), por exemplo, constituiriam uma ferramenta útil para explorar quantitativamente as distribuições de detritos plásticos nas faixas litorânea (MAXIMENKO *et al*., 2019).

Pesquisas relacionadas ao SR para detecção de detritos sólidos contribuem para o monitoramento global destes resíduos, até daqueles que ainda se encontram em seus estágios iniciais de degradação, haja vista que o barateamento dos sensores ópticos tem permitido a investigação em campos de pesquisa ainda inexplorados por estes meios. A procura por informações específicas em relação de caracterização de plásticos marinhos e a busca por um melhor entendimento do comportamento espectral tão diversos levou ao encontro dos trabalhos apresentados por Garaba e Dierssen (2020) e Goddijn-Murphy e Dufaur *et al.* (2018).

Enquanto detritos são relatados em altas concentrações em muitos lugares ao redor do globo, é sensível a escassez no conjunto de dados de referência para a compreensão do comportamento espectral de resíduos antrópicos em um ambiente real, seja para calibração de algoritmos, ou mesmo, para validação de resultados anteriormente obtidos (TOPOUZELIS *et al*., 2020**).**

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

A área de estudo escolhida pertence a uma zona costeira no extremo nordeste do município de Fortaleza, Ceará, Brasil. Este local foi escolhido pela notória presença de elementos residuais de atividades antrópicas, incoerentes com o meio natural ao seu redor (Figura 1). A região do ‘Cais do Porto’ é uma das principais praias afetadas pela poluição

urbana. Embora não seja a única causadora, a comunidade Serviluz faz parte de um ciclo antrópico vicioso, onde a comunidade participa das causas e efeitos da incorreta destinação de múltiplos resíduos.

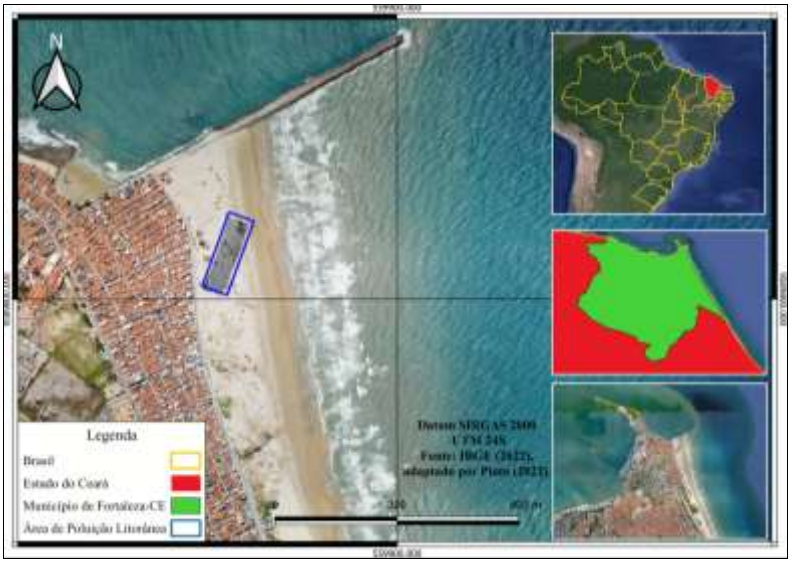


Figura1 - Município de Fortaleza (CE): Área de Poluição Litorânea, 2022
Fontes: IBGE, 2022; FORTALEZA, 2022. Elaboração: os autores, 2022.

Com o intuito de propor a melhor configuração de análise para resíduos sólidos em ambientes litorâneos, janeiro de 2022, foram implementados seis voos sob diferentes altitudes (10, 20, 30, 40, 50 e 60 metros). O veículo aéreo utilizado foi *DJI Mini 2*® com sensor RGB de 12 MP e realizou a sequência de missões entre 10:00 e 12:00 horas para permitir a máxima incidência solar ortogonalmente sobre o solo. As imagens foram obtidas sob um faixa contínua de areia para que, sob uma perspectiva aérea, fosse possível realizar a discriminação de objetos antinaturais, sob diferentes colorações, tamanhos e formatos em um *plano de fundo* predominantemente uniforme, como é a areia da praia.

3.2 Processamento digital de imagem e classificação

As imagens foram processadas no programa Agisoft Metashape®, licenciado pela Universidade Federal do Ceará. Em todas as seis altitudes avaliadas, as fotos seguiram um fluxo de trabalho padrão, permitindo o alinhamento das imagens, a construção das nuvens de pontos (esparsa e densa), a triangulação para formação das malhas tridimensionais, texturização e ortomosaico.

A classificação dos detritos distribuídos irregularmente consistiu em duas etapas. A princípio, verificou-se a viabilidade de classificar o mosaico construído a partir da nuvem

densa de pontos, na qual um ortomosaico geral foi produzido. O segundo processo de classificação consistiu na interpretação das imagens digitais originais, em classes de objetos pertencendo aos principais elementos observados na cena (12 milhões de *pixels*). Ao longo da área de praia analisada foi selecionada um montante de resíduos sólidos em particular, no centro da faixa, na qual sua inspeção se deu nos diferentes níveis de coleta.

Valendo-se do programa ENVI v.4.5, licenciado pela Universidade Federal do Ceará, os algoritmos de classificação não supervisionada empregados foram ISODATA e K-MEANS. Com o intuito de permitir que os dois métodos de classificação pudessem captar variações observadas nos resíduos sólidos visualizados na praia, admitiu-se uma quantidade mínima de dez classes possíveis para cada método, para posteriormente ser analisado por especialista em processamento digital de imagens.

A contabilização dos *pixels* pertencentes a cada classe foi útil para se verificar o percentual de área ocupada pelos resíduos sólidos na faixa de areia. Já o agrupamento de *pixels* pertencentes à mesma classe foi entendido como pertencente ao mesmo objeto; por exemplo, espera-se que sacolas plásticas, depósitos de alimentos, caixas e garrafas devam apresentar a mesma classe de pixels agrupados, no formato e tonalidade semelhantes. Os mapas do modelo classificatório foram validados presencialmente nas margens de corpos hídricos, na capital do estado do Ceará, em específico, no Cais do Porto e na foz do Rio Ceará. A constante comparação entre a imagem RGB (cores verdadeiras) e as classificadas permitiram a identificação dos objetos, já contabilizados no dia dos voos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ortomosaicos

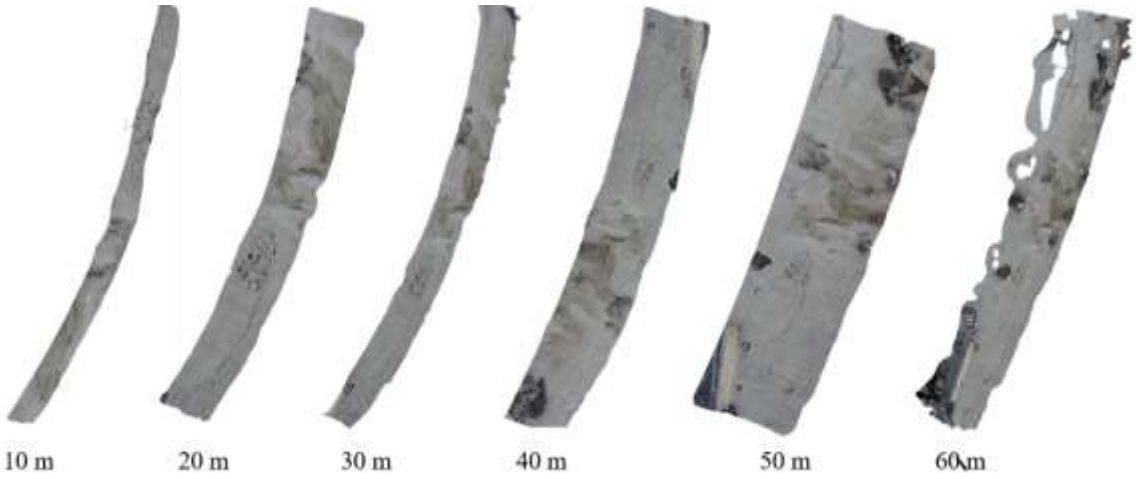
A partir da sequência de missões sobre os mesmos transectos, foi possível a construção de um mosaico para cada altitude investigada. Verificou-se que o nível de aquisição destas imagens foi decisivo para a qualidade de representação da zona costeira (Tabela 1). As dimensões dos objetos puderam ser melhor delineadas visualmente nas altitudes de 10 m e 20 m, no entanto, a fase automática de triangulação, que possibilita a interpolação de valores RGB entre os *tie-points*, foi um fator limitante para esta análise computacional, pela natureza da superfície.

Altura de voo (h)	***Resolução espacial (Δx)***

10 metros	3.72110 mm
20 metros	7.52588 mm
30 metros	1.07356 cm
40 metros	1.42358 cm
50 metros	1.75933 cm
60 metros	2.14181 cm

Tabela 1 - Fortaleza (CE): Resoluções espaciais dos mosaicos construídos por nível de altitude,2022.
Fonte: Autores,2022.

Foi perceptível que na medida em que o nível de coleta de imagens se elevava, o mosaico construído apresentou distorções em sua representação. Isto foi resultado do erro de interpretação entre pixels vizinhos que, ao precisarem ser interpolados, produziram modificações na forma e textura dos pixels intermediários. As principais falhas foram observadas no mosaico construído sob a maior altitude (60 metros) (Figura 4), com vazios extensos ao longo das margens mais secas da praia. Este resultado levanta uma questão importante, uma vez que a irregularidade da superfície (areia seca) compromete seriamente a confecção dos ortomosaicos, sendo recomendado um limite máximo de 50 metros de altitude em trabalhos desta natureza de modelagem.



.

Figura 2 - Município de Fortaleza (CE): Mosaicos confeccionados em seis altitudes distintas, 2022
Fonte: Elaborado pelos Autores,2022.

Como consequência direta da frágil contribuição ao se construir um único arquivo com todas as fotos, as classificações ISODATA e K-MEANS não foram satisfatórias em suas discriminações, quando implementadas sobre os seis mosaicos. As distorções na representação foram observadas no detalhe da composição em RGB. A notória inconsistência com a cobertura real da faixa de areia observada no dia dos voos pode ser atribuída aos efeitos

de luz e sombra aleatórios provocados pelas ondulações de areia seca, visto que todas as inconsistências são representadas por um efeito de 'arraste' entre as tonalidades, em direções variadas.

Assim, nos resultados de todos os níveis de altitude avaliados, permaneceram erros de compatibilidade entre os resíduos sólidos distribuídos na faixa de areia. Desta maneira infere-se que a construção de mosaicos é desnecessária e pode até inviabilizar um estudo minucioso, como no nível de detalhamento que esta pesquisa se propôs inspecionar.

A composição RGB, bem como as classificações *ISODATA e K-MEANS* realizadas sobre os mosaicos foram apresentadas na Figura 3. Foi perceptível a fragilidade de interpretação que estes métodos de classificação conseguiram alcançar. A maior parte dos pixels distorcidos foram agrupados em uma mesma classe nos métodos *ISODATA e K-MEANS* (azul e rosa, respectivamente). Tal representação tornou a interpretação mais complexa e falha, uma vez que admitiu que os resíduos tinham menores dimensões que o observado em solo, comprometendo assim a acurácia do mapeamento.

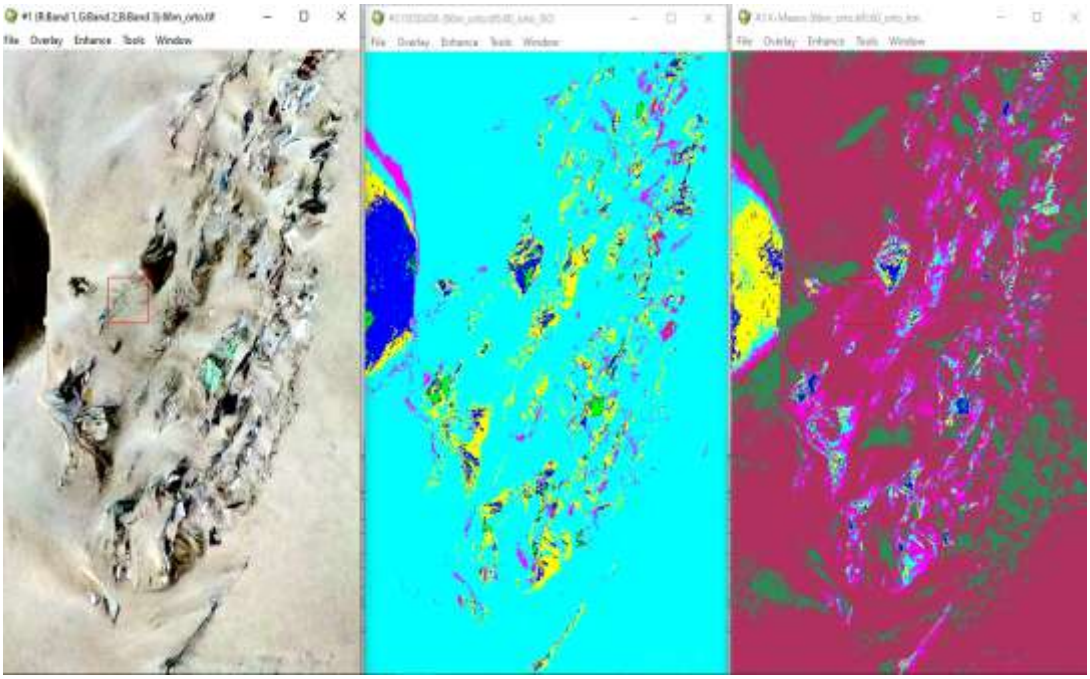


Figura 3 -Município de Fortaleza (CE): Inconsistências na classificação dos mosaicos, por Isodata e K-means.
Fonte: Elaborado pelos Autores,2022.

4.2 Fotos individualizadas

Na segunda estratégia de classificação, as imagens originais foram o alvo da pesquisa e o processo de caracterização foi mais bem-sucedido. Após as classificações automáticas,

dez classes de objetos foram apresentadas, contudo, foi possível detectar que a maioria destas classes representam variações de uma mesma classe de objetos. Logo, com auxílio dos analistas em processamento de imagens digitais, foram examinadas minuciosamente cada porção de praia imageada, cujos pixels puderam ser agrupados em classes do mesmo objeto ou região de interesse (Figura 4).

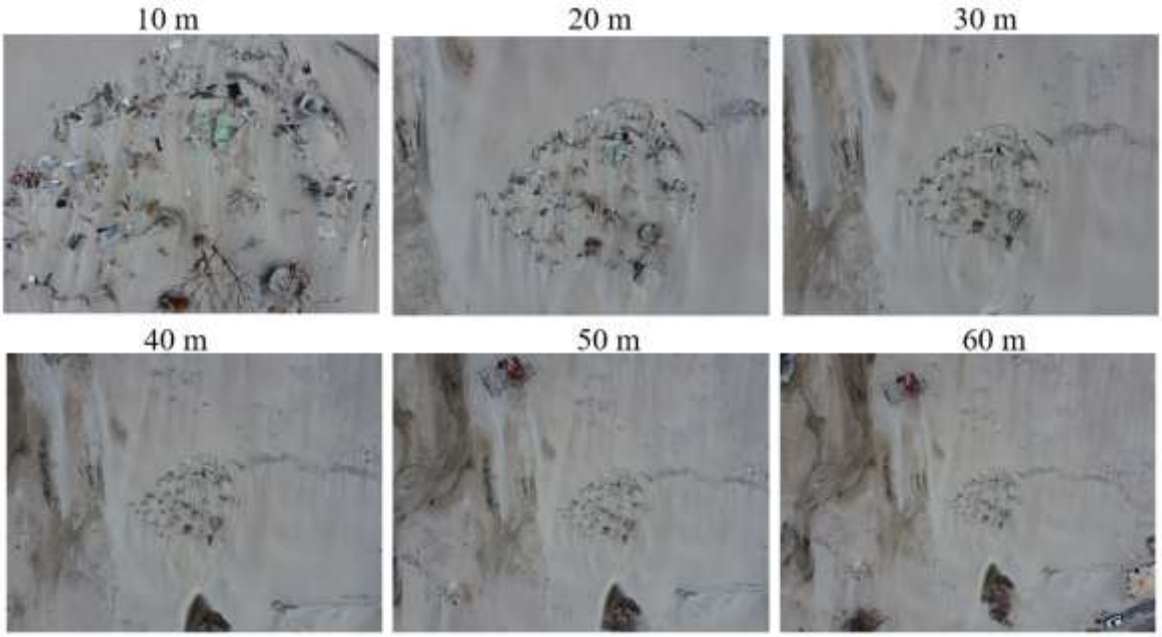


Figura 4 -Município de Fortaleza (CE): Região selecionada para correspondência nas seis altitudes adotadas
Fonte: Elaborado pelos Autores,2022.

Os rótulos obtidos ao final do processo de classificação, convergiram para representar quatro classes predominantes na paisagem, foram elas: i) '*Detritos'* que recebeu cor preta; ii) '*Areia Encharcada'* (marrom) apresentada na cor branca; iii) '*Areia Úmida'* (cinza) indicada pela cor violeta claro; e iv) '*Areia Seca'* (branca) simbolizada na cor violeta escuro. a forma com que os elementos são representados nas classificações foi um dos principais fatores úteis na identificação dos tipos de materiais.

Já quanto ao comportamento espectral, os resíduos sólidos como recipientes e sacolas plásticas, restolho de vegetação e caixas de madeira foram predominantemente rotulados pela coloração preta, dando a entender que representam um mesmo alvo: distinto de areia. Esta condição foi observada nos dois algoritmos de classificação, conduzindo ao raciocínio de que a tarefa está intimamente associada com o alto contraste em relação aos tipos de areia. Os *pixels* pertencentes à 'Areia úmida', por sua vez, compuseram a principal classe observada, apontando valores de umidade intermediária entre 'Areia Seca' e 'Areia Encharcada', sendo

representada na coloração rosa.

Na proporção em que o *plano de fundo* variou na composição RGB, a escala de cores classificadas indicou três níveis de umidade desde o mais seco ao mais úmido pelas áreas correspondentes ao rosa, azul claro, amarelo, verde e azul escuro. Alguns dos pixels sobre sacolas plásticas foram rotulados como pertencentes a uma destas classes supracitadas. A esta confusão durante a atribuição de rótulos, associa-se o brilho e o enrugamento do material que desencadeou efeitos de luz e sombra ao ser imageado.

Dentre os resultados encontrados, foi possível hierarquizar os diferentes objetos que podem ser sensíveis ao mapeamento sob diferentes altitudes de voo. Como esperado, as melhores e eficientes classificações de detritos ocorreram na menor altitude (10 metros), onde o delineamento de sacolas plásticas, latas, garrafas e caixas de madeira foi mais assertivo, correspondendo à realidade observada em campo.

Para entender melhor como o nível de coleta pode influenciar a precisão da identificação, novas áreas das imagens de ARP foram apresentadas a uma distância de 10, 30 e 60 m da superfície do solo nas dificuldades de discriminação automática a partir dos ortomosaicos gerados

Gadelha da Silva *et al.* (2024), demonstraram que itens maiores como garrafas plásticas, mostram-se mais fáceis de identificar tanto no ortomosaico, quanto nas imagens simples. Isso ocorre porque cobrem um grande número de pixels e se desviam consideravelmente da topografia do terreno, gerando sombras ao seu redor. Acrescente-se a isto, pedaços brancos de plástico (por exemplo, poliestireno) podem ser distinguidos usando a informação espectral de seu *plano de fundo*. Dessa forma, reconhecê-los se torna uma tarefa mais fácil para um analista devido aos seus formatos mais arredondados ou retilíneos. Na literatura internacional, é perceptível a preferência dos autores em mapearem este tipo de resíduos sólidos devido à maior facilidade em extraí-los da textura de fundo e reconhecê-los corretamente.

Por outro lado, reconhecer itens muito pequenos tem sido referenciado como uma tarefa bastante complexa, haja vista que a resolução espacial no solo deve ser a máxima possível para delimitações mais precisas. Isto, no entanto, requer voar em altitudes mais baixas, limitando a extensão das missões de voo. É sabido que a duração das cargas das baterias e o superaquecimento do ARP quando acionados por longos períodos são fatores críticos para implementar missões rápidas ou demoradas. Cabe destacar que embora o micro e nanoplástico não contribuam significativamente para o volume total de lixo, no que se refere a

peso, estes ainda representam um componente relevante do problema da poluição costeira antropogênica.

4.3 Quantificação

A quantificação de *pixels* pertencentes a cada classe de resíduos foi realizada automaticamente, de modo a assegurar a confiabilidade do processo. Como os dados foram agrupados em quatro classes, cada uma pôde ser tabulada em número de *pixels*, bem como em percentual da cena com 12 milhões de pixels. Os percentuais de cada imagem foram contabilizados e apresentados comparativamente na Figura 5.

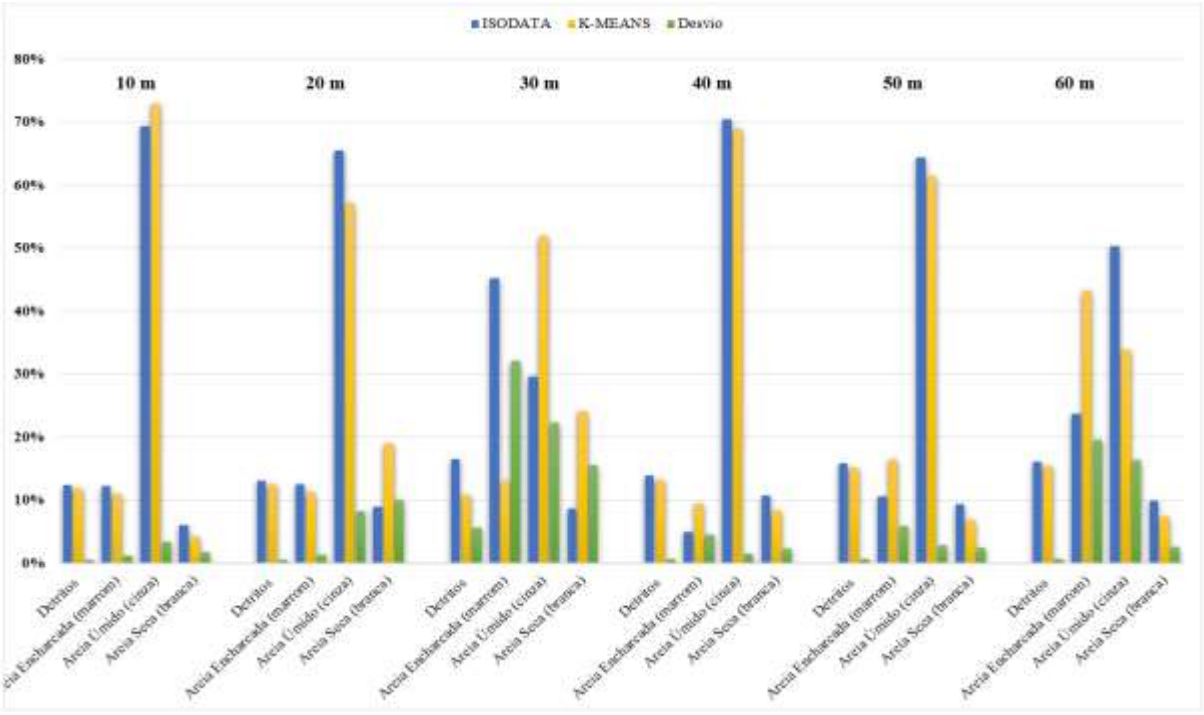


Figura 5 - Quantificação dos percentuais mapeados aos 10, 20, 30, 40, 50 e 60 m pelo método Isodata e K-means e o desvio entre cada método
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observou-se que a classe 'Detritos' foi a mais fácil de se mapear por estes dois métodos de classificação não-supervisionada, apresentando as menores taxas de desvio entre os métodos, em todas as altitudes avaliadas. Contudo, houve uma tendência frequente de classificar mais pixels nesta classe pelo método ISODATA, que pelo método K-MEANS.

A exceção se deu aos 30 metros de altitude, onde as maiores discordâncias entre classes ocorreram mais intensamente, atingindo performance inferior até mesmo de 60 metros

de altitude. Tal comportamento foi atribuído à interferência de nuvens durante a coleta da imagem, que reduziu sensivelmente a luminosidade e comprometeu o contraste entre pixels vizinhos na comparação computacional

A classe predominante em todas as altitudes foi 'Areia Úmida' (cinza). Entretanto, de acordo com a Figura 6, é notório que as distorções prejudicaram gradativamente a classificação das imagens, desclassificando *pixels* desta classe e atribuindo aos outros rótulos. Com efeito, as estimativas de áreas ocupadas por detritos (e todas as demais classes) foram progressivamente superestimadas, com valores aproximados de 76.92 m², 88.99 m², 229.03 m², 337.45 m², 585.44 m² e 888.03 m² para a cobertura por detritos, segundo ISODATA nas seis altitudes. Já para K-MEANS as estimativas foram de 73.91 m², 85.48 m², 151.04 m², 322.00 m², 560.97 m² e 848.73 m². Neste sentido, este estudo concebe que para se realizar um mapeamento consistente e preciso dos resíduos numa faixa litorânea deve-se prezar por imagens simples obtidas em altitudes de até 20 metros de altitude.

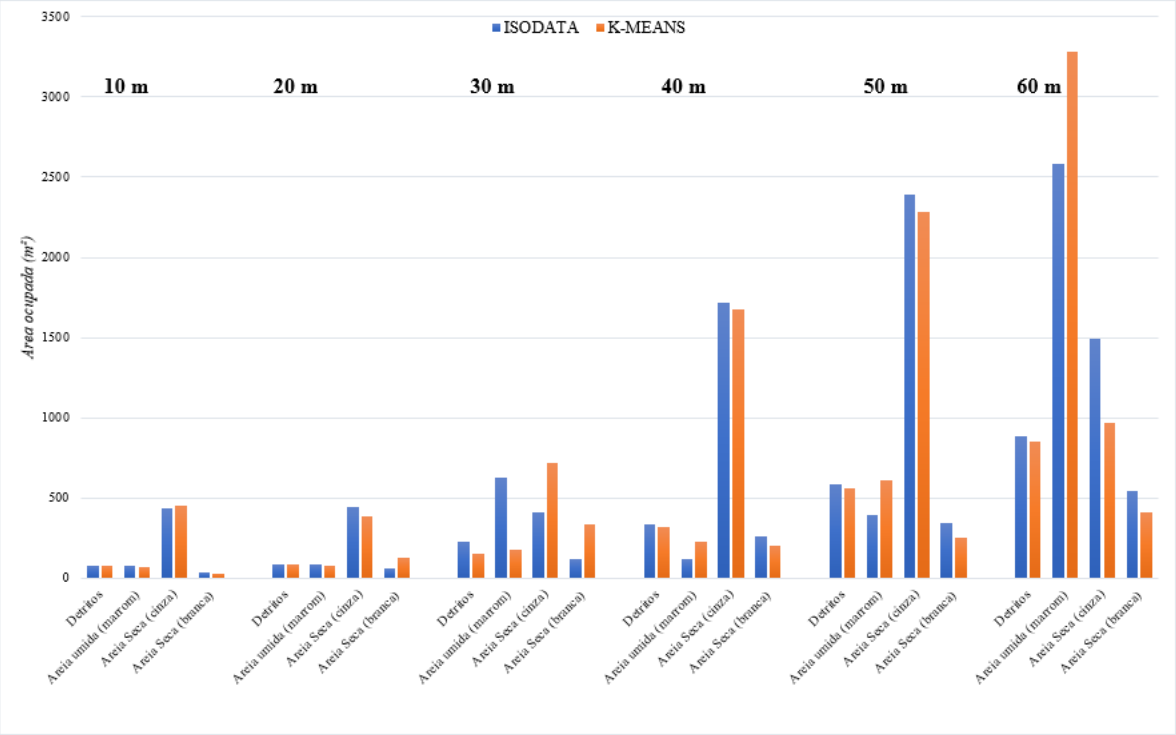


Figura 6 - Estimativa da área de praia ocupada por cada classe, por método de classificação
Fonte: Elaborado pelos autores ,2022.

Ao longo da faixa de areia foi possível detectar variações na distribuição de resíduos, os de maiores dimensões estão mais afastados do mar enquanto os de menores tamanhos predominavam na área de rebentação. Possivelmente, este padrão está associado aos detritos

carreados pelo mar e trazidos de volta à praia, após intenso e persistente intemperismo. Outro ponto importante a ser considerado é que a própria degradação provocada pelo mar nestes objetos, desencadeia variações na coloração da areia próxima a eles – principalmente no sentido perpendicular às ondas – como consequência direta do arraste a que o objeto é submetido diuturnamente.

Atribuir um nível de confiança à classificação dos itens também pode ser um aspecto importante no monitoramento destes resíduos, uma vez que classificações menos confiáveis – isto é, com alto grau de confusão entre classes – podem mascarar a realidade do ambiente, subestimando ou superestimando o volume de detritos presente no solo. Mesmo os elementos de maiores dimensões são passíveis de má-interpretação quando são observados de altitudes superiores a 30 metros, principalmente, porque na medida em que o *pixel* tem maior dimensão os elementos internos a esta área são desprezados pela maior predominância de areia ao seu redor. Assim, erros mais expressivos são registrados na proporção em que o detrito é mais fragmentado.

O posicionamento destas imagens, na praia ou em trechos litorâneos mais amplos, também constitui dado importante, principalmente quando combinado a levantamentos terrestres (itens coletados), pois tais informações são úteis para melhor compreender seu transporte, distribuição e acumulação sob processos costeiros.

Assim, um mapeamento baseado em ARP pode subsidiar amparo para catalogar e entender melhor os detritos que podem existir em locais de difícil acesso. Desse modo, a distribuição espacial dos detritos mapeados usando a abordagem ARP pode ser usada para calcular a densidade do lixo da praia ou para classificar as praias com base na limpeza e aptidão para banho. Por fim, acredita-se que uma lista de detritos classificados por ARPs, como proposta por Andriolo *et al.* (2021), pode ser refinada com sensores sofisticados e, paulatinamente, assumir um padrão de monitoramento baseado em ARPs nos próximos anos, além de auxiliar de maneira importante a gestão costeira e territorial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo mostraram a diferença entre métodos automáticos e convencionais para prever o estoque de detritos em regiões litorâneas e podem fornecer informações essenciais para o desenvolvimento de metodologias e políticas eficazes na gestão de detritos litorâneos, visto que, o diagnóstico da classe ‘Detritos’ foi a mais fácil de se

mapear por estes dois métodos de classificação não-supervisionada, apresentando as menores taxas de desvio entre os métodos, em todas as altitudes avaliadas.

O mapeamento dos resíduos por meio de ARPs foi fortemente influenciado pela relação entre a altitude de voo e o tipo dos resíduos. Os dois métodos de classificação não supervisionada, quando em voos de 10 e 20 m de altitude, mostraram-se eficazes no mapeamento de resíduos sólidos incorretamente depositados nas faixas de areia. Este resultado levanta uma questão importante, uma vez que a irregularidade da superfície (areia seca) compromete seriamente a confecção dos ortomosaicos, sendo recomendado um limite máximo de 50 metros de altitude em trabalhos desta natureza de modelagem.

Apesar da similaridade entre as classificações foi possível recomendar que altitudes de voo superiores a 30 metros sejam incapazes de delinear mais adequadamente os elementos residuais nas praias. Outro fator relevante a ser debatido é que ainda não se foi capaz de discriminar resíduos plásticos ou metálicos de resíduos orgânicos. A coloração branca em detritos possibilitou a rotulação como ‘Areia Seca’.

Neste aspecto, considerando a urgente necessidade do diagnóstico de poluição nas praias por detritos não-naturais, as estratégias latentes no propósito de avaliação e controle desses poluentes manifestam-se, com o auxílio do sensoriamento remoto, por imagens aéreas locais. Pesquisas futuras devem explorar o uso de sensores hiperespectrais em vez de multiespectrais para explorar maneiras que alguns detritos, em especial os com características de maior permanência, como os resíduos plásticos, pois respondem a comprimentos de onda específicos. Além disto, estratégias envolvendo inteligência artificial sobre imagens RGB como o uso de algoritmos de detecção de objetos, aprendizado de máquina ou aprendizado profundo podem contribuir para a identificação de resíduos com maiores níveis de assertividade.

Por fim, através das coletas empíricas coletadas foi consolidado a efetividade do ARP como ferramenta de diagnóstico de detritos sólidos na região costeira analisada, com um maior nível de detalhamento da imagem, se comparado com aquisição orbital (satélite), sendo uma estratégia de baixo custo aquisição de dados através de imagens, com alta resolução espacial e de independência temporal para avaliação qualitativa de detritos sólidos. Aliado a importância do diagnóstico dos detritos principalmente da ordem antropogênica, o uso de ARPs foi satisfatório como instrumento para subsídio de tomada de decisão para problemas de contexto perverso, como resíduos sólidos costeiros mal gerenciados.

Referências

ANDRADY, Anthony L. Microplastics in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 8, p. 1596-1605, 2011.

ANDRIOLO, U.; GONÇALVES, G.; RANGEL-BUITRAGO, N.; PATERNI, M.; BESSA, F.; GONÇALVES, L.M.; SOBRAL, P.; BINI, M.; DUARTE, D.; FONTÁN-BOUZAS, A.; et al. Drones for litter mapping: An inter-operator concordance test in marking beached items on aerial images. **Marine Pollution Bulletin**, 169, 112542, 2021.

ATWOOD, Elizabeth C. et al. Coastal accumulation of microplastic particles emitted from the Po River, Northern Italy: comparing remote sensing and hydrodynamic modelling with in situ sample collections. **Marine Pollution Bulletin**, v. 138, p. 561-574, 2019.

BOUCHER, Helen W. Bad bugs, no drugs 2002–2020: progress, challenges, and call to action. **Transactions of the American Clinical and Climatological Association**, v. 131, p. 65, 2020.

CARVALHO, A.B. **Economia do mar**: conceito, valor e importância para o Brasil. Programa de Pós-Graduação em Economia e Desenvolvimento. 2018. 185 f. Tese (Doutorado em Economia do Desenvolvimento) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CHANG, Xiaoru et al. Potential health impact of environmental micro-and nanoplastics pollution. **Journal of Applied Toxicology**, v. 40, n. 1, p. 4-15, 2020.

DA COSTA CAVALCANTI, Paula Gomes. Lei Federal nº 14.026/2020: o" velho" novo marco regulatório do saneamento básico. **Ensaios**, v. 18, 2021.

DIERSSEN, H. M., CHLUS, A., & RUSSELL, B. Hyperspectral discrimination of floating mats of seagrass wrack and the macroalgae Sargassum in coastal waters of Greater Florida Bay using airborne remote sensing. **Remote sensing of environment**, 167, 247-258, 2015.
EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment, **Official Journal of the European Union**. 12.6.2019. L 155/1 - L 155/19.
GADELHA DA SILVA, Tamna; BRAZ RABELO, Francisco Davy; DE BRITO NUNES, Hikaro Kayo. Geomorfologia fluvial e geodiversidade do Lago de Tefé (Tefé, Amazonas, Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, *[S. l.]*, v. 17, n. 4, p. 2396–2411, 2024.
GALL, Sarah C.; THOMPSON, Richard C. The impact of debris on marine life. **Marine Pollution Bulletin**, v. 92, n. 1-2, p. 170-179, 2015.

GARABA, S. P.; DIERSSEN, H. M. Hyperspectral ultraviolet to shortwave infrared characteristics of marine-harvested, washed-ashore and virgin plastics**. Earth System Science Data**, v. 12, n. 1, p. 77–86, 2020.

GARABA, Shungudzemwoyo P.; DIERSSEN, Heidi M. An airborne remote sensing case study of synthetic hydrocarbon detection using short wave infrared absorption features identified from marine-harvested macro-and microplastics. **Remote Sensing of Environment**, v. 205, p. 224-235, 2018.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.

GODDIJN-MURPHY, L.; DUFAUR, J. Proof of concept for a model of light reflectance of plastics floating on natural waters. **Marine Pollution Bulletin**, v. 135, p. 1145–1157, 2018.

GODDIJN-MURPHY, Lonneke et al. Concept for a hyperspectral remote sensing algorithm for floating marine macro plastics. **Marine Pollution Bulletin**, v. 126, p. 255-262, 2018.

JAMBECK, Jenna R. et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science,** v. 347, n. 6223, p. 768-771, 2015.

JENSEN, A. M., HARDY, T., MCKEE, M., & CHEN, Y. Using a multispectral autonomous unmanned aerial remote sensing platform (AggieAir) for riparian and wetlands applications. In 2011 **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium** (pp. 3413-3416), 2011.

LI, W. *et al.* Microplastics in agricultural soils: Extraction and characterization after different periods of polythene film mulching in an arid region. **Science of the Total Environment**, v. 749, p. 141420, 2020.

MANZOOR, J.; SHARMA, M.; SOFI, I. R.; DAR, A. A. Plastic waste environmental and human health impacts. In: *Handbook of Research on Environmental and Human Health Impacts of Plastic Pollution*. Hershey: IGI Global, 2020. p. 29–37.

MAS, J. F. *et al.* Análise da disponibilidade de imagens Landsat e Sentinel para o Brasil, 2020.

MAXIMENKO, N. *et al.* Remote sensing of marine debris to study dynamics, balances and trends. **White Paper, Decadal Survey for Earth Science and Applications from Space**, n. 22, 2016.

MAXIMENKO, N. *et al.* Toward the integrated marine debris observing system. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, p. 447, 2019.
ONU**. Relatório sobre mudanças climáticas**. Nova York: Organização das Nações Unidas, 2023.

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Turning off the tap: how the world can end plastic pollution and create a circular economy**. Nairobi, *2023.*

SHEN, Chunqi et al. Ecosystem metabolism and carbon balance in Chesapeake Bay: A 30-year analysis using a coupled hydrodynamic-biogeochemical model. **Journal of Geophysical Research**: Oceans, v. 124, n. 8, p. 6141-6153, 2019.

TOPOUZELIS, K.; PAPAGEORGIOU, D.; KARAGAITANAKIS, A.; PAPAKONSTANTINOU, A.; ARIAS BALLESTEROS, M. Remote sensing of sea surface artificial floating plastic targets with Sentinel-2 and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2019). **Remote Sensing**, v. 12, n. 12, 2020.

VALLE, C. E.; LAGE, H. **Meio ambiente:** acidentes, lições e soluções. São Paulo: Editora Senac, 2019.

VAN SEBILLE, E.; WILCOX, C.; LEBRETON, L.; MAXIMENKO, N.; HARDESTY, B. D.; VAN FRANEKER, J. A.; ERIKSEN, M.; SLOOTEN, E.; LAW, K. L. A global inventory of small floating plastic debris. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 12, p. 124006, 2015.

WILLIAMS, A. T.; RANGEL-BUITRAGO, Nelson. Marine litter: Solutions for a major environmental problem. **Journal of coastal research**, v. 35, n. 3, p. 648-663, 2019.

ZHANG, Weiwei et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China. **Environmental pollution**, v. 231, p. 541-548, 2017.