



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE TEMPORAL DA CONTAMINAÇÃO DE ÓLEO RELACIONADA À
GEODIVERSIDADE LITORÂNEA NO MUNICÍPIO DO CABO DE SANTO AGOSTINHO -
PE**

EDUARDO BARCELOS BONTEMPO FILHO

Recife

2023

EDUARDO BARCELOS BONTEMPO FILHO

**ANÁLISE TEMPORAL DA CONTAMINAÇÃO DE ÓLEO RELACIONADA À
GEODIVERSIDADE LITORÂNEA NO MUNICÍPIO DO CABO DE SANTO AGOSTINHO -
PE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho

Coorientador: Prof. Dr. José Antonio Barbosa

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

B722a Bontempo Filho, Eduardo Barcelos.

Análise temporal da contaminação de óleo relacionada à geodiversidade litorânea no município do Cabo de Santo Agostinho – PE / Eduardo Barcelos Bontempo Filho. 2023.

140 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Coorientador: Prof. Dr. José Antônio Barbosa.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Derramamento de óleo. 3. Desastre ambiental. 4. Ambientes costeiros tropicais. 5. Sedimentos de praia. 6. Estado de Pernambuco. 7. Encostas. 8. Modelos digitais. I. Coutinho, Roberto Quental (Orientador). II. Barbosa, José Antônio (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 114

EDUARDO BARCELOS BONTEMPO FILHO

**ANÁLISE TEMPORAL DA CONTAMINAÇÃO DE ÓLEO RELACIONADA
À GEODIVERSIDADE LITORÂNEA NO MUNICÍPIO
DO CABO DE SANTO AGOSTINHO – PE**

Tese em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Concentração Geotecnia.

Aprovada em 14/02/2023

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho - Universidade Federal de Pernambuco

Coorientador: Prof. Dr. José Antônio Barbosa – Universidade Federal de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá (examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti (examinador externo)

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

participação por videoconferência

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis (examinador externo)

Universidade de São Paulo

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Helenice Vital (examinadora externa)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Tereza Cristina Medeiros de Araújo (examinadora externa)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho a minha mãe/velhota Bete e ao meu avô João (em memória), que sempre entenderam e se interessavam no que eu estava pesquisando, além de sempre me apoiarem nessa longa jornada.

Dedico este trabalho também aos meus orientadores, Prof. Roberto Coutinho e Prof. Antonio Barbosa – dois homens fantásticos que me apoiaram de uma forma espetacular! Cada orientação, conselho e palavras de incentivo foram cruciais nesse árduo caminho.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo e todos, agradeço a Deus, e a toda minha família pela compreensão, principalmente nos momentos de ausência, afinal atinge a maioridade, pois já estou há 18 anos fora de casa. Como costumo falar para a minha mãe: “fui criado pela senhora para ser do mundo”.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (mais uma vez) por ter aberto as portas do seu renomado curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil para um ousado geólogo. Agradeço aos professores que fazem parte do corpo docente da área de Geotecnia, e às secretárias do PPGEC, Andreia em especial, por terem me dado todo o suporte necessário durante esse tempo.

Agradeço ao meu orientador, Professor Roberto, e a sua adorável esposa Dóris: sem palavras que sejam suficientes para expressar minha gratidão aos senhores. Aceitaram-me em 2013, quando eu ainda estava trabalhando no projeto do então Ministério da Integração Nacional, via REGEA/SP, e sempre me trataram com muito carinho e respeito.

Agradeço ao meu coorientador, Professor Antonio, que eu já o admirava no tempo da minha graduação e nem imaginava um dia ter o privilégio de ter sua orientação. O Professor Roberto foi cirúrgico, e não só me deu o apoio que eu precisava para a mudança do projeto da tese, mas um cara sensacional, companheiro de todas as horas, sempre disponível para tirar minhas dúvidas, ir para os campos praianos debaixo de sol e chuva, ajudar a construir e revisar os nossos artigos e tantas outras coisas.

Agradeço ao CNPq pela bolsa de estudos que me foi concedida e à renomada banca examinadora (Prof. Fernando Jucá, Prof.^a Helenice Vital, Prof. Heraldo Giacheti, Prof.^a Tereza Cristina e Prof. Vagner Elis) por se disponibilizarem em avaliar e contribuir com este trabalho.

Dessa banca de respeito, tenho que fazer um agradecimento especial: Prof. Giacheti. Um profissional exemplar, no qual eu só conhecia de nome, mas tive a satisfação de conhecer pessoalmente e trabalhar intensamente durante o nosso projeto em parceria SP/PE, que deu total suporte à minha tese de doutorado através da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio do Auxílio # 2020 / 03847-8.

Agradeço aos colegas Cauê, Germano e Osvaldo por todo o apoio fundamental durante os trabalhos de campo e de produção dos artigos ao longo dessa jornada.

Agradeço também, o apoio de toda a comunidade do município do Cabo de Santo Agostinho, em especial à Ana Sandra e ao Daniel Alves, que trabalharam comigo arduamente durante o desastre, e que após o evento, me deram todo o suporte necessário para que essa tese fosse elaborada.

Muito obrigado ao Laboratório GEOQUANTT (Departamento de Geologia) e Laboratório de Geologia Marinha (Departamento de Oceanografia), ambos da UFPE, em parceria com o Laboratório de Geotecnia (Departamento de Geotecnia da EESC-USP). Serei eternamente grato por toda ajuda necessária que me deram para realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Roberto Barcellos, pelo seu grande auxílio nos trabalhos de campo e junto ao Laboratório de Geologia Marinha, do Departamento de Oceanografia da UFPE.

Agradeço ao meu amigo Clori Roger, pelos 16 anos de amizade e de diversas histórias/conversas de outra dimensão, e ao amigo que adquiri nesse doutorado durante a minha "expedição" à Califórnia, Bryan Collins, que me recebeu como se eu fosse seu amigo de longa data, apresentando-me à fantástica Universidade da Califórnia, em Berkeley, e como se isso não bastasse, me proporcionou uma experiência inacreditável no Serviço Geológico dos Estados Unidos.

Agradeço ao GEGEP, pelos colegas que também tive a sorte de me apoiarem através deste grupo: Hugo, Danisete, Iran, Betânia, etc. o meu muito obrigado. E por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Durante os meses de agosto a novembro de 2019, a região costeira do Nordeste do Brasil foi o cenário do que já é classificado como o maior desastre ambiental do litoral brasileiro, impactando ecossistemas costeiros em 11 estados e uma diversidade de ecossistemas relacionados a diferentes configurações geológicas, como praias arenosas, costas rochosas, estuários, planícies de maré, manguezais e sistemas de recifes. Nesta pesquisa, foi realizada uma análise temporal da ocorrência de contaminação remanescente em três praias (Paiva, Itapuama e Enseada dos Corais) do Município de Cabo de Santo Agostinho, Estado de Pernambuco. O objetivo principal é investigar a relação entre a contaminação remanescente em diferentes configurações geológicas: sedimentos e superfícies rochosas. Desta forma, foi construído um modelo temporal do efeito de contaminação do óleo em relação aos tipos de substrato geológico existentes na região. A comparação dos resultados deste evento inédito em região tropical permitirá uma melhor previsão em relação a problemas futuros de mesma natureza. A abordagem se concentrou no mapeamento sistemático de resíduos, coleta de amostras de sedimentos por meio de trincheiras, documentação fotográfica e análise microscópica qualitativa. As análises de granulometria, carbonato de cálcio e matéria orgânica total proporcionaram uma caracterização dos sistemas de deposição atuais. Também foi realizada a coleta de imagens por meio de drone de um costão rochoso para o acompanhamento da contaminação. Os ambientes estudados compreendem praias arenosas, costões rochosos, superfícies duras como corais e arenitos de praia (*beachrocks*). Também foi realizada uma avaliação do efeito da contaminação em superfícies formadas por formações geológicas, considerando a presença de estruturas como fraturas naturais, juntas e cavidades de dissolução produzidas em substratos duros. Esta pesquisa também permitiu elaborar um modelo esquemático de evolução da contaminação gerada pelo trabalho de monitoramento que resume o destino dos resíduos de óleo nas três praias estudadas em diferentes estágios temporais. Deste modo, a pesquisa comprovou que grande parte do contaminante foi removido pela ação imediata realizada por voluntários, por agentes governamentais e pelo processo altamente dinâmico que controla a erosão e deposição sazonal nos perfis de praia arenosas estudadas. Foi possível identificar qualitativamente o nível de persistência do contaminante em relação à morfologia e composição dos substratos impactados. Os efeitos observados foram comparados com outros desastres e permitiu estabelecer um arcabouço de conhecimentos que será importante para a mitigação e o monitoramento de eventuais desastres por contaminação de óleo ou derivados.

Palavras-chave: derramamento de óleo; desastre ambiental; ambientes costeiros tropicais; sedimentos de praia; estado de Pernambuco, encostas; modelos digitais.

ABSTRACT

During the months of August to November 2019, the coastal region of Northeast Brazil was the scene of what is already classified as the biggest environmental disaster on the Brazilian coast, impacting coastal ecosystems in 11 states and a diversity of ecosystems related to different geological configurations such as sandy beaches, rocky shores, estuaries, tidal flats, mangroves and reef systems. In this research, a temporal analysis of the occurrence of remaining contamination was carried out on three beaches (Paiva, Itapuama and Enseada dos Corais) in the Municipality of Cabo de Santo Agostinho, State of Pernambuco. The main objective is to investigate the relationship between the remaining contaminations in different geological configurations: sediments and rock surfaces. In this way, a temporal model of the effect of oil contamination in relation to the types of geological substrate existing in the region was constructed. Comparing the results of this unprecedented event in a tropical region will allow for a better prediction of future problems of the same nature. The approach focused on the systematic mapping of residues, collection of sediment samples through trenches, photographic documentation and qualitative microscopic analysis. The analysis of granulometry, calcium carbonate and total organic matter provided a characterization of current deposition systems. Images were also collected by drone of a rocky shore to monitor the contamination. The environments studied comprise sandy beaches, rocky shores, hard surfaces such as corals and beach sandstones (beachrocks). An evaluation of the effect of contamination on surfaces formed by geological formations was also carried out, considering the presence of structures such as natural fractures, joints and dissolution cavities produced in hard substrates. This research also allowed the elaboration of a schematic model of the evolution of the contamination generated by the monitoring work that summarizes the destination of the oil residues in the three beaches studied in different temporal stages. Thus, the research prove that a large part of the contaminant was removed by the immediate action carried out by volunteers and by government agents and by the highly dynamic process that controls erosion and seasonal deposition in the studied sandy beach profiles. It was possible to qualitatively identify the level of persistence of the contaminant in relation to the morphology and composition of the impacted substrates. The observed effects were compared with other disasters and allowed establishing a framework of knowledge that will be important for the mitigation and monitoring of eventual disasters due to contamination of oil or derivatives.

Keywords: oil spill; environmental disaster; tropical coastal environments; beach sediments; state of Pernambuco; slopes, digital models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Registro da poluição causada pelo derramamento de óleo na área de estudo	20
Figura 2 - Carta SAO da região litorânea do Cabo de Santo Agostinho, indicando um alto índice de sensibilidade ao derramamento de óleo nas praias do Paiva, de Itapuama e de Enseada dos Corais, marcadas no mapa pelos retângulos em vermelho. Fonte: Mallmann et al. (2011)	21
Figura 3 - Modelo conceitual da localização e tamanho de vários resíduos de óleo em ambientes próximo à costa. Fonte: Modificado de Gustitus & Clement (2017)	22
Figura 4 - O Exxon Valdez encalhou no <i>Bligh Reef</i> , em Prince William Sound, Alasca, tornando-se o maior vazamento de petróleo em águas dos EUA na época.....	27
Figura 5 - Exxon Valdez transferindo parte do óleo remanescente para o Exxon Baton Rouge, na manhã do dia 25 de março	28
Figura 6 - Fotos de pássaros encharcados de óleo e outros animais selvagens reforçaram o quão inadequadas eram as leis existentes na prevenção ou tratamento do EVOS.....	30
Figura 7 - Linha do tempo de recuperação do EVOS, após 25 anos	34
Figura 8 - Espalhamento do petróleo após o aterramento do Exxon Valdez.....	35
Figura 9 - Destino geral do óleo do Exxon Valdez.....	36
Figura 10 - Localização de poços cavados na subsuperfície e a porcentagem desses poços com oleosidade em algumas ilhas de Prince William Sound nas pesquisas realizadas em 2001, 2003 e 2007.....	38
Figura 11 - Fotografia aérea na costa norte de Smith Island mostrando as localizações aproximadas gerais dessas zonas de marés.....	39
Figura 12 - Seção transversal ilustrando o desenvolvimento de uma "superfície blindada" de uma praia de cascalho e o processo de soterramento que continua a preservar manchas de óleo subterrâneo.....	41
Figura 13 - Resultados indicando que o modelo é um forte preditivo de onde o óleo poderia ser encontrado.....	43
Figura 14 - Locais pesquisados para o óleo subsuperficial persistente em Prince William Sound, Alasca.....	44

Figura 15 - Imagens de satélite da área de estudo. A imagem ampliada mostra a área de estudo entre a porção sul da Praia do Paiva (1), até a Praia da Enseada dos Corais (3). Duas das praias têm orientação NNE-SSW, Paiva (1) e Enseada dos Corais (3), e Itapuama está orientada no sentido WNW-ESE. As setas pretas e brancas indicam a direção principal dos ventos e correntes para esta região, respectivamente (Azevêdo et al., 2021). Setas amarelas indicam a ocorrência de linhas rochosas de praia, e setas laranja indicam o litoral rochoso da Praia de Itapuama (2) formado por traquitos da Suíte Magmática Ipojuca (Nascimento et al., 2004; 2012). Inserção 1) Localização do perfil de levantamento 1 (linha vermelha) e estação amostral 1a na Praia do Paiva (ponto preto). Inserção 2) Localização do perfil de levantamento 2 na Praia de Itapuama e estações de amostragem 2a (sedimentos) e 2b (pavimento rochoso). Inserção 3) Localização do perfil de levantamento e estações de amostragem, 3a e 3b, na Praia da Enseada dos Corais. Fonte: Google Earth Pro (as imagens são de 13 de setembro de 2019).....	60
Figura 16 - Vento médio superficial costeiro entre os dias 15 e 18 de dezembro de 2019.....	64
Figura 17 - Tábua de maré do Porto de Suape entre os dias 01 e 10 de fevereiro de 2019.....	66
Figura 18 - Altura e período das ondas entre os dias 15 e 18 de dezembro de 2019. Fonte: Modificado de SURFGURU (2019).....	68
Figura 19 - Mapa de localização da Província Borborema, situada na região nordeste do Brasil. Fonte: Correia Filho (2017).....	72
Figura 20 - Mapa da faixa costeira e embasamento adjacente a Bacia de Pernambuco. Fonte: Correia Filho (2017).....	73
Figura 21 - Mapa de localização das bacias marginais na borda oriental da Província Borborema, onde a zona costeira da Bacia de Pernambuco, região marcada pela cor verde claro, é limitada pela Zona de Cisalhamento de Pernambuco (representada pelo número 2, na legenda do mapa), a norte, e pelo alto de Maragogi-Barreiros (representada pelo número 1, na legenda do mapa), a sul. Fonte: Correia Filho (2017).....	75
Figura 22 - Carta estratigráfica da Bacia de Pernambuco. Fonte: Maia (2012).....	76
Figura 23 - (a) Mapa geológico da região das praias estudadas. (b) Perfil geológico esquemático. Fonte: Modificado de Nascimento (2003).....	77

- Figura 24 - A) Exemplo das trincheiras quadradas escavadas para observar os sedimentos rasos enterrados nas estações de amostragem. A imagem mostra a ocorrência de dois leitos enriquecidos em minerais pesados, na Praia do Paiva. B) Trincheira rasa (faixa) escavada na Praia de Itapuama. C) Levantamento e coleta de tar residues, na Praia de Itapuama. D) Exemplo de coleta de tar residues em superfície rochosa, na Praia de Itapuama.....81
- Figura 25 - Ortofoto criada a partir da junção de 105 imagens capturadas a 10 m de altitude; a) ortofoto completa apresentando 84,5 m por 41,5 m do local; b) Ampliação de 10 vezes da ortofoto apresentando região de 2,5 m; c) Ampliação de 20 vezes da ortofoto apresentando região de 1,25 m e d) Ampliação de 40 vezes da ortofoto apresentando região de 0,62 m e GSD de 0,5 cm/pixel.....82
- Figura 26 - Perspectiva de um trecho do costão rochoso da praia de Itapuama reconstruído como modelo digital a partir da aquisição de imagens. As esferas coloridas demonstram a localização da plataforma da fotogrametria gerada e projeção de imagens, conforme local de captura aérea.....85
- Figura 27 - Sistema OhmMapper (Geometrics Inc), que é composto pelo transmissor e receptores, além do data logger, utilizado para fazer o levantamento geofísico na Praia de Paiva, em dezembro de 2021.).....86
- Figura 28 - Mapa mostrando a distribuição das áreas contaminadas na zona costeira brasileira até o final de 2019, causado pelo derramamento de óleo no mar. O derramamento atingiu nove estados do Nordeste do Brasil e dois estados do Sudeste. A área de estudo está localizada 40 km ao sul da cidade de Recife (ponto vermelho), no litoral do Estado de Pernambuco. A zona azul clara marca a zona econômica exclusiva. O encarte mostra a região impactada na margem leste do Brasil. Fonte: Modificado de IBAMA (2020); Gonçalves (2020).....89
- Figura 29 - Registro da poluição causada pelo evento de derramamento de óleo na área de estudo. A) Manchas de óleo, Praia de Itapuama. B) Trabalhos de limpeza realizados por funcionários do governo e voluntários na Praia do Paiva. C) Sacos plásticos contendo óleo retirados das praias. D) Vista aérea dos costões rochosos da Praia de Itapuama durante o clímax da chegada do petróleo ao litoral. A topografia do costão rochoso é formada por pequenos beachrocks e poças de recifes com substratos arenosos na região do foreshore. E) Pastilhas de óleo emulsificado percoladas através de fraturas e juntas naturalmente formadas nas rochas aflorantes na pós-praia da Praia de Itapuama. F) Parte do costão rochoso da Praia de Itapuama, que se encontra recoberta por sedimentos. Seta amarela - óleo flutuando durante a maré baixa, seta branca - pedaços de óleo depositados durante a maré vazante, seta vermelha - pedaços de óleo depositados durante a maré alta na zona de

supramaré. Seta branca - óleo depositado entre as rochas no foreshore, seta vermelha - óleo que inundou e inundou as superfícies rochosas que afloram na parte superior da zona do foreshore.....91

Figura 30 - Características das praias estudadas. A) Foto do setor sul da Praia do Paiva, voltada para nordeste. As linhas amarelas tracejadas mostram o limite da escarpa dos processos erosivos mais recentes. B) Costão rochoso da Praia de Itapuama, voltado para sudeste. As setas verdes indicam pequenas piscinas. C) Foto da Praia de Enseada dos Corais, virada a sul-sudeste. Setas azuis indicam as zonas costeiras e costeiras. A seta amarela indica os beachrocks. D) e E) As setas vermelhas mostram escarpas formadas por erosão recente e dois leitos contendo minerais pesados depositados (marcador amarelo - régua de 30 cm). F) Superfícies rochosas na parte superior de foreshore da praia de Itapuama e afloramentos rochosos onde a região de foreshore é coberta por areia. O símbolo da gota preta indica ocorrências de resíduos de hidrocarbonetos encontrados durante o estudo. As fotos foram tiradas em março de 2021 durante a maré baixa.....93

Figura 31 - Os rissóis de hidrocarboneto (tar patties) percolaram através de fraturas formadas naturalmente e juntas de rochas que afloram na costa da Praia de Itapuama.....95

Figura 32 - Exemplo de tar balls e tar residues encontrados nas praias estudadas. A a C) Tar residues com dimensões de 5 a 30 mm encontrados na zona de arrebentação da Praia do Paiva, em janeiro de 2021. Os tar fragments isolados foram lavados com fragmentos biogénicos e apresentam uma consistência viscosa. D a F) Tar balls encontradas no fundo de uma piscina durante a maré baixa na zona de arrebentação da Praia de Itapuama, março de 2021. Os tar fragments isolados foram encontrados com partículas detríticas biogénicas, e também presos em fraturas naturais (F). G e H) Tar balls, de 5 a 30 mm de diâmetro, encontradas na zona de arrebentação da Praia da Enseada, durante a maré baixa de janeiro de 2021. O material apresenta consistência sólida e está misturado a partículas siliciclásticas e biogénicas.....97

Figura 33 - Tar residues nas rochas traquíticas da Praia de Itapuama. A) Resíduos de óleo aderidos à superfície das rochas e presos dentro de juntas e vesículas na pós-praia, dezembro de 2019. B) Imagem do pavimento de rocha na parte superior da pós-praia com tar residue visíveis presos em fraturas e juntas (setas brancas) e textura vesicular (setas verdes). C) Tar residues presos em vesículas (setas verdes) em uma superfície sub-vertical. D) Detalhe de uma superfície horizontal com tar residue presos nas juntas (seta branca) e vesículas (setas verdes). E e F) Tar residues presos nas juntas (seta branca). A quebra do material permite que o contaminante se infiltre profundamente nas juntas da rocha. As fotos C a F foram tiradas em janeiro de 2021.....99

- Figura 34 - Amostra de rocha mesoscópica coletada dos afloramentos da Praia de Itapuama em dezembro de 2019. A) Imagem de uma face de junta. B) A figura mostra que o contaminante incrustou as vesículas nas superfícies externas dos afloramentos (setas verdes - topo), C) e percolou pelas juntas, criando acúmulos em seus contatos (setas brancas). A parte esbranquiçada da amostra marca a zona enterrada (inferior) que foi lixiviada e alterada.....100
- Figura 35 - A e B) Fotos dos tar residues aderidos nas vesículas da amostra mostrada na Figura 29. A) superfície do material oxidado e intemperizado, e B) aspecto interno após a remoção mecânica da superfície do resíduo incrustante, que está internamente melhor preservado. O material que recobre as rochas é intensamente misturado a grãos de minerais siliciclásticos e fragmentos de rocha. C e D) Tar residue removido das vesículas. E e F) Tar balls coletadas na Praia da Enseada, janeiro de 2021. Este material é macio e viscoso, e os fragmentos possuem menor conteúdo de grãos clásticos e biogênicos. A superfície é menos oxidada e intemperizada do que a observada para os tar residues nas rochas expostas. G e H) Fotos com luz visível e luz ultravioleta de amostras de areia coletadas na Estação 3, Praia da Enseada. Nenhuma fluorescência relacionada a hidrocarbonetos foi detectada, apenas fluorescência relacionada a materiais biogênicos. I, J e K) Imagens de Tar residues removidos das rochas. Luz visível, imagens de luz ultravioleta e processamento de contraste para destacar as áreas fluorescentes detectadas. A análise sugere luminescência relacionada a tar residues muito alterados.....82
- Figura 36 - A) Mapeamento digital dos planos de fraturas e falhas (linhas pretas), e cálculo da densidade de fratura por área (P20). B) Mapa das regiões com maior densidade de fraturamento no pavimento rochoso exposto na praia.....106
- Figura 37 - Mapas onde se tem A) a sobreposição dos traços de falhas e fraturas sobre o mapa de declividade das superfícies modeladas. B) declividade onde se observa intensa compartimentação do pavimento rochoso e a formação de blocos com superfícies de baixo ângulo (cores azuis a verde-claro). As setas em preto indicam os locais onde ocorre maior concentração de superfícies de blocos com baixo ângulo de inclinação horizontal e maior densidade de fraturas.....107
- Figura 38 - Detalhe de uma parte do modelo apresentando zonas de maior risco de manutenção do contaminante, criada a partir da integração de mapas de declividade com os traços de fraturas e falhas (inferior), e mapa de densidade de fraturas em uma malha que pode ser redimensionada para um grid de maior espaçamento.....108

Figura 39 - Duas linhas de levantamento RC realizadas na praia da Enseada dos Corais, de norte a sul, separadas por 10 metros.....	110
Figura 40 - Resultado preliminar das Seções de Resistividade de Modelo Inverso realizadas na praia de Enseada dos Corais.....	111
Figura 41 - Modelo esquemático de óleo evolução da contaminação. a) Climografia com temperaturas médias mensais (vermelho) e precipitação (azul) para Cidade do Cabo de Santo Agostinho (fonte: climatedata.org/Copernicus Climate change Services. Os dados meteorológicos foram coletados entre 1999-2019). A estação chuvosa (inverno) marca o período de erosão sazonal. b) A proposta dos três estágios para a evolução dos resíduos de hidrocarboneto nas praias estudadas. 1- Deposição do óleo. A variação das marés permitiu que os contaminantes chegassem ao foreshore e partes da zona de backshore. Esta etapa ocorreu após o período erosivo, quando as praias arenosas apresentaram um perfil côncavo. 2 - Resíduos deixados após a operação de limpeza foram retrabalhados e enterrados devido ao processo de alta energia da remobilização da areia. Nesse período, os resíduos de hidrocarboneto sofreram intemperismo intenso (químico, mecânico, bioquímico) e decomposição. 3- A etapa erosiva seguinte permitiu a exumação de agregados óleo-areia (bolotas de hidrocarboneto encalhadas). A meteorização dos resíduos de óleo incrustados no costão rochoso teve uma evolução diferente, o que impediu a sua degradação.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Maiores derramamentos de óleo da história.....	29
Tabela 2 - Fatores geomórficos associados à ausência de óleo subsuperficial.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	JUSTIFICATIVA.....	23
1.2	OBJETIVOS.....	24
1.3	ESTRUTURA DA TESE.....	24
2	DESASTRES CAUSADOS POR DERRAMAMENTO DE ÓLEO.....	26
2.1	APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO.....	26
2.2	DERRAMAMENTO DE ÓLEO DO EXXON VALDEZ (EXXON VALDEZ OIL SPILL - EVOS).....	26
2.2.1	O aprendizado / legado do Exxon Valdez Oil Spill (EVOS).....	31
2.2.2	Os recursos e os serviços usados pelo Exxon Valdez Oil Spill (EVOS).....	32
2.2.3	Persistência do óleo ao longo do tempo.....	34
2.3	PRINCIPAIS DESASTRES CAUSADOS POR DERRAMAMENTO DE ÓLEO NO BRASIL E O MARCO REGULATÓRIO - LEGISLAÇÃO AMBIENTAL.....	45
2.3.1	Vazamento do duto PE-II na Baía de Guanabara.....	45
2.3.2	Explosão e colapso da P-36 na Bacia de Campos.....	47
2.3.3	Fratura de reservatório e exsudação no Campo de Frade, Bacia de Campos.....	48
2.3.4	Marco Regulatório – Legislação Ambiental.....	50
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	58
3.1	APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO.....	58
3.2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	58
3.3	CLIMA.....	61
3.4	VENTOS.....	63
3.5	MARÉS.....	65
3.6	ONDAS.....	66
3.7	CORRENTES MARINHAS.....	68
3.8	MATERIAL EM SUSPENSÃO.....	69
3.9	GEOLOGIA.....	70
3.9.1	Geologia Regional.....	70
3.9.2	Geologia Local.....	73
3.10	GEODIVERSIDADE COSTEIRA.....	77
4	MATERIAS E MÉTODOS.....	79

4.1	APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO.....	79
4.2	ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA GEODIVERSIDADE, DOS RESÍDUOS DE PETRÓLEO E SEUS EFEITOS.....	79
4.3	LEVANTAMENTO DE IMAGENS DO COSTÃO ROCHOSO E MODELAGEM DAS FEIÇÕES.....	82
4.4	LEVANTAMENTO GEOFÍSICO VARRENDO CONTÍNUAMENTE AS ÁREAS DE ESTUDO.....	85
5	RESULTADOS.....	87
5.1	APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO.....	87
5.2	IDENTIFICAÇÃO DAS LOCALIDADES / ÁREAS OLEADAS.....	87
5.3	ANÁLISE DA PRESENÇA DO ÓLEO E DO EFEITO DA SUA CONTAMINAÇÃO...	94
5.3.1	<i>Tar balls</i> encontrados nas praias	96
5.3.2	<i>Tar residues</i> incrustados no costão rochoso.....	98
5.4	AVALIAÇÃO MAPEAMENTO DOS RESÍDUOS DE ÓLEO NO COSTÃO ROCHOSO COM O APOIO DE VANT / DRONE.....	104
5.5	LEVANTAMENTO GEOFÍSICO UTILIZANDO O MÉTODO RESISTIVO CAPACITIVO (RC).....	109
5.6	DISCUSSÃO.....	111
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	120
6.1	CONCLUSÕES.....	120
6.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	121
	REFERÊNCIAS.....	123

1 INTRODUÇÃO

Durante os meses de agosto a novembro de 2019, a região costeira de todos os nove estados do Nordeste, foi o cenário do que já é classificado como o maior desastre ambiental do litoral brasileiro. A contaminação de grandes quantidades de petróleo bruto impactou ambientes litorâneos em nove estados da região Nordeste e dois no litoral Sudeste, Espírito Santo e Rio de Janeiro.

As primeiras manchas de óleo foram reportadas no dia 30 de agosto de 2019, em praias da Paraíba. Segundo o Ibama, foram feitos quatro registros nas praias Bela, Gramame, Jacumã e Tambaba nesta data. A última atualização de 19 de março de 2020 apontou que um total estimado de 1.009 localidades foram afetadas (IBAMA, 2020). Nos meses que se seguiram a esse período, alguns vestígios de óleo continuaram a ser relatados no litoral do nordeste pela Marinha do Brasil, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e civis. O agente responsável pelo derramamento de óleo não foi descoberto, apesar das investigações em andamento realizadas por organismos nacionais e internacionais. O IBAMA também sugeriu que a origem do derramamento poderia estar localizada de 400 a 700 km da margem brasileira, e possivelmente o óleo flutuou por aproximadamente 40 dias até atingir a costa.

No litoral de Pernambuco, o óleo afetou uma região de rica biodiversidade marinha, que inclui peixes, mamíferos marinhos, aves e uma série de ecossistemas complexos e frágeis, como manguezais e prados de ervas marinhas, já atingidos pela pressão antropogênica (Araújo et al., 2007). Os últimos relatórios divulgados pelo governo de Pernambuco afirmam que a operação de limpeza de praias e rios da zona costeira resultou na retirada de aproximadamente 1.650 toneladas de resíduos (óleo misturado com areia e outros materiais) desde as primeiras manchas de óleo na praia de São José da Coroa Grande, em 17 de outubro de 2019. O governo informou um total de 48 pontos no litoral e oito rios / estuários contaminados em 13 municípios do estado (G1 da Globo.com, 2020, Notícia 29/01/2020).

A área mais afetada no Estado de Pernambuco foi a região litorânea do município do Cabo de Santo Agostinho, onde aproximadamente 1.032 toneladas de resíduos foram retiradas das praias, segundo dados da Prefeitura Municipal do Cabo, via Secretaria Executiva de

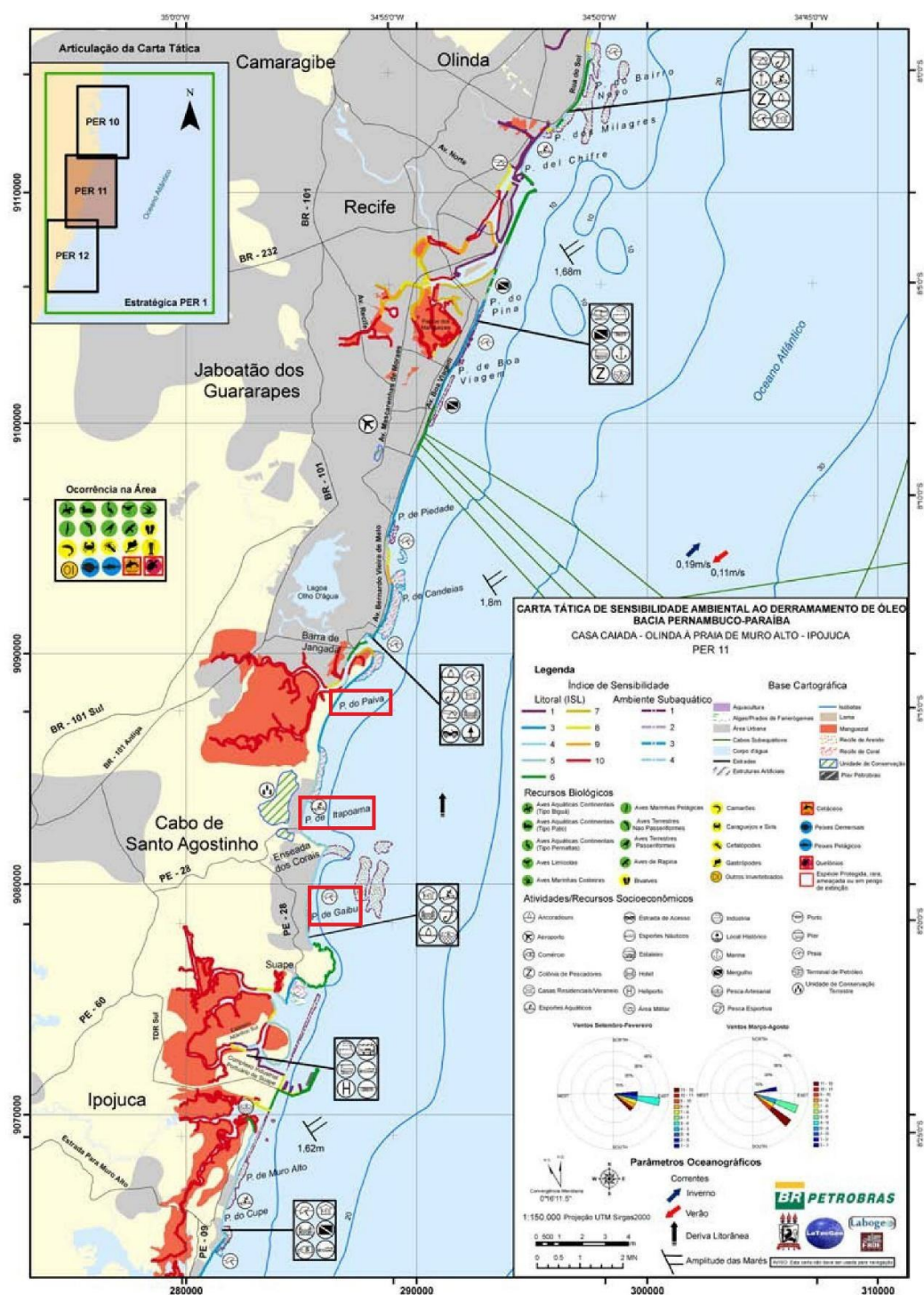
Limpeza Pública (Figura 1). Segundo Mallmann et al. (2011), as Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo (Cartas SAO) para o estado de Pernambuco, mais especificamente para a linha de costa do Cabo de Santo Agostinho, indica uma classificação de alto índice de sensibilidade ao óleo (Figura 2). Esta região apresenta uma grande diversidade de sistemas deposicionais costeiros, como praias arenosas, costões rochosos, planícies de marés, pântanos salgados, enseadas e canais estuarinos, faixas de mangue e piscinas em *beachrocks* e recifes (Manso et al., 2018). A poluição afetou severamente as três praias estudadas (Paiva, Itapuama e Enseada dos Corais, marcadas no mapa da Figura 2 pelos retângulos em vermelho), e o óleo foi depositado em praias de areia, fortemente influenciadas pela erosão marinha; pequenas piscinas de maré baixa, associadas a *beachrocks* e linhas de recifes; e no costão rochoso formado por rochas ígneas aflorantes do período Cretáceo. A operação de limpeza foi realizada principalmente por meios mecânicos do óleo depositado nas praias, que se misturou com sedimentos e plantas marinhas.

Figura 1 - Registro da poluição causada pelo derramamento de óleo na área de estudo.



Fonte: O autor, 2019.

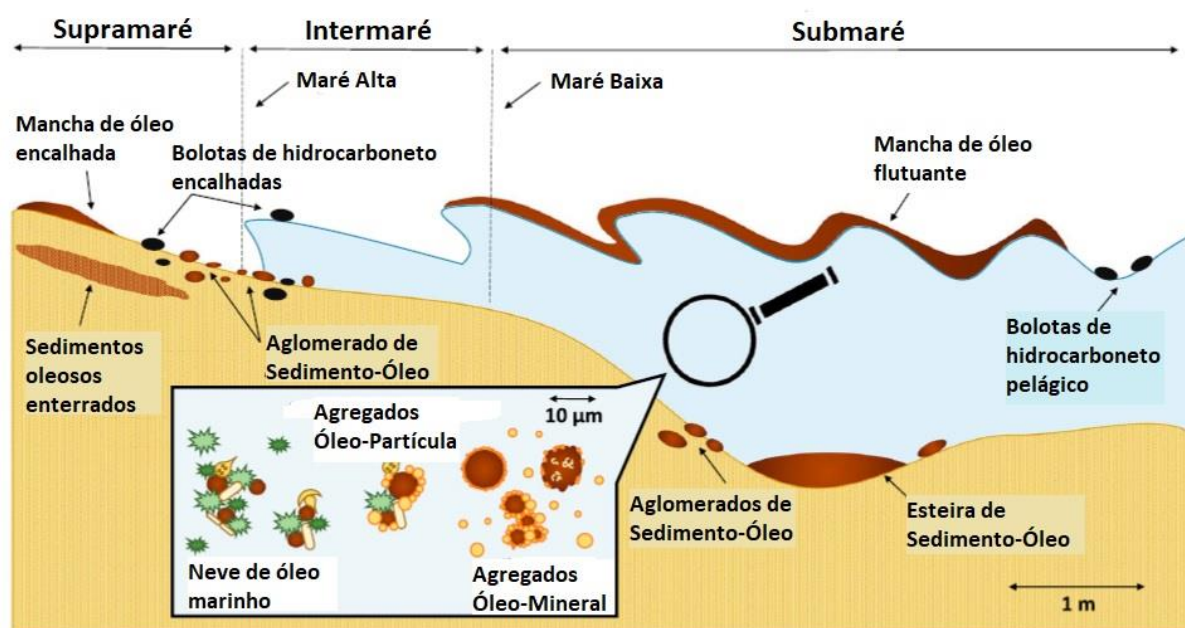
Figura 2 - Carta SAO da região litorânea do Cabo de Santo Agostinho, indicando um alto índice de sensibilidade ao derramamento de óleo nas praias do Paiva, de Itapuama e de Enseada dos Corais, marcadas no mapa pelos retângulos em vermelho.



Fonte: Mallmann et al. (2011).

Considerando a ausência de derramamento de óleo na superfície e a duração do evento, o modelo conceitual da localização e tamanho de vários resíduos de óleo em ambientes próximo à costa elaborado por Gustitus & Clement (2017), ilustra uma possível rota percorrida pelo óleo, saindo do seu ponto de origem, viajando em subsuperfície através das correntes oceânica, formando vários tipos de resíduos de óleo que podem estar presentes em ambientes próximos à costa, incluindo agregados microscópicos e aglomerados macroscópicos, bem como outras formas comuns de resíduos. Sendo assim, foi plausível que nenhuma imagem de satélite tenha detectado essas manchas de óleo durante esse trajeto em subsuperfície, de aproximadamente 700 km até chegar às praias.

Figura 3 - Modelo conceitual da localização e tamanho de vários resíduos de óleo em ambientes próximo à costa.



Fonte: Modificado de Gustitus & Clement (2017).

Em ecossistemas severamente impactados por derramamentos de óleo, originados de acidentes com poços e petroleiros, os resíduos de óleo ainda estão presentes várias décadas após a contaminação. Como exemplo de eventos desta natureza que tiveram grande impacto sobre o meio ambiente, destaca-se o derrame ocorrido em 1989, quando o navio petroleiro Exxon Valdez, com aproximadamente 300 m de comprimento e, que transportava expressivo

carregamento de óleo cru, chocou-se com um recife de coral nas proximidades da costa do Alasca. Deste superpetroleiro, que se tornou o maior desastre ecológico da história dos Estados Unidos, tornando-se uma referência na área da poluição ambiental, vazou para o oceano cerca de 35.500 toneladas do óleo, que atingiram a região de Prince William Sound e, se espalharam ao longo de 2.100 km de trecho da orla litorânea (Nixon e Michel, 2018). Este é considerado um dos piores incidentes de contaminação de petróleo bruto em ambientes marinhos. Devido ao impacto em uma região sensível e rica em biodiversidade, este também se tornou um dos desastres mais estudados da história. Decorridos 31 anos após este acidente, estudos que continuam a ser produzidos por órgãos do governo americano, e por instituições de pesquisa, comprovam que danos ambientais ainda persistem no Golfo do Alasca, principalmente na região de Prince William Sound. Estudos recentes mostraram que os resíduos de óleo não foram intemperizados e não foram biodegradados. Compostos tóxicos do derramamento do Exxon Valdez são encontrados em sedimentos e água duas décadas após o acidente (Lindeberg et al., 2018). Como um exemplo semelhante, Bociu et al. (2019) relatou a persistência de *tar balls* (“bolotas” de petróleo) originadas do acidente Deep Horizon enterrado nas areias do Golfo do México. A investigação experimental mostrou que a decomposição desses materiais, que inclui compostos tóxicos, levará pelo menos três décadas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Nesse sentido, esse estudo tem como objetivo estudar a persistência dos resíduos de hidrocarboneto (*tar residues*) em um setor da zona costeira de Pernambuco formado pelas praias do Paiva, de Itapuama e de Enseada dos Corais, após o evento de derramamento de óleo. Esta região está localizada no litoral do Cabo de Santo Agostinho, a zona mais impactada do Estado de Pernambuco. Esta área foi selecionada porque, neste pequeno setor de litoral com aproximadamente 7 km de extensão, existem exemplos de perfis deposicionais formados por diferentes substratos geológicos e restrições hidrodinâmicas representando sistemas costeiros encontrados no Nordeste do Brasil.

A presente pesquisa buscou definir a relação entre a geodiversidade do setor costeiro afetado pelo derramamento de óleo e o potencial que apresentam para a permanência de resíduos de hidrocarboneto. Geodiversidade é definida como “a extensão natural (diversidade) de características geológicas (rochas, minerais, fósseis), geomorfológicas (formas de relevo,

topografia, processos físicos), solo e características hidrológicas. Este conceito inclui seus conjuntos, estruturas, sistemas e contribuições para as paisagens” (Gray, 2013).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal da presente pesquisa foi analisar temporalmente a contaminação por óleo no litoral do município do Cabo de Santo Agostinho, com foco no controle e resposta exercida pela geodiversidade local no processo de permanência desse contaminante. A pesquisa foi desenvolvida a dos seguintes objetivos específicos:

- Observar a resposta da contaminação em relação aos tipos de substrato litológico em uma faixa do litoral do Cabo de Santo Agostinho – PE compreendida entre as praias do Paiva e Enseada dos Corais, que foram impactadas pelo derrame, através de mapeamento de superfície e coleta de sedimento raso de subsuperfície (praias arenosas, costões rochosos, superfícies duras como corais e arenitos de praia - *beachrocks*);
- Avaliar o efeito da contaminação por meio de análise de características macroscópicas e microscópicas nas praias arenosas, superfícies de *beachrocks* e nas superfícies rochosas (fraturas; juntas colunares; falhas; vesículas; estruturas de erosão diferencial, etc.) que compõem os sistemas praias da área de estudo;
- Elaborar um modelo esquemático de evolução da contaminação gerada pelo trabalho de monitoramento que resume o destino dos resíduos de óleo nas três praias estudadas em diferentes estágios temporais.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O trabalho foi dividido em seis capítulos: 1. Introdução; 2. Revisão Bibliográfica; 3. Caracterização da Área de Estudo; 4. Materiais e Métodos; 5. Resultados e Discussão; e 6. Conclusões e Sugestões para Futuras Pesquisas.

O primeiro capítulo apresenta na introdução um contexto geral em que se fazem alguns comentários ainda de forma bastante abrangente, tratando genericamente do tema da pesquisa, da sua importância, dos objetivos da pesquisa e estrutura da tese.

No segundo capítulo, será apresentado uma revisão da bibliografia, fazendo uma análise metódica e ampla de um determinado estudo de caso (derramamento de óleo do

Exxon Valdez), abordando os princípios teóricos e práticos que permitem a compreensão das técnicas e tecnologias desenvolvidas nesta tese de doutorado.

Já o terceiro capítulo tratará da caracterização da área de estudo. É apresentada a localização da área, além das principais características físicas, das configurações geológicas e da geodiversidade costeira.

Os materiais e métodos, tema do quarto capítulo, abordarão os procedimentos utilizados nas diferentes etapas do processo de monitoramento e da pesquisa em sua totalidade, os métodos, as técnicas e os processos adotados na pesquisa, principalmente no levantamento e processamento de dados quando na elaboração dos modelos digitais de encostas.

O quinto capítulo discorre sobre a apresentação dos resultados de forma objetiva. Também será realizada uma análise e discussão acerca do monitoramento temporal da área em questão.

As conclusões e sugestões para futuras pesquisas serão apresentadas no capítulo seis, e posteriormente serão apresentados os autores citados cujos trabalhos deram suporte à pesquisa.

2 DESASTRES CAUSADOS POR DERRAMAMENTO DE ÓLEO

2.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, são abordados os princípios teóricos e práticos que permitem a compreensão das técnicas e tecnologias desenvolvidas neste trabalho. É descrito o derramamento de óleo do Exxon Valdez (Exxon Valdez Oil Spill - EVOS), amplamente considerado o derramamento número um em todo o mundo em termos de danos ao meio ambiente, o seu aprendizado / legado, além dos recursos ao longo do tempo, motivando os estudos que continuam a serem financiados e produzidos por órgãos do governo americano, e por instituições de pesquisa, comprovando que o óleo derramado ainda persiste no Golfo do Alaska após 31 anos.

2.2 DERRAMAMENTO DE ÓLEO DO EXXON VALDEZ (EXXON VALDEZ OIL SPILL - EVOS)

O Exxon Valdez partiu do Terminal de Oleodutos de Alyeska em Valdez, Alasca, na noite de quinta-feira, 23 de março de 1989. Construído em 1986, o navio-tanque de aproximadamente 300 metros foi carregado com pouco menos de 1,3 milhões de barris (cerca de 204 milhões de litros) de petróleo bruto *North Slope* e foi encaminhado para Long Beach, Califórnia. Logo após a meia-noite de 24 de março de 1989, o navio se chocou e encalhou no *Bligh Reef*, a sudoeste de Valdez (Shigenaka, 2014). O acidente resultou na liberação de pelo menos 35.500 toneladas (t) de petróleo, que era apenas 20% de toda a carga. Pelo menos 40 milhões de litros de óleo se deslocaram para sudoeste de Prince William Sound (PWS), com quantidades significativas escapando e contaminando as penínsulas do Alaska e de Kenai e o Arquipélago Kodiak (Wolfe et al., 1994).

É importante ressaltar que a embarcação não estava sob o comando do seu capitão no momento da colisão. Estava nas mãos de seu subordinado, que não tinha habilitação para conduzir embarcações naquele ambiente. Com a força do choque na formação rochosa, o Exxon Valdez acabou rompendo oito de onze tanques de carga e dois tanques de água de lastro, bem como o porão do pique de proa. Ficou temporariamente imobilizado no local,

carregado com a maior parte de sua carga, apesar da perda de uma grande quantidade de óleo cru (Figura 4).

Figura 4 - O Exxon Valdez encalhou no *Bligh Reef*, em Prince William Sound, Alasca, tornando-se o maior vazamento de petróleo em águas dos EUA na época.



Fonte: Shigenaka, 2014.

Os planos para a transferência da carga restante começaram quase imediatamente. O navio-tanque Exxon Baton Rouge foi o primeiro a ser enviado para ser o navio receptor do óleo, começando a operação na manhã de 25 de março (Figura 5). No dia 29 de março, o Exxon Baton Rouge atingiu sua capacidade máxima e o Exxon San Francisco ocupou seu lugar até 2 de abril, seguido pelo Exxon Baytown, totalizando a remoção de aproximadamente 1 milhão de barris (163 milhões de litros) de petróleo bruto. Entretanto, estima-se que 16.500 barris (2,6 milhões de litros) permaneceram a bordo (Shigenaka, 2014).

Ainda segundo Shigenaka (2014), O óleo acabaria se estendendo por aproximadamente 1.100 km através de Prince William Sound, descendo para a Península do Alasca, e a maior operação de limpeza de derramamento da história chegaria a um pico

estimado de 10.000 trabalhadores, 1.000 navios, 100 aeronaves e helicópteros, e se estenderia por quatro anos. A Exxon gastou por volta de 2,1 bilhões de dólares, além de sérias consequências negativas com a imagem da empresa.

Figura 5 - Exxon Valdez transferindo parte do óleo remanescente para o Exxon Baton Rouge, na manhã do dia 25 de março.



Fonte: Shigenaka, 2014.

Apesar da escala, duração e custo sem precedentes de resposta ao desastre, a modelagem do destino do óleo derramado feita pela *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* e por outros cientistas estimou que a própria limpeza removeu apenas uma pequena parte (pouco mais de 10%) do óleo derramado para o meio ambiente. De longe, a maior parte do total foi naturalmente degradada (Shigenaka, 2014).

Embora o *Exxon Valdez Oil Spill (EVOS)* ainda seja o maior desastre ambiental envolvendo derramamento de óleo nas águas dos Estados Unidos na época, ele encontra-se em 36º lugar no ranking dos maiores acidentes (derramamento de óleo) da história publicada pela *International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF)* em 2019, conforme

a Tabela 1. Porém, é amplamente considerado o derramamento número um em todo o mundo em termos de danos ao meio ambiente. O momento do derramamento, a localização remota, os milhares de quilômetros de costa litorânea, e a abundância de vida selvagem na região combinaram para torná-lo um desastre ambiental muito além do escopo de outros derramamentos, segundo o *Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council (EVOSTC)*.

Tabela 1 - Maiores derramamentos de óleo da história.

Position	Shipname	Year	Location	Spill size (tonnes)
1	ATLANTIC EMPRESS	1979	Off Tobago, West Indies	287,000
2	ABT SUMMER	1991	700 nautical miles off Angola	260,000
3	CASTILLO DE BELLVER	1983	Off Saldanha Bay, South Africa	252,000
4	AMOCO CADIZ	1978	Off Brittany, France	223,000
5	HAVEN	1991	Genoa, Italy	144,000
6	ODYSSEY	1988	700 nautical miles off Nova Scotia, Canada	132,000
7	TORREY CANYON	1967	Scilly Isles, UK	119,000
8	SEA STAR	1972	Gulf of Oman	115,000
9	SANCHI*	2018	Off Shanghai, China	113,000
10	IRENES SERENADE	1980	Navarino Bay, Greece	100,000
11	URQUIOLA	1976	La Coruna, Spain	100,000
12	HAWAIIAN PATRIOT	1977	300 nautical miles off Honolulu	95,000
13	INDEPENDENTA	1979	Bosphorus, Turkey	95,000
14	JAKOB MAERSK	1975	Oporto, Portugal	88,000
15	BRAER	1993	Shetland Islands, UK	85,000
16	AEGEAN SEA	1992	La Coruna, Spain	74,000
17	SEA EMPRESS	1996	Milford Haven, UK	72,000
18	KHARK 5	1989	120 nautical miles off Atlantic coast of Morocco	70,000
19	NOVA	1985	Off Kharg Island, Gulf of Iran	70,000
20	KATINA P	1992	Off Maputo, Mozambique	67,000
21	PRESTIGE ⁺	2002	Off Galicia, Spain	63,000
36	EXXON VALDEZ ⁺	1989	Prince William Sound, Alaska, USA	37,000

Fonte: ITOPF, 2019.

* Único derramamento de óleo não persistente

+ Incluído para comparação

Porém, é difícil avaliar e transmitir os impactos de um derramamento de óleo. Alguns efeitos são óbvios: um pássaro coberto de óleo lutando na costa, uma tartaruga marinha atolada em óleo flutuante espesso em uma zona de convergência offshore. Uma medida facilmente compreensível do impacto biológico é o número de animais mortos associados a um derramamento, e não há dúvida de que o EVOS teve profundos efeitos letais em vários recursos vivos na área do derramamento (Figura 6). Mas mesmo essa métrica não é tão direta

quanto se poderia esperar, conforme observado pela seguinte pergunta frequente do EVOSTC:

“Quantos animais morreram imediatamente com o derramamento de óleo? Ninguém sabe. As carcaças de mais de 35.000 pássaros e 1.000 lontras marinhas foram encontradas após o derramamento, mas como a maioria das carcaças afunda, isso é considerado uma pequena fração do número real de mortos. As melhores estimativas são: 250.000 aves marinhas, 2.800 lontras marinhas, 300 focas, 250 águias americanas, 22 baleias orcas e bilhões de ovos de salmão e arenque ”.

Figura 6 - Fotos de pássaros encharcados de óleo e outros animais selvagens reforçaram o quão inadequadas eram as leis existentes na prevenção ou tratamento do EVOS.



Fonte: EVOSTC.

2.2.1 O aprendizado / legado do Exxon Valdez Oil Spill (EVOS)

A maior parte dos derramamentos de óleo acontecia devido ao uso de navios de casco simples (o Exxon Valdez era um navio de casco simples). Hoje, os petroleiros de casco único estão proibidos de utilizar os portos dos Estados Unidos, enquanto países como França e Espanha não permitem que eles se aproximem a menos de 320 quilômetros de suas linhas costeiras.

Embora não haja dúvida de que o EVOS foi um incidente infeliz e, de certa forma, trágico, também é claro que ele forneceu um impulso necessário para reexaminar o estado de prevenção, resposta e limpeza do derramamento de óleo.

Muitas lições foram aprendidas após o EVOS, dentre elas, as duas mais óbvias foram: os Estados Unidos não tinham recursos adequados, principalmente fundos federais, para responder a derramamentos, e o escopo dos danos indenizáveis de acordo com a lei federal para aqueles afetados por um derramamento era bastante restrito. Embora os danos ambientais e os esforços de limpeza massivos tenham sido os efeitos mais visíveis desse acidente, um dos resultados mais importantes foi a promulgação da lei *Oil Pollution Act of 1990 (OPA 90)*, aprovada em 18 de agosto de 1990 pelo Congresso dos Estados Unidos e assinada pelo Presidente George H. W. Bush, determinando a responsabilidade por danos fiscais e pelo trabalho de limpeza do infrator. O objetivo da OPA 90 foi justamente minimizar as baixas marinhas e derramamentos de óleo, abordando aspectos preventivos, protetores, dissuasivos e de desempenho de derramamentos acidentais de óleo, e exigir às companhias de petróleo a elaboração de planos de contingência para evitar derrames futuros e contê-los caso ocorresse um vazamento. O braço de vários regulamentos, como petroleiros de casco duplo e planos de resposta a navios, estendido tanto a navios-tanque de bandeira dos Estados Unidos, quanto de bandeira estrangeira. (Ketkar, 2002).

Já em julho de 1989, uma conferência das principais nações industrializadas apelou à *International Maritime Organization (IMO)* para desenvolver medidas para prevenir a poluição por navios. Foi preparada então uma convenção para a organização de uma nova resolução para o estabelecimento de mecanismos de cooperação internacional à altura dos grandes derramamentos de óleo. Tal convenção, denominada *International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation (OPRC)* foi estabelecida pela IMO em

30 de novembro de 1990 (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 1991). Os principais aspectos estabelecidos na OPRC foram:

- Os navios devem ser providos de manual de instruções para os procedimentos de emergência, visando prevenir a poluição por óleo;
- A notificação dos acidentes deve ser feita rapidamente às autoridades dos países envolvidos, de acordo com os procedimentos estipulados na convenção;
- Cada país deve estabelecer um sistema nacional de respostas aos acidentes e um sistema internacional, contemplando a cooperação de dois ou três países, se necessário;
- Os países podem solicitar a cooperação internacional quando os acidentes ocorrerem, devendo também promover a cooperação nas áreas de pesquisas relacionadas com a prevenção da poluição por óleo;
- A IMO deve prover informação, educação, treinamento e serviços de consultoria internacional durante os acidentes.

2.2.2 Os recursos usados pelo Exxon Valdez Oil Spill (EVOS)

A catástrofe também criou o Fundo Fiduciário de responsabilidade do derramamento de petróleo para ajudar a pagar a limpeza de futuros desastres, concedendo em até 1 bilhão de dólares por acidente.

Em 1991, o Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council (EVOSTC) foi criado para restaurar Prince William Sound e o Golfo do Alasca ao "ecossistema saudável, produtivo e mundialmente conhecido" que existia antes do derramamento de óleo. Centenas de projetos de pesquisa, monitoramento e restauração em geral foram concluídos, resultando em um salto no conhecimento sobre o meio ambiente marinho, estabelecendo informações básicas para muitas espécies que não estavam disponíveis antes do derramamento, bem como melhorias significativas para avaliações das populações de espécies feridas.

Já em 1994, o EVOSTC aprovou uma lista de recursos e serviços feridos pelo Exxon Valdez Oil Spill (EVOS), objetivando servir a três propósitos principais no Programa de Restauração:

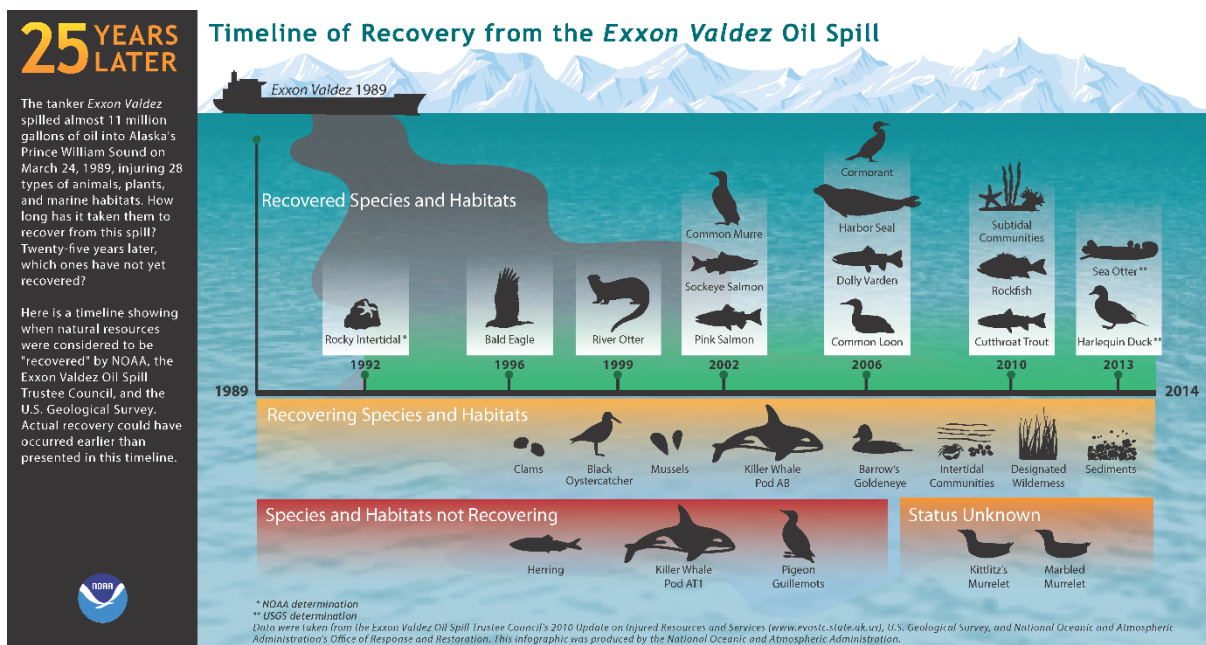
- I. Danos causados pelos recursos naturais e serviços humanos causados pelos esforços de derramamento e limpeza do óleo;
- II. Orientação para o gasto dos fundos de restauração pública nos termos do Plano de Restauração, garantindo que o dinheiro fosse gasto com recursos que precisavam de atenção;
- III. Monitorar a recuperação das funções ecológicas e dos serviços humanos que dependem desses recursos.

Reconhecendo que o financiamento para restauração futura era limitado e que estava se tornando cada vez mais difícil distinguir entre os impactos do derramamento e outros efeitos na medição da recuperação, os esforços do EVOSTC focaram em fazer uma transição organizada e estratégica para um programa modesto, concentrando os fundos restantes em alguns programas específicos:

- ✓ Pesquisa e monitoramento a longo prazo do arenque;
- ✓ Pesquisa e monitoramento do óleo persistente;
- ✓ Monitoramento a longo prazo das condições marinhas;

O EVOSTC também reconheceu que a gestão de longo prazo das espécies e dos recursos inicialmente prejudicados pelo derramamento couberam aos órgãos e entidades que tiveram o mandato e recursos para perseguir essas metas de longo prazo. A Figura 7 mostra uma linha do tempo dos recursos naturais que foram recuperados, conforme determinado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), com dados extraídos de uma atualização do próprio *Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council* (EVOSTC) e do *United States Geological Survey* (USGS).

Figura 7 - Linha do tempo de recuperação do EVOS, após 25 anos.



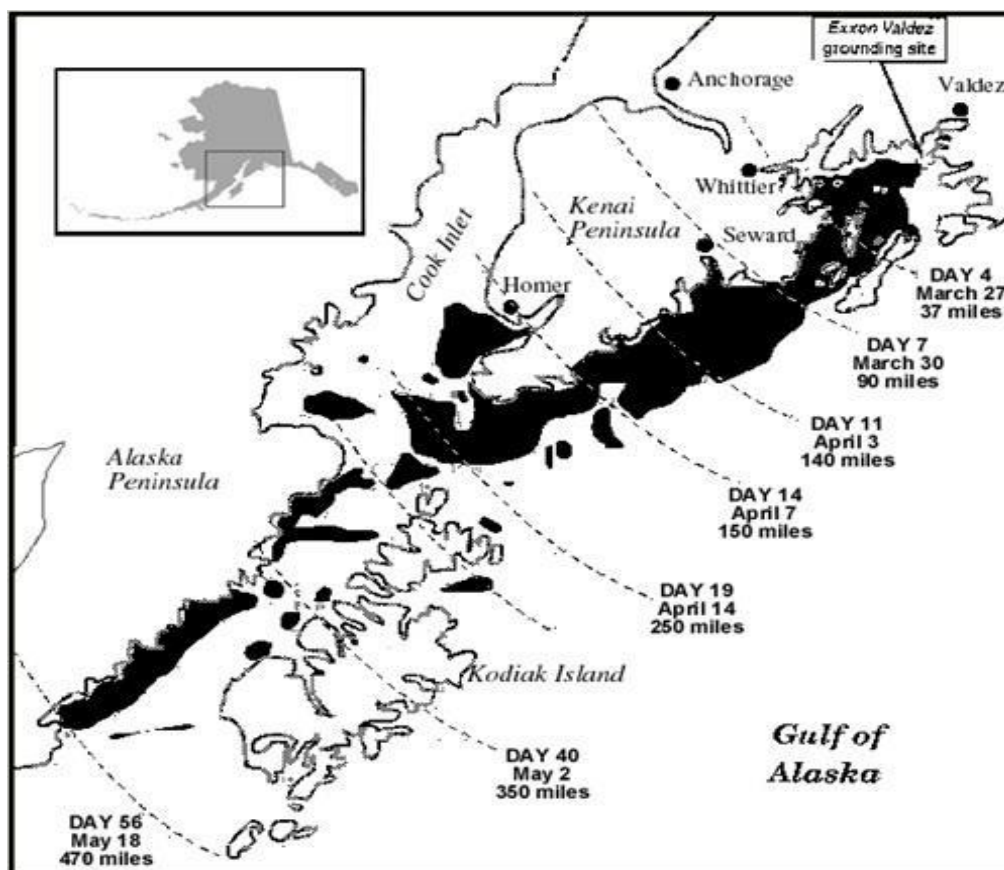
Fonte: NOAA.

2.2.3 Persistência do óleo ao longo do tempo

Após o derramamento de aproximadamente 42 milhões de litros de petróleo bruto do Exxon Valdez, operações de limpeza realizadas entre 1989 e 1991 e processos naturais foram previstos para remover o óleo. Na época do incidente, ventos, tempestades e correntes marítimas espalharam o petróleo por mais de 2.100 km da costa, desde o local do encalhamento do navio, em Prince William Sound, até o Golfo do Alasca (Figura 8).

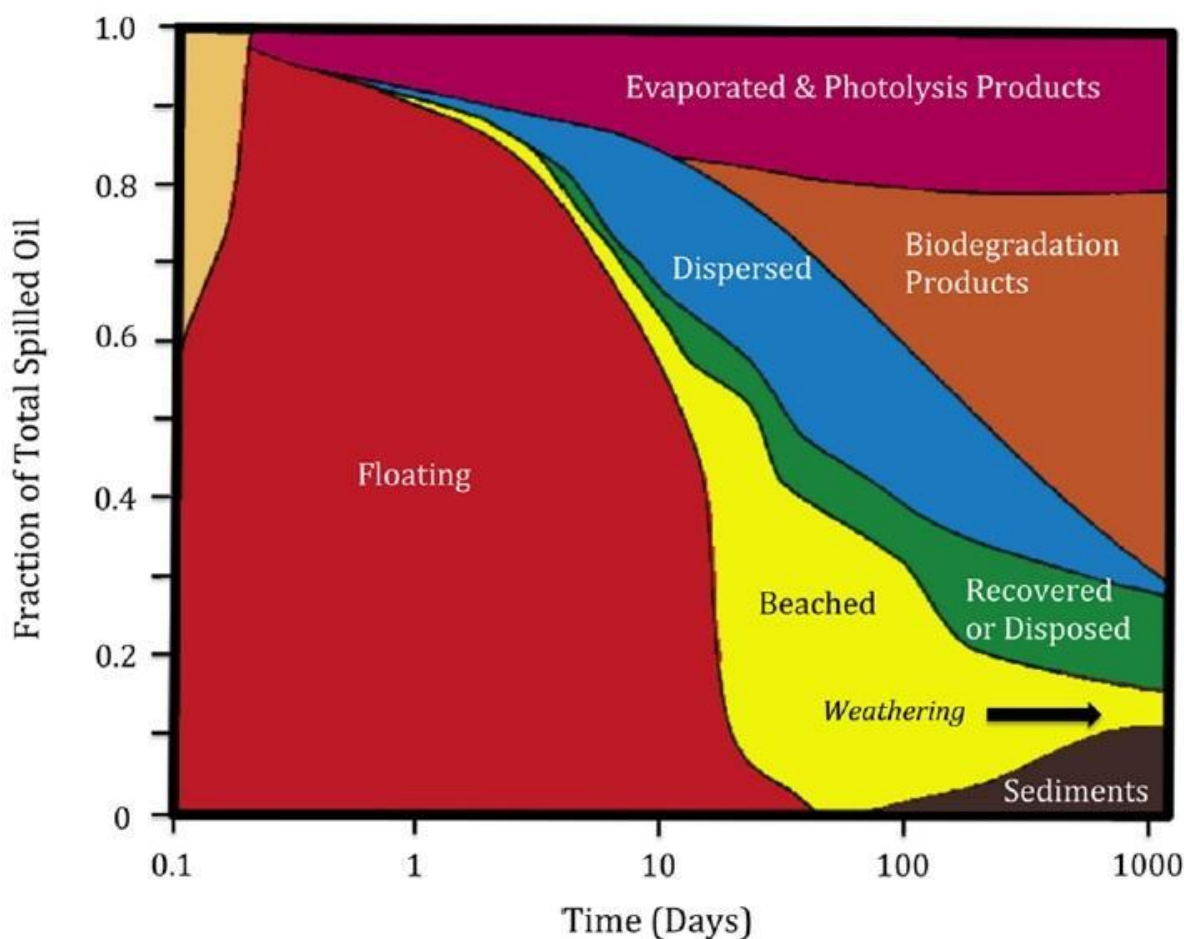
Embora uma proporção significativa do óleo derramado tenha sido detido ao longo das margens de Prince William Sound e do Golfo do Alasca, em 1992 esperava-se que a grande maioria desse petróleo tivesse sido removido por processos naturais e operações de limpeza, e o restante logo seria reduzido a quantidades insignificantes (Wolfe et al., 1994; Neff et al., 1995). Wolfe et al., 1994, modelaram o destino do óleo do Exxon Valdez derramado com o tempo, mostrando uma proporção relativamente pequena recuperada pela limpeza após 1000 dias (Figura 9).

Figura 8 - Espalhamento do petróleo após o aterramento do Exxon Valdez.



Fonte: EVOSTC.

Figura 9 - Destino geral do óleo do Exxon Valdez.



Fonte: Wolfe et al., 1994.

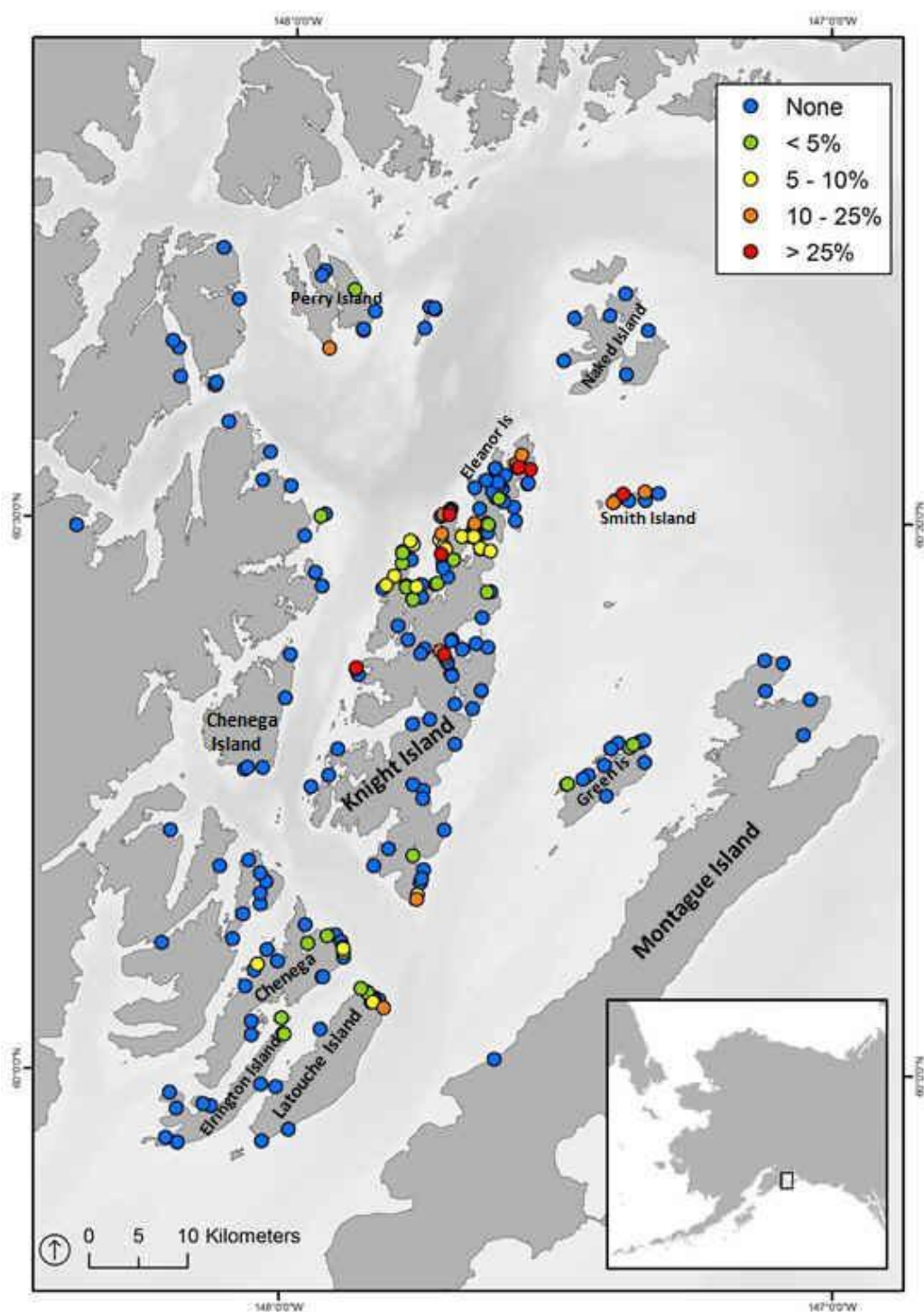
Em 1997, no entanto, era evidente que uma quantidade significativa de petróleo tinha permanecido. 10 anos após o derramamento de óleo, a maioria das praias pareciam limpas na superfície, embora ocasionalmente bolas de piche ou resíduos de óleo endurecidos pudessem ser encontrados em alguns lugares (Hayes e Michel, 1999). Porém, esperava-se que a quantidade do óleo diminuísse ao longo do tempo e, mais importante, tivesse perdido sua toxicidade devido ao intemperismo. Nem sempre foi assim, e uma série de pesquisas financiadas pelo Conselho continuou a localizar, identificar e aumentar ainda mais a compreensão da persistência e toxicidade do óleo (Short et al., 2004, 2006, 2007; Irvine et al. 2006, 2014; Li e Boufadel, 2010; Nixon et al. 2013).

Estudos documentaram que o óleo persistente ocorre em manchas descontínuas na subsuperfície, em profundidades médias de 5 a 7 polegadas. Estima-se que restam aproximadamente 87.000 litros de petróleo, 0,2% do volume inicial do derramamento. A Figura 10 mostra onde o petróleo foi localizado em poços cavados na subsuperfície de algumas das ilhas de Príncipe William Sound durante as pesquisas de campo de 2001, 2003 e 2007. Locais marcados em vermelho são segmentos costeiros onde mais de 25% dos poços encontraram óleo, pontos laranjas marcam onde 10 a 25% dos poços encontraram óleo, pontos amarelos são onde 5 a 10% dos poços encontraram óleo, pontos verdes são onde 1 a 5% dos poços encontraram óleo, e pontos azuis indicam locais onde nenhum óleo foi encontrado.

Michel et al. (2010) estimaram a área total e a massa de óleo por categorias de oleosidade para a mesma área que Short et al. (2004) utilizaram em seus cálculos. Uma comparação mostra que há um acordo muito bom entre as duas abordagens. O vazamento do Exxon Valdez liberou 40,8 milhões de litros de petróleo bruto, que se converteram em 39.560 toneladas. Assim, a estimativa de Michel et al. (2010) de qualquer óleo subsuperficial no Prince William Sound a partir do período de 2001-2007 representa 0,25% do derramamento total, a estimativa para áreas com resíduos levemente oleados representa 0,09% do derramamento total, a estimativa para áreas com resíduos de óleo médio representa 0,08% do derramamento total, e a estimativa para áreas de resíduos altamente oleosos representa 0,07% do volume total de derramamentos.

Carls et al. (2016) re-amostraram 6 segmentos em Prince William Sound em 2015, usando os mesmos métodos de Short et al. (2004) em 2001. Eles cavaram 400 poços nesses seis segmentos e descobriram que não houve essencialmente nenhuma mudança no percentual de poços que foram lubrificados e, portanto, nenhuma mudança significativa na área total estimada com oleosidade subsuperficial em cada local. Os autores também não relataram diferenças significativas na massa média de óleo subsuperficial por unidade para áreas relatadas por Short et al. (2004) como tendo resíduos leves, médios ou fortemente oleados.

Figura 10 - Localização de poços cavados na subsuperfície e a porcentagem desses poços com oleosidade em algumas ilhas de Prince William Sound nas pesquisas realizadas em 2001, 2003 e 2007.



Fonte: EVOSTC.

Embora esta investigação fosse mais limitada em localização e escopo, esses resultados implicam que havia pouca mudança contínua na quantidade de óleo subsuperficial em Prince William Sound no momento. Simultaneamente, a demora ou falta de recuperação de algumas espécies de recursos de preocupação e uso de subsistência (Michel et al., 2016) levou a preocupações sobre possíveis impactos contínuos do óleo persistente. A Figura 11 mostra as localizações gerais das zonas intermarés superior, média e inferior em Smith Island. Esta é uma vista típica de uma das praias oleadas, blindada com paralelepípedos, com óleo em profundidade. O óleo encontrado em poços cavados na subsuperfície em PWS foi mais frequentemente encontrado, 75% das vezes, na zona de intermaré média, 18% na zona de intermaré superior, e 7% na zona de intermaré inferior (Michel et al., 2016).

Figura 11 - Fotografia aérea na costa norte de *Smith Island* mostrando as localizações aproximadas gerais dessas zonas de marés.



Fonte: Michel et al., 2016.

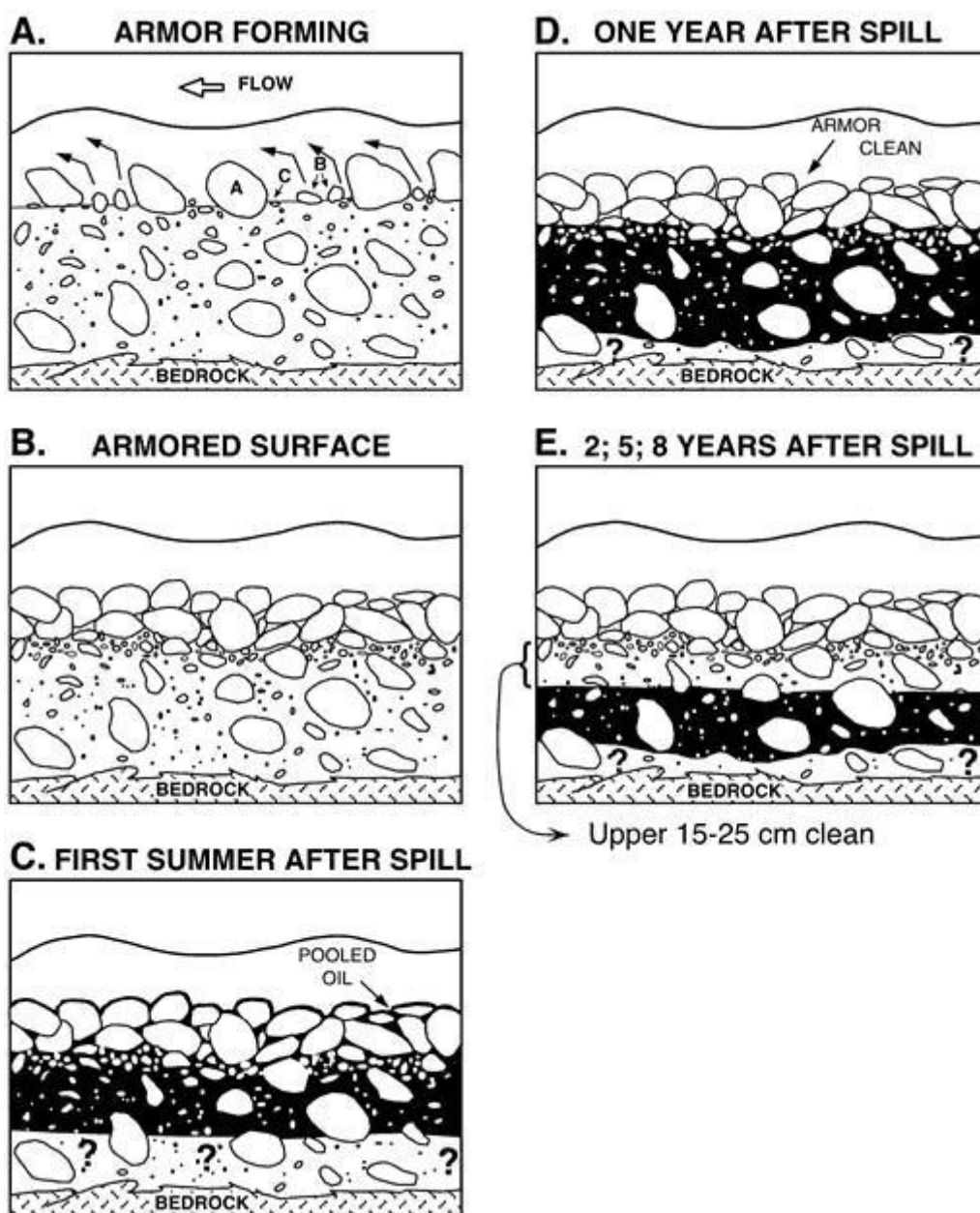
Após revisões de todos os segmentos de praia estudados entre 2001 e 2008, ficou claro que a presença e ausência de óleo subsuperficial persistente estava sendo influenciada por uma série de fatores. O grau inicial de oleosidade é uma influência muito importante na presença de óleo persistente, pois quanto mais pesado a oleosidade, mais profundo o óleo penetraria na subsuperfície, que ocorreu apenas onde o litoral era permeável. A baixa

exposição à ação de ondas desacelerou a reformulação natural dos sedimentos oleados. A importância da "blindagem", onde os cascalhos mais finos na superfície da praia são transportados por ondas, deixando uma camada de cascalho grosseiro na superfície que é muito estável, foi uma nova descoberta após o derramamento (Hayes et al. 2010). Praias blindadas de cascalho ocorrem em Prince William Sound por causa da grande variedade de tamanhos do cascalho e das variações na energia das ondas (Figura 12). Além disso, a robustez da linha de costa cria afloramentos rochosos intermarés e próximos à costa que atuam como quebra-mares naturais, criando habitats micro protegidos e dobrando as ondas de forma a acumular sedimentos atrás deles. Acúmulos de rochas do tamanho de pedregulhos, ao longo de baías protegidas, fornecem sedimentos semipermeáveis com energia das ondas muito limitada (Michel et al. 2010).

Nixon et al. (2013), publicaram dados sobre oleosidade e características geomórficas que foram coletados em 198 locais em Prince William Sound para identificar e quantificar os fatores geomórficos que controlam a presença ou ausência de óleo subsuperficial (SSO). Exposição inicial ao óleo mais pesado, permeabilidade dos substratos, inclinação topográfica, baixa exposição a ondas, blindagem em praias de cascalho, tómbolos, quebra-mares naturais e acúmulos de pedregulhos foram geomórficos associados à presença de óleo subterrâneo. No que se refere aos fatores geomórficos associados à ausência de óleo subsuperficial, destacam-se: rochas impermeáveis; plataformas com revestimento de sedimentos finos; praias de cascalho bem classificadas e de granulação fina, sem blindagem de superfície ou quebra-mares naturais; praias de fundo da baía elevado e baixa permeabilidade (Tabela 2).

Foram encontradas relações entre as características geomórficas e físicas do local e a probabilidade de encontrar oleosidade subsuperficial persistente nesses locais, reforçando a ideia de que as interações entre permeabilidade, estabilidade e exposição a ondas específicas desses locais são os principais fatores para a persistência do óleo subsuperficial em praias de cascalho misto expostas e em ambientes costeiros rochosos.

Figura 12. Seção transversal ilustrando o desenvolvimento de uma "superfície blindada" de uma praia de cascalho e o processo de soterramento que continua a preservar manchas de óleo subterrâneo.



Fonte: Michel et al., 2010.

Tabela 2 - Maiores derramamentos de óleo da história.

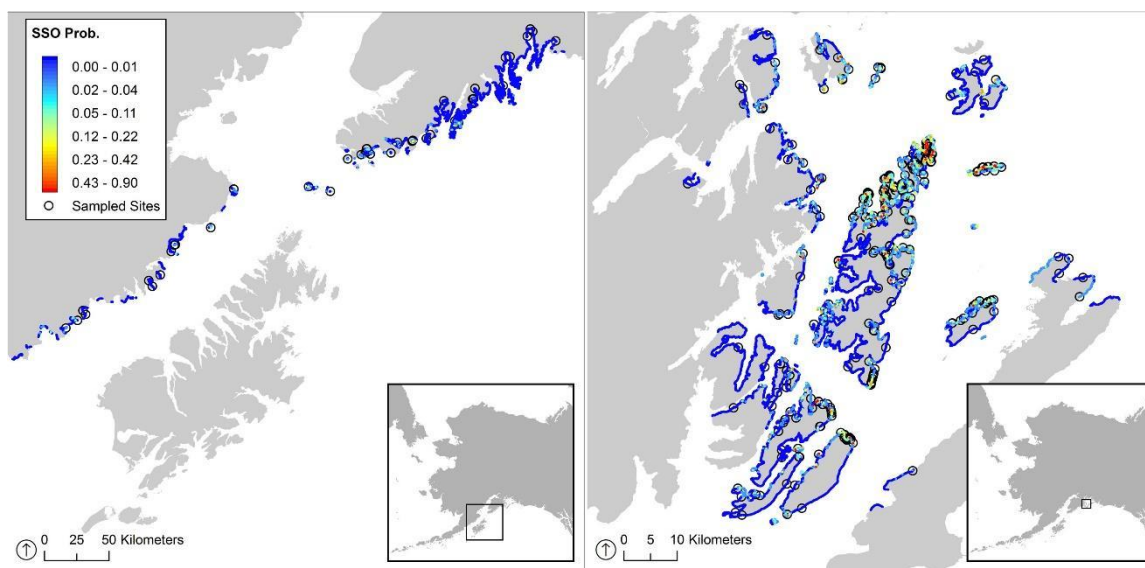
Type	Factor	Factor Is Present		Factor Is Absent	
		Heavy SSO	No Heavy SSO	Heavy SSO	No Heavy SSO
Potential increased likelihood of subsurface oil persistence	Initial heavier oil exposure	34	119	1	44
	Armoring	16	8	18	111
	Tombolo	3	0	31	119
	Natural breakwater	14	12	20	107
	Rubble accumulations	10	8	24	111
	Transitional edge effects	7	11	27	108
Potential decreased likelihood of subsurface oil persistence	Impermeable intertidal zone	0	35	34	84
	Rock platforms with thin sediment veneers	0	22	34	97
	Fine-grained, well-sorted gravel beaches with no surface armor or natural breakwaters	2	24	32	95
	Low-permeability, raised bay-bottom beaches	1	10	33	109
	Stream mouth proximity or groundwater flow	3	12	31	107

Fonte: Nixon et al. (2013).

Uma revisão da quantidade e distribuição de óleo subsuperficial persistente do Exxon Valdez Oil Spill foi feita por Nixon e Michel (2018), descrevendo os mecanismos geomórficos e físicos que contribuem para a persistência do petróleo nos sedimentos subsuperficiais ao longo das linhas costeiras geologicamente complexas e especialmente extensas de Prince William Sound e do Golfo do Alasca. Os resultados do modelo revisado são semelhantes aos de Nixon e Michel (2015), indicando que o modelo é um forte preditivo de onde o óleo poderia ser encontrado e produz estimativas bem calibradas dessa probabilidade de encontro. O óleo subsuperficial (SSO) previsto pelo modelo encontra probabilidade em 2545 km de zona costeira na extensão modelada (Figura 13).

Os mecanismos que contribuem para a persistência contínua do óleo estão diretamente relacionados à geologia e à geomorfologia costeira do sul do Alasca. Esses resíduos de óleo subsuperficial remanescente, geralmente entre 5 e 20 cm de espessura e soterrados abaixo de 10-20 cm de sedimentos limpos, estão presentes mais de 300 mil m² de zona de intermaré, ao longo de 11,4 km de costa, e representam aproximadamente 227 t ou 0,6% da massa total do óleo originalmente derramado. No entanto, a persistência à longo prazo, mesmo de pequenas quantidades de óleo, é biologicamente significativa para espécies em extinção (Nixon e Michel, 2018).

Figura 13 - Resultados indicando que o modelo é um forte preditivo de onde o óleo poderia ser encontrado.



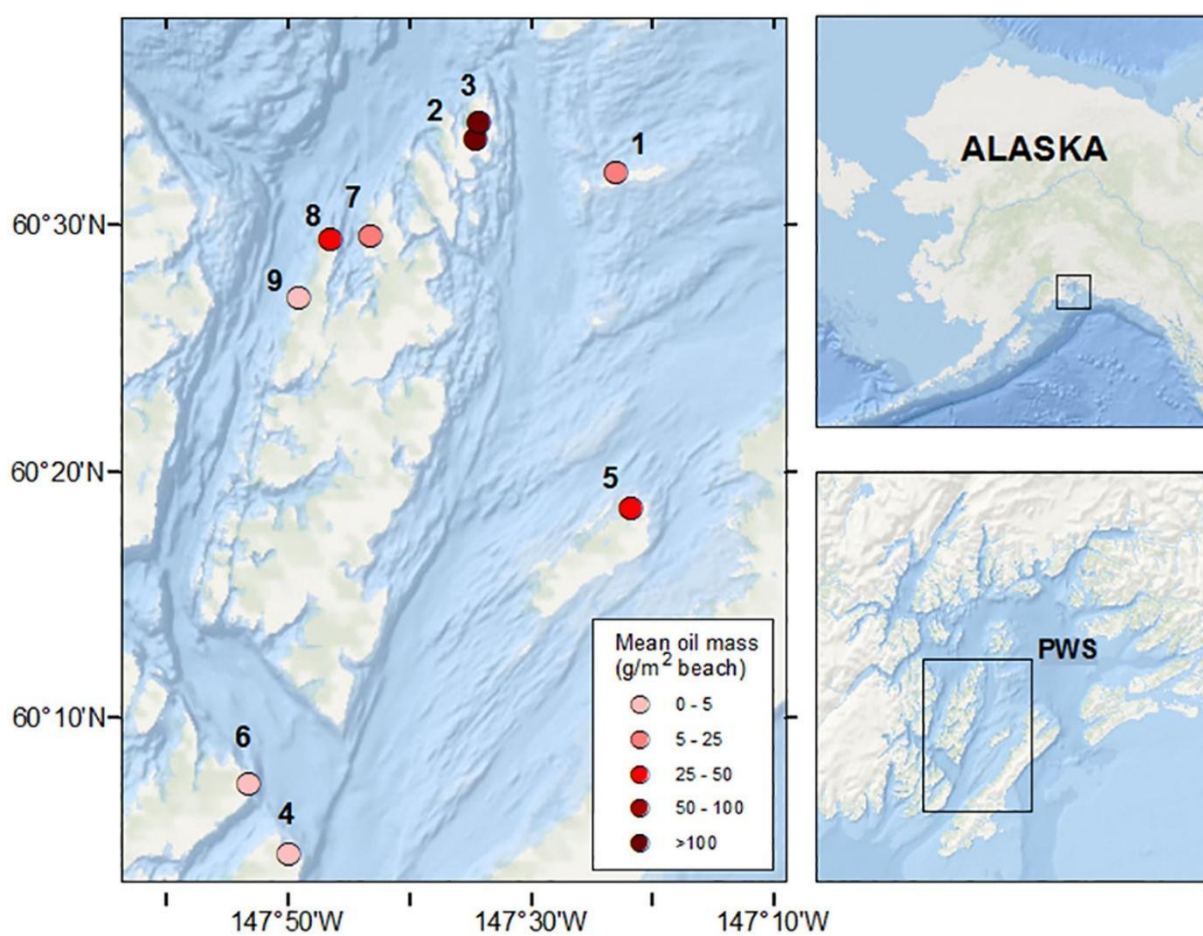
Fonte: Nixon e Michel, 2018.

Lindeberg et al. (2018) apresentaram descobertas de uma pesquisa sobre a persistência do óleo, realizada durante o verão de 2015 em um pequeno conjunto de praias em Prince William Sound conhecido por ter um óleo subsuperficial persistente decorrente do Exxon Valdez (Figura 14). Os objetivos da pesquisa foram estimar quanto de óleo ainda permanece nesses locais, além da composição e das taxas de retenção desse óleo em comparação com estudos anteriores. Os resultados da pesquisa constataram que o óleo remanescente estava presente em 8 dos 9 locais que foram revisitados, revelando poucas evidências de mudança na distribuição da intensidade do óleo ou sua localização na praia nos últimos 14 anos.

O óleo subsuperficial coletado em 2015 indicou que ele manteve algum potencial tóxico nas últimas duas décadas, porém não havendo biodisponibilidade atualmente. Esse óleo subsuperficial pareceu estar preso em sedimentos, ficando protegido de lavagens hidrológicas e dos baixos níveis de oxigênio e nutrientes que inibem a biodegradação. Essas descobertas são consistentes com pesquisas anteriores (Nixon e Michel, 2018) e modelos geomórficos preditivos que sugerem um valor de 0,6% da massa total do óleo que foi derramado. Portanto, a menos que esse óleo subsuperficial seja “perturbado”, ele provavelmente persistirá no meio ambiente por décadas, deixando claro que as alegações feitas de que as praias se limpariam

após o derramamento de óleo (Boehm et al., 1995, Page et al., 1995) foram excessivamente otimistas (Lindeberg et al., 2018).

Figura 14 - Locais pesquisados para o óleo subsuperficial persistente em Prince William Sound, Alasca.



Fonte: Lindeberg et al., 2018.

2.3 PRINCIPAIS DESASTRES CAUSADOS POR DERRAMAMENTO DE ÓLEO NO BRASIL E O MARCO REGULATÓRIO - LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

A indústria de petróleo e gás natural brasileira já passou por uma série de incidentes das mais variadas tipologias, aspectos e impactos socioambientais. Cada acidente é completamente distinto entre si, no que se refere às instalações, a magnitude dos eventos e os seus respectivos impactos socioambientais (Naspolini, 2018).

A seguir, serão destacados três acidentes ocorridos em águas nacionais: o derramamento de petróleo em área de alta sensibilidade ambiental ocorrido no oleoduto da Baía de Guanabara em 2000; o afundamento da P-36 em 2001, acidente decorrente de falha dos processos de segurança operacional e com o maior número de vítimas já registrada no E&P offshore (ambos da Petrobrás); e os incidentes no Campo de Frade (2011 e 2012), referentes as atividades de perfuração de poços em águas profundas, operado pela Chevron.

2.3.1 Vazamento do duto PE-II na Baía de Guanabara

No dia 18 de janeiro de 2000, ocorreu um vazamento de aproximadamente 1,3 milhões de litros de óleo combustível devido a uma fratura no duto de PE-II, o mesmo do acidente de 10 de março de 1997 (cujo derramamento foi de 3 milhões de litros de óleo combustível), que interliga a REDUC, no município de Duque de Caxias, às instalações dos Dutos e Terminais do Sudeste-DTSE/ Ilha D'Água, na faixa de transição entre o mar e a costa. O fato ocorreu na parte enterrada do duto localizado na saída da área da REDUC, na orla da Baía de Guanabara (MMA; CONAMA, 2001).

A causa mais provável da fratura é que tenha ocorrido um deslocamento do duto provocado pela combinação dos seguintes fatores: esforços de expansão térmica, desalinhamento de tramas do tubo no plano horizontal e a pouca cobertura com baixa coesão do solo de enchimento da vala, constatada no próprio local do acidente. A detecção da anormalidade não foi realizada na velocidade adequada, possibilitando a ampliação da quantidade vazada. Houve falhas no projeto, na construção e na montagem do duto PE-II, falhas nos procedimentos gerenciais, operacionais e de manutenção, de segurança industrial e de meio ambiente por parte da Petrobras (MMA; CONAMA, 2001).

As evidências do impacto ambiental decorrente do vazamento são incontestáveis e tiveram uma repercussão muito forte junto à opinião pública e às autoridades ambientais do País e foi amplamente divulgado pela mídia nacional, pois a capacidade de detecção da falha e de resposta ao acidente foi muito demorada, fato que propiciou que o óleo vazado fosse dispersado pelas correntes e fluxo da maré causando o que foi considerado o maior desastre ecológico da Baía de Guanabara (MMA; CONAMA, 2001).

A maioria do óleo derramado, transportada por correntes de maré e vento, atingiu as praias e algumas ilhas na parte norte e nordeste da baía. Além disso, mangues nas vizinhanças do ponto de vazamento foram afetados. Estima-se que 21% do óleo foi perdido por evaporação 3 dias após o derramamento. Houve uma resposta extensiva para a retirada do óleo na água e limpeza da costa (Garbado et al., 2001).

De acordo com os pescadores entrevistados por (Peike, 2006), o impacto mais grave do derramamento de óleo foi a redução da demanda por peixe no mercado. Mesmo que os peixes reaparecessem logo após o desastre, a grande atenção dada pela mídia fez as pessoas terem medo de comprar peixes provenientes da baía. A falta de demanda do mercado, no entanto, não afetou apenas os pescadores artesanais. Os arrastões industriais e os barcos de maior porte também sofreram com a diminuição da procura no mercado (Peike, 2006).

Os trabalhadores que dependiam do turismo como fonte de renda e que ficaram impedidos de desenvolverem suas atividades rotineiras, foram contratados pela Petrobrás para auxiliar nas atividades de limpeza. Os comerciantes, principalmente de restaurantes, do entorno da Baía de Guanabara, tiveram prejuízos consideráveis pela redução dos turistas na região. Outro impacto negativo foi a impregnação por óleo, do cais da Companhia Imperial de Navegação a Vapor e da Estrada de Ferro de Petrópolis, primeira estação de trem do país, inaugurada em abril de 1854, no município de Mauá (MMA; CONAMA, 2001).

Com o acidente, as áreas turísticas mais afetadas foram as Ilhas do Governador e de Paquetá, as praias de Mauá localizadas no município de Magé e a Área de Preservação Ambiental de Guapimirim – APA de Guapimirim. No caso do transporte aquaviário, acredita-se que o óleo derramado tenha causado aos usuários das barcas um sentimento de mal-estar em função do aspecto visual e/ou do odor produzido e, conseqüentemente, provocado alteração no número de passageiros (Monteiro, 2003).

2.3.2 Explosão e colapso da P-36 na Bacia de Campos

A plataforma de produção P-36 encontrava-se operando no Campo de Roncador, na Bacia de Campos, em lâminas d'água de 1.500 a 1.900 metros. O acidente com a P-36 teve início em 15 de março de 2001, às 0 h 22 min, quando ocorreu uma primeira explosão na coluna de popa boreste, seguida 17 min depois por uma grande explosão na parte superior da coluna e em áreas próximas, culminando com a morte de onze funcionários da Petrobras. No dia 20 de março de 2001, às 11 h 41 min, a plataforma afundou (ANP E DPC, 2001).

A análise realizada permitiu que fossem identificadas várias não conformidades relativas a procedimentos regulamentares de operação, manutenção e projeto, destacando-se aqueles referentes à movimentação frequente de água nos tanques de drenagem de emergência, à operação de esgotamento do tanque de popa bombordo e à classificação da área de risco em torno desses tanques (ANP E DPC, 2001).

A análise efetuada pela Comissão de Investigação ANP14 e DPC15 permitiu constatar deficiências no sistema de gestão operacional, não conformidades identificadas quanto a procedimentos regulamentares de operação e manutenção. Além disso, os planos de contingência para acidentes de grande proporção e os esquemas de resposta a emergência de grande risco necessitam ser imediatamente aprimorados, bem como a revisão de critérios de projetos de engenharia em unidades flutuantes de produção para assegurar maior proteção intrínseca (ANP E DPC, 2001).

Com o afundamento da P-36, 1200 metros cúbicos de óleo diesel e 350 metros cúbicos de petróleo bruto vazaram no mar, a uma distância aproximada de 150 quilômetros da costa. Este derramamento foi combatido através do recolhimento de parte do óleo e dispersão química e mecânica da outra parte (ANP E DPC, 2001).

A Comissão de Investigação ANP/DPC recomendou que fossem adotadas diversas medidas, entre elas, a revisão de aprimoramento dos sistemas de análise de risco e gestão da segurança operacional, revisão de critérios de projeto, reavaliação do dimensionamento e qualificação das equipes de operação e manutenção, bem como daquelas responsáveis pela resposta a emergências de grande risco e elaboração de plano de emergência e implementação

de esquema de resposta a situações que envolvam grande risco à salvaguarda de vidas humanas, segurança da navegação, proteção ambiental e propriedade (ANP E DPC, 2001).

2.3.3 Fratura de reservatório e exsudação no Campo de Frade, Bacia de Campos

O acidente no Campo de Frade, localizado na Bacia de Campos, na verdade trata-se de dois episódios de derramamento de óleo.

Em 07 de novembro de 2011 ocorreu um *blowout* no Campo de Frade, decorrente da atividade de perfuração do poço 9-FR-50DP-RJS, operado pela Concessionária Chevron Brasil Upstream Frade Ltda (Área 1). As informações obtidas durante a investigação são baseadas em fatos constatados e registros apreendidos na sede da Chevron Brasil, a bordo do FPSO16 Frade e na sonda Sedco 706, esta última de propriedade da empresa Transocean do Brasil Ltda., que executava a perfuração do poço no momento do acidente. O *blowout* culminou no vazamento de cerca de 3.700 barris de petróleo cru para o mar, a uma distância de cerca de 120 km da costa do Estado do Rio de Janeiro (ANP, 2012).

Mesmo após identificar inconsistências no influxo de hidrocarbonetos para o poço, a Chevron demorou dois dias para perceber que se encontrava em uma situação de *underground blowout*. Mesmo o fato de a Petrobrás ter visualizado uma mancha órfã entre as concessões de Roncador e Frade no dia 08/11 não foi suficiente para que a Chevron reconhecesse o cenário do incidente. Os especialistas da *Wild Well Control Inc. (WWCI)*, empresa especializada em controle de poço, foram contatados apenas em 10/11/2011, o que elevou para seis dias o tempo necessário para controlar o *blowout* (13/11/2011), aumentando significativamente o volume exsudado. Ocorreram uma série de erros de interpretação que dificultaram a operação de controle do poço (ANP, 2012).

A Chevron deixou de realizar a análise de riscos da atividade de perfuração, ignorando seus próprios procedimentos de gestão de riscos (*Risk and Uncertainty Management Standard (RUMS)*), de 26/7/2011, e o *Single Well CPDEP Roadmap*), além dos requisitos normativos e regulatórios da legislação brasileira. Ao não executar o estudo, a Chevron deixou de contemplar as especificidades da perfuração na qual ocorreu o acidente (ANP, 2012).

Em 4 de março de 2012 foram observadas manchas de óleo no campo de Frade, cuja origem foi identificada como exsudação através de um desnivelamento de 80cm do leito

oceânico (Área 2). Embora inicialmente acreditar-se que essa exsudação seria consequência do incidente ocorrido na Área 1, os dados coletados e estudos realizados indicaram que não houve qualquer correlação entre os dois incidentes (ANP, 2016).

Após o incidente da Área 2, a Chevron encaminhou à ANP a solicitação de interrupção da produção do Campo de Frade até que houvesse um melhor entendimento sobre a correlação entre os incidentes ocorridos. As evidências apontam para o fato de que a operadora alterou o ponto de injeção previsto em projeto, em função das condições do reservatório, de modo a otimizar a injeção de água, o que ocasionou a ruptura da rocha selante (ANP, 2016).

Por serem incidentes ocorridos em datas próximas, verificaram-se falhas comuns da gestão de segurança operacional da Chevron que possibilitaram a ocorrência dos incidentes das Áreas 1 e 2. Tais deficiências relacionam-se a gestão de mudanças durante as fases de projeto e construção dos poços injetores, da ausência de análise de riscos e da reduzida percepção de riscos por parte da operadora (ANP, 2016).

No dia 13/03/2012, a Chevron instalou um sistema submarino de contenção, composto por 5 pequenos tanques denominados SCCT, sobre os 5 pontos de afloramento identificados, visando conter e coletar o volume de óleo exsudado. A partir de 14/03, não foram observadas novas manchas de óleo na superfície do mar na Área 2 do Campo de Frade, devido à instalação dos SCCT (ANP, 2016).

O incidente da Área 2 do Campo de Frade teve como consequência a formação de uma fratura entre o reservatório e o leito marinho, de aproximadamente 1 quilômetro de comprimento, que provocou a exsudação de óleo por meio de pontos de afloramento numa área de aproximadamente 20 metros quadrados. Até a implementação do sistema submarino de contenção, houve um vazamento de aproximadamente 0,065 metros cúbicos de óleo para a superfície do mar. Após a implementação do sistema submarinos de contenção, foram coletados cerca de 6,0 metros cúbicos de óleo exsudado desde março de 2012 (ANP, 2016).

Em comparação ao primeiro incidente, o volume de exsudação da Área 2 (5,9 metros cúbicos) foi muito inferior ao da Área 1 (605,4 metros cúbicos). Do volume total de óleo exsudado na Área 1, mais de 500 m³ de óleo atingiram a superfície do mar, enquanto que

cerca de 17 m³ foram coletados pelos tanques de contenção instalados pela Concessionária sobre os pontos de afloramento (ANP, 2016).

Desde março de 2012, todo o óleo exsudado vem sendo coletado pelo sistema submarino de contenção. A situação da região é monitorada constantemente por meio de ROV (Veículo Operado Remotamente), de forma a se identificar rapidamente qualquer situação atípica, tanto nos tanques quanto nas fissuras ou leito marinho (ANP, 2016).

2.3.4 Marco Regulatório – Legislação Ambiental

O descarte de substâncias oleosas é considerado um Crime Ambiental, de acordo com a Lei Federal N° 9.605 de 12.02.1998 - Art. 54 (na página inicial veja Legislação e Convenções/Nacional). Este assunto também é tratado na Lei Federal N° 9.966 de 28.04.2000 - que dispõe sobre a poluição das águas por substâncias químicas e oleosas, nos Art. 15 ao 21; e no Decreto Federal N° 4.136 de 20.02.2002 - que dispõe sobre infrações às regras de prevenção, controle e fiscalização da poluição das águas por lançamento de substâncias químicas e oleosas (CETESB, 2008).

Marcos regulatórios importantes para o setor foram as convenções e regulamentações internacionais, tais como: MARPOL 73/78, OPRC 90 (Convenção Internacional sobre Preparo, Responsabilidade e Cooperação em Casos de Poluição por Óleo), estabelecida no 16º Encontro da IMO, em 1989 (Londres 30/11/90). Tal convenção tem por finalidade estabelecer mecanismos de cooperação à altura dos grandes derrames de óleo. Outro mecanismo de controle são as exigências da Organização Marítima Internacional para navios, tais como o Código Internacional de Segurança Marítima (ISM CODE), além da pressão da mídia e da sociedade (Lanzillotta, 2008).

O Brasil, desde 1963, faz parte da IMO – *International Maritime Organization* – Agência da ONU destinada a criar medidas para melhorar a segurança do transporte marítimo internacional para prevenir a poluição marítima causada pelos navios. Em 1954, foi assinada em Londres a Convenção para a Prevenção de Poluição do Mar por Petróleo. A IMO assumiu a responsabilidade por este tratado em 1959, mas somente em 1967, quando o petroleiro Torrey Canyon encalhou ao largo da costa do Reino Unido e derramou mais de 120.000 toneladas de petróleo no mar, que o mundo percebeu a real gravidade da ameaça de poluição

envolvida nas operações de exploração, produção e transporte de petróleo. Até então, muitas pessoas acreditavam que os mares eram grandes o suficiente para lidar com qualquer tipo de poluição causada pela atividade humana. Desde então, essa organização assumiu o seu papel regulador internacional (IMO, 2010).

Para a implementação das normas da IMO, uma das mais importantes convenções internacionais é a MARPOL 73/78 – Convenção Internacional para a Prevenção de Poluição Causada por Navios, realizada em 1973 e modificada pelo Protocolo de 1978 (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 1978).

A MARPOL possui seis anexos, dos quais o primeiro e o segundo são de caráter obrigatórios e os restantes são opcionais por partes dos Estados signatários:

- Anexo I – Óleo;
- Anexo II – Substâncias Líquidas Nocivas Transportadas a Granel;
- Anexo III – Substâncias Prejudiciais Transportadas em Forma Empacotada;
- Anexo IV – Esgoto;
- Anexo V – Poluição do Ar.

O Anexo I trata de regras para a prevenção de poluição causada por óleo. Nele é prevista a vistoria das embarcações e são apresentadas normas para os tanques de resíduos de óleo, equipamentos para filtragem e controle de descarga operacional de óleo (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 1978). Nele também é tratado o uso do tanque de lastro segregado e da obrigatoriedade do casco duplo e do fundo duplo.

‘A razão para a ênfase no design do navio e a exigência de casco duplo tem uma explicação. Nos petroleiros construídos com casco simples, os hidrocarbonetos estão separados da água do mar apenas pela chaparia de fundo e de costado. Se o casco sofrer avaria devido a colisão ou encalhe, o conteúdo dos tanques de carga pode derramar-se no mar e causar uma poluição significativa. Com uma segunda chaparia interna, a uma distância suficiente da chaparia externa, o “casco duplo”, os tanques de carga são protegidos contra avarias e, assim, o risco de poluição é reduzido. (Juras, 2002, p.4)’

Antes da MARPOL, os navios jogavam os resíduos dos tanques diretamente no mar. Tal procedimento foi abandonado pela adoção do COW – *Crude Oil Wash* onde menor

quantidade de óleo era jogado no mar com o uso de solventes. Hoje, com o sistema do lastro segregado, nenhum resíduo deve ser jogado no mar (Wankhede, 2011).

O Anexo I também trata dos procedimentos obrigatórios em caso de derramamento de óleo e de avarias nas embarcações. Nele também é abordado o limite do tamanho e a disposição dos tanques de carga. Outro aspecto importante é o documento prevê a necessidade de um Plano de Emergência de Bordo contra poluição por óleo e ainda traz prescrições específicas para plataformas fixas e móveis.

O Anexo II regulamenta diversos aspectos referentes às operações com substâncias líquidas nocivas, trata de vistorias e traz normas para projetos, equipamentos e operações. Neste documento, são definidas medidas de controle dos estados dos portos (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 1978).

É importante ressaltar que os Anexos III, IV e V fogem do escopo deste trabalho.

Outra convenção internacional importante é a *International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-Operation* - Convenção Internacional Sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Casos de Poluição por Óleo (OPRC), de 1990. A OPRC prevê que, em caso de grande derramamento de óleo, o país signatário atingido receberá ajuda internacional. Nesta convenção, é definido que cada país deverá ter um Plano Nacional de Contingência. Apesar do Brasil ter aprovado esse documento em 1998, pelo decreto legislativo 43 e promulgado no mesmo ano pelo Decreto nº 2870, o país NÃO possui ainda seu Plano Nacional de Contingência. Na OPRC já consta a figura do “poluidor pagador” como um princípio geral do direito internacional. Além disso, faz referência à importância da cooperação técnica internacional e ao treinamento de pessoal em caso de sinistro (Lima, 2013).

A *International Convention Relating to Intervention on the High Seas In Cases of Oil Pollution Casualties* (INTERVENTION) - Convenção Internacional Relativa à Intervenção em Alto-Mar em caso de Acidentes por Óleo de 1969 tem como objetivo estabelecer o direito do país signatário, em alto mar, bem como as medidas cabíveis para prevenção, atenuação ou eliminação dos perigos ambientais e econômicos resultantes de um acidente marítimo.

“As partes da presente convenção podem tomar, em alto mar, as medidas necessárias para prevenir, atenuar ou eliminar os perigos graves e iminentes de poluição ou ameaça de poluição das águas do mar por óleo, para suas costas ou interesses conexos, resultante de um acidente marítimo ou das ações relacionadas a tal acidente, suscetíveis, segundo tudo indique, de ter graves consequências prejudiciais. Decreto nº 6478 de 2008 que regulamenta a INTERVENTION no Brasil”

A International Convention on the Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships (AFS) - Convenção Internacional sobre Controle de Sistemas Anti-incrustantes Danosos em Navios, 2001, realizada pela IMO, em Londres, pretendeu reduzir ou acabar com os riscos ambientais produzidos pelos sistemas anti-incrustantes nas embarcações. Esta convenção entrou internacionalmente em vigor em 2008 e, no Brasil, foi aprovada na Câmara dos Deputados em 2010 e encaminhada ao Senado Federal, visando sua ratificação pelo Governo Federal.

A International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (BWM) - Convenção Internacional para o Controle e Gerenciamento da Água de Lastro e Sedimentos dos Navios de 2004 tem por finalidade prevenir e neutralizar os riscos da introdução de organismos aquáticos nocivos e agentes causadores de doenças existentes na água de lastro dos navios que entram nos portos. Ainda não entrou em vigor internacionalmente, mas o Brasil já a aprovou em 2010, através do Decreto nº 148.

A Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and other Matter (LC) - Convenção sobre a Prevenção de Poluição Marinha por Alijamento de Resíduos e outras matérias - 1972. Esta convenção trata da regulamentação do despejo de substâncias no mar por navios e aeronaves e entrou em vigor internacionalmente em 1975. No Brasil, foi aprovada em 1982, pelo Decreto Legislativo nº 10, e ratificada e promulgada em 1982, pelo Decreto 87.566.

A IMO também realizou a convenção *International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships (SRC)* - Convenção Internacional para a Reciclagem Segura e Ambientalmente Adequada de Navios. Esse documento trata da reciclagem segura das embarcações. Não entrou ainda em vigor⁴ e o Brasil não é parte contratante desta convenção.

No Brasil, a lei máxima já traz em seu corpo a preocupação ambiental, como segue abaixo:

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. Artigo 225 – Constituição Federal de 1988”

Seguindo o caminho da legislação internacional sobre o assunto, a Constituição Federal já prevê responsabilidade e punição para os acidentes ambientais.

“Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei. Op. Cit. Parágrafo 2” “Sem obstar a aplicação das penalidades previstas neste artigo, é o poluidor obrigado, independentemente da existência de culpa, a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros, afetados por sua atividade. O Ministério Público da União e dos Estados terá legitimidade para propor ação de responsabilidade civil e criminal, por danos causados ao meio ambiente. Lei 6938 de 1981, Artigo 14 parágrafo único”

Barreto (2002) afirma que a legislação que trata da exploração e produção de petróleo no Brasil (além da Constituição) é a Lei 9478 de 1997, mas a responsabilidade em caso de acidente ambiental das empresas já era prevista na lei 6938 de 1981.

“Sem obstar a aplicação das penalidades previstas neste artigo, é o poluidor obrigado, independentemente da existência de culpa, a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros, afetados por sua atividade. O Ministério Público da União e dos Estados terá legitimidade para propor ação de responsabilidade civil e criminal, por danos causados ao meio ambiente. Lei 6938 de 1981, Artigo 14 parágrafo único” “

A mesma lei especifica as punições previstas ao agente poluidor:

- I. à multa simples ou diária, nos valores correspondentes, no mínimo, a 10 (dez) e, no máximo, a 1.000 (mil) Obrigações Reajustáveis do Tesouro Nacional - ORTNs⁵, agravada em casos de reincidência específica, conforme dispuser o regulamento, vedada a sua cobrança pela União se já tiver sido aplicada pelo Estado, Distrito Federal, Territórios ou pelos Municípios.

- II. à perda ou restrição de incentivos e benefícios fiscais concedidos pelo Poder Público;
- III. à perda ou suspensão de participação em linhas de financiamento em estabelecimentos oficiais de crédito;
- IV. à suspensão de sua atividade.

§ 1º A pena é aumentada até o dobro se:

I - Resultar:

- a) dano irreversível à fauna, à flora e ao meio ambiente;
- b) lesão corporal grave;

II - A poluição é decorrente de atividade industrial ou de transporte;

III - O crime é praticado durante a noite, em domingo ou em feriado”.

Lei 6938 de 1981, Artigo 14 parágrafo único.

A lei supracitada também prevê estímulo à pesquisa visando a exploração segura em termos ambientais:

“Art 2º - A Política Nacional do Meio Ambiente tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana, atendidos os seguintes princípios: (...)

VI - Incentivos ao estudo e à pesquisa de tecnologias orientadas para o uso racional e a proteção dos recursos ambientais. Lei 6938 de 1981. Artigo 2º”

Ainda sobre os crimes ambientais, a Lei 9605 define as punições, administrativas, civil e penais. A pessoa jurídica também é alcançada por tal legislação.

O Governo Federal, visando assimilar os princípios da MARPOL 73/78 e da OPRC/90 editou a Lei 9996 em abril de 2000. Nesta legislação está estabelecido como devem ser observadas as operações com o óleo no mar, definindo o papel das embarcações, plataformas de petróleo e instalações portuárias. Define, também, o plano de contingência e de emergência:

“XIX – plano de emergência: conjunto de medidas que determinam e estabelecem as responsabilidades setoriais e as ações a serem desencadeadas imediatamente após um incidente, bem

como definem os recursos humanos, materiais e equipamentos adequados à prevenção, controle e combate à poluição das águas;

XX – Plano de contingência: conjunto de procedimentos e ações que visam à integração dos diversos planos de emergência setoriais, bem como a definição dos recursos humanos, materiais e equipamentos complementares para a prevenção, controle e combate da poluição das águas. Lei 9966 de 18 de abril de 2000, Capítulo 1”

Outro aspecto importante desta lei é que ela determina que todo porto no Brasil deve ter um Plano de Emergência Individual.

A Legislação do Brasil, também através da Lei 7347 de 1985, prevê, entre outras questões, ação civil pública contra quem comete crime ambiental. Conforme a lei anterior, está prevista a responsabilidade civil.

Visando criar uma cultura de preservação ambiental, a lei 9795 cria a figura da Educação Ambiental. Nela está prevista que o Ensino em todos os níveis deve incorporar a preocupação com o meio ambiente. Para a implementação da mesma, essa lei define os diferentes papéis do poder público, das escolas, dos meios de comunicação de massa, das empresas e da sociedade (Lei nº 9795 de 1999).

A Atual legislação brasileira faz clara referência ao uso de barreiras de contenção em caso de vazamento de óleo, foco desta pesquisa, como segue:

“0308 –TRANSFERÊNCIA DE ÓLEO ENTRE EMBARCAÇÕES EM ÁREAS PORTUÁRIAS

Em decorrência da atribuição legal da Autoridade Marítima correlata à prevenção da poluição hídrica por embarcações, os procedimentos abaixo elencados deverão ser atendidos a partir de 1º de julho de 2010.

Quaisquer operações de transferência de óleo entre embarcações, em áreas portuárias, deverão atender aos procedimentos abaixo especificados, cuja adoção será de responsabilidade da empresa prestadora do serviço:

a) antes do início da operação de transferência, lançar barreiras de contenção de óleo no entorno das embarcações envolvidas na operação; ou

b) manter uma embarcação dedicada no local, para responder a qualquer incidente de derramamento de óleo, dotada de barreiras de contenção de óleo em quantidade adequada e pessoal qualificado, durante o transcorrer da operação.

Nos casos de operações de transferência entre embarcações fundeadas, durante o período noturno, deverá ser atendida obrigatoriamente a alínea a). Portaria N° 32/DPC de março de 2010 que altera a NORMAN-08/DPC. Grifo nosso”

Comparando a legislação brasileira com a internacional, percebe-se como aspecto positivo sua abrangência. Já como aspecto negativo, destaca-se o atraso no seu cumprimento. Como exemplo, vê-se a Lei 9966 de 2000, que foi criada há vinte e sete anos após a MARPOL 73/78 ter sido assinada, a despeito de o Brasil ser signatário deste tratado internacional.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

O terceiro capítulo tratará da caracterização da área de estudo. É apresentada a localização da área, além das principais características físicas, das configurações geológicas e da geodiversidade costeira.

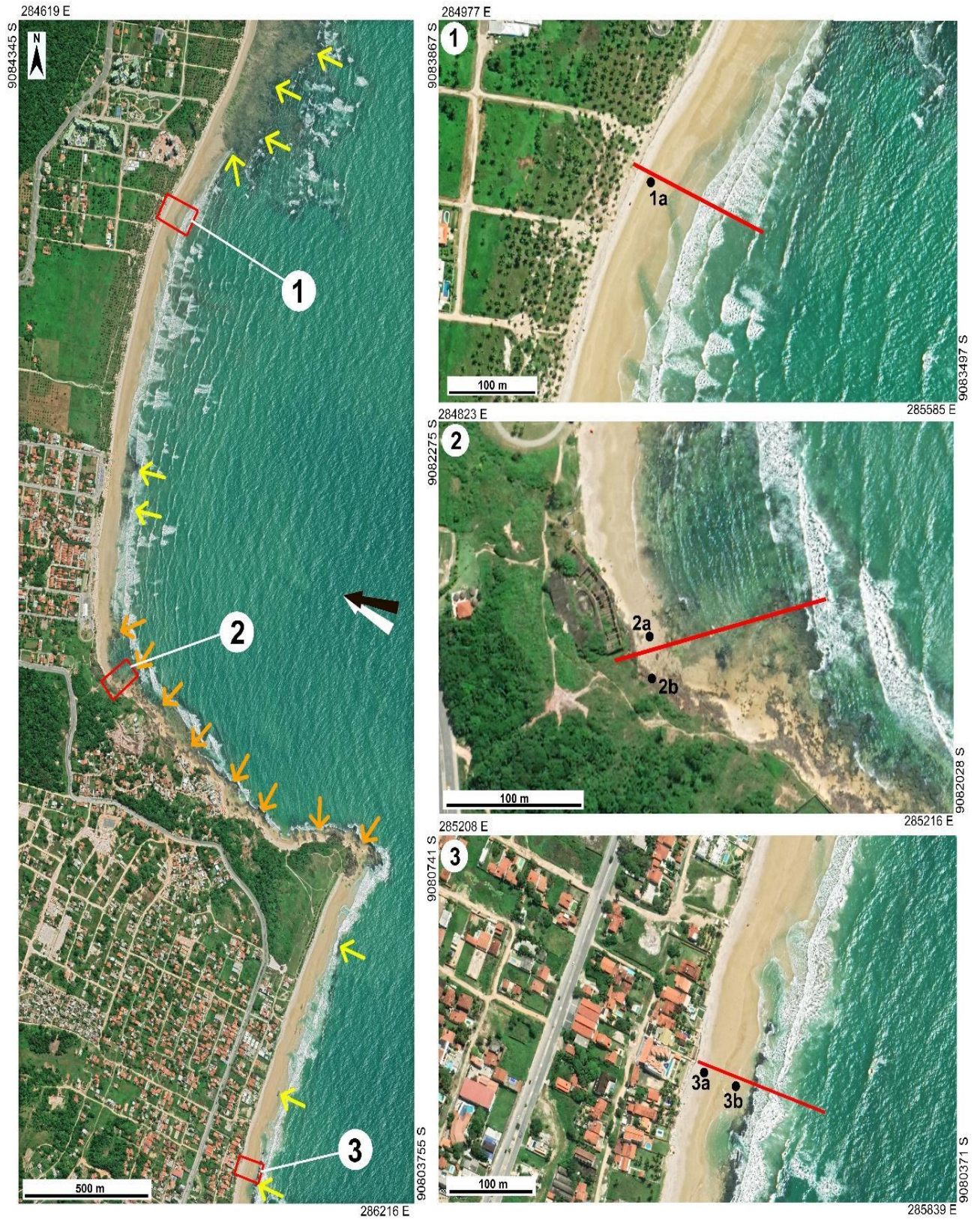
3.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo, região do estado de Pernambuco mais afetada pelo desastre ambiental causado pelo derramamento de petróleo cru, localiza-se nas praias do Paiva, Itapuama e Enseada dos Corais, litoral do município do Cabo de Santo Agostinho, na Região Metropolitana do Recife (Figura 15). A população do Cabo de Santo Agostinho é de aproximadamente 209.000 pessoas (SUAPE 2018). A região apresenta relevo variável com três compartimentos geomorfológicos distintos: domínio montanhoso, rampas de colúvio e planície costeira (Neumann et al., 1998), tendo a Mata Atlântica como vegetação original, que foi substituída por cana-de-açúcar na maior parte do área desde o século XVI (SUAPE, 2018; Oliveira et al., 2020).

Segundo Bontempo Filho et al., 2022, esta zona costeira apresenta uma grande geodiversidade com praias arenosas, estuários, planícies de maré, costas rochosas, mangues, recifes, piscinas e rochas de praia. As praias estudadas, Paiva (8 ° 17'S / 34 ° 56'W), Itapuama (8 ° 18'S / 34 ° 56'W) e Enseada (8 ° 18'S / 34 ° 57'W), formam uma zona costeira contínua em costa central de Pernambuco, com aproximadamente 7 km de extensão (Figura 15), e apresentam perfis deposicionais estreitos. Esta região fica 15 km ao sul da cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco, e apenas 10 km ao norte do complexo portuário de SUAPE.

Paiva e Enseada dos Corais representam praias oceânicas expostas (Madruga Filho e Araújo, 2003; Holanda et al., 2020), ambas exibindo orientação NNE-SSW (Figura 15), voltadas para ESE. A praia de Itapuama, um geossítio (Nascimento et al., 2012), é classificada como uma praia em forma de baía parabólica parcialmente abrigada (Lino, 2015; Holanda et al., 2020), com orientação ESE-WNW e voltada para a direção NNE-SSW (Figura 15).

Figura 15 - Imagens de satélite da área de estudo. A imagem ampliada mostra a área de estudo entre a porção sul da Praia do Paiva (1), até a Praia da Enseada dos Corais (3). Duas das praias têm orientação NNE-SSW, Paiva (1) e Enseada dos Corais (3), e Itapuama está orientada no sentido WNW-ESE. As setas pretas e brancas indicam a direção principal dos ventos e correntes para esta região, respectivamente (Azevêdo et al., 2021). Setas amarelas indicam a ocorrência de linhas rochosas de praia, e setas laranja indicam o litoral rochoso da Praia de Itapuama (2) formado por traquitos da Suíte Magmática Ipojuca (Nascimento et al., 2004; 2012). Inserção 1) Localização do perfil de levantamento 1 (linha vermelha) e estação amostral 1a na Praia do Paiva (ponto preto). Inserção 2) Localização do perfil de levantamento 2 na Praia de Itapuama e estações de amostragem 2a (sedimentos) e 2b (pavimento rochoso). Inserção 3) Localização do perfil de levantamento e estações de amostragem, 3a e 3b, na Praia da Enseada dos Corais.



Fonte: Bontempo Filho et al. (2022).

3.3 CLIMA

O clima é um dos fatores que mais influenciam na dinâmica do meio físico do planeta, tendo participação direta na morfogênese. As diferentes tipologias climáticas refletem em diferentes formas de relevo, tipos de solos e cobertura vegetal. A área de estudo encontra-se inserida no litoral nordestino sobre os domínios do clima tipo tropical quente e úmido, com chuvas de outono-inverno (Lafayette, 2006).

A região encontra-se em uma das áreas com maior índice pluviométrico do litoral do Nordeste. Os meses de março a agosto são considerados como período chuvoso. O regime pluviométrico pode variar entre 1.500 mm e 2.500 mm ano. A umidade relativa do ar apresenta uma média anual superior a 80% e a evaporação média anual fica em torno de 170 mm (Silva, 2004). Segundo definição de Köppen (1948), pode ser classificado como As', considerado tropical, quente e úmido. As temperaturas médias giram em torno de 28°C, com mínimas de 26°C e máximas de 30°C aproximadamente (Lafayette, 2006). As características climáticas associadas à alta pluviosidade, umidade e forte incidência solar na área, são fatores determinantes na construção da paisagem.

Os mecanismos dinâmicos que influenciam as chuvas no leste do Nordeste (ENE) são classificados em mecanismos de grande escala, responsáveis, em geral, pela maior parte da precipitação observada, e mecanismos de meso e microescala que completam os totais precipitados (Molion e Bernardo, 2002).

São considerados mecanismos de grande escala: os Sistemas Frontais (SF) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). De mesoescala: as Perturbações Ondulatórias no Campo dos Ventos dos Alísios (POA) – também conhecidos como Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) –, Complexos Convectivos e Brisas Marítimas e Terrestres. Já os de microescala, relacionam-se com as circulações orográficas e pequenas células convectivas.

A costa oriental do Nordeste do Brasil, ao longo da maior parte do ano, constitui-se em uma região sob influência da Massa Tropical Atlântica (mTa), caracterizada como uma massa tropical quente e úmida por conta de sua área de origem, sobre o Atlântico Sul, derivada da célula de alta pressão subtropical (o anticiclone semifixo do Atlântico Sul) (Girão et al., 2013).

Ao longo do ano, a influência da mTa sobre a costa pernambucana sofre perturbações derivadas da circulação atmosférica secundária. Tais perturbações atmosféricas, na borda oriental do Nordeste do Brasil, alteram as condições de tempo dominante e estão associadas aos deslocamentos da ZCIT, Frentes Frias (FF), Ondas de Leste ou DOL, Linhas de Instabilidade (LI), Brisas Terrestres e Marítimas, Vórtices Ciclônicos da Atmosfera Superior (VCAS) e os ventos vale-montanha (Girão et al., 2013; Souza, 2011).

Vários estudos tentaram explicar a concentração das chuvas entre o período de abril a julho no Leste do Nordeste do Brasil, como Kousky (1979), que associou o máximo de chuvas à maior atividade de circulação de brisa que adveceta bandas de nebulosidade para o continente à ação das frentes frias, ou seus remanescentes, que se propagam ao longo da costa. Cohen (1989) e Ferranti et al. (1990) associaram a quadra chuvosa à ação dos Distúrbios Ondulatórios, e Molion e Bernardo (2002) identificaram que 60 a 70% das chuvas que caem no período mais úmido (AMJJ) é pelo deslocamento da Zona de Convergência do Leste do Nordeste (ZCEN), alimentada pela convergência de umidade dos alísios; e que perturbações ondulatórias nos ventos alísios, tanto do hemisfério sul quanto do hemisfério norte, brisas marinha e terrestre e convecção local, associada à topografia e à convergência de umidade, completariam o quadro de fenômenos de escala menor, responsáveis por 30% a 40% do total pluvial (Molion e Bernardo, 2002).

Desse modo, o principal mecanismo atuante no leste do Nordeste do Brasil e na área de estudo são os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) ou Ondas de Leste – OL, os quais são sistemas de escala sinótica, que ocorrem na baixa troposfera tropical, e quando se formam na região do Oceano Atlântico Sul apresentam deslocamentos para oeste intensificando-se à medida que se aproximam da costa leste da região Nordeste do Brasil (Chou, 1990; Silva, 2010). Esses sistemas oscilam com periodicidade variando entre três e nove dias, e velocidade de propagação entre 10 a 15 m/s (Mekonnen et al., 2006; Alves et al., 2008; Machado et al., 2012).

Os meses de junho e julho representam os meses de maior precipitação no litoral de Pernambuco, conseqüentemente na área de estudo, tendo como causas os eventuais avanços das Frentes Frias e, principalmente, instabilidades provocadas por cavados barométricos

gerados sobre o Atlântico, que avançam rumo a oeste, fenômeno conhecido como Ondas de Leste (Girão et al., 2013).

Causam muita precipitação, principalmente, nos meses de abril a agosto. A intensidade e frequência das ondas de leste (OL) dependem da temperatura da superfície do mar (TSM), do cisalhamento meridional do vento, e da circulação troposférica no Atlântico Tropical (Aragão, 2004). Mesmo de pequena amplitude, as OL podem trazer chuvas intensas e inundações.

Outro sistema importante são as brisas, as quais são a parte superficial de uma circulação térmica causada pelo aquecimento diferencial dos oceanos e a superfície sólida da terra. A brisa é chamada de terrestre quando o vento superficial sopra da superfície terrestre para o mar (à noite) e marítima quando ocorre do mar para a terra (durante o dia). Os ventos alísios que sopram, principalmente do quadrante nordeste-sudeste, são fatores importantes na modulação das brisas na região tropical. Os sistemas de brisa são observados com maior definição nos meses de outono e inverno (abril a julho), especialmente quando da atuação de sistemas meteorológicos que ocorrem nessa época do ano (Aragão, 2006). Em geral, produzem chuvas de intensidade fraca a moderada.

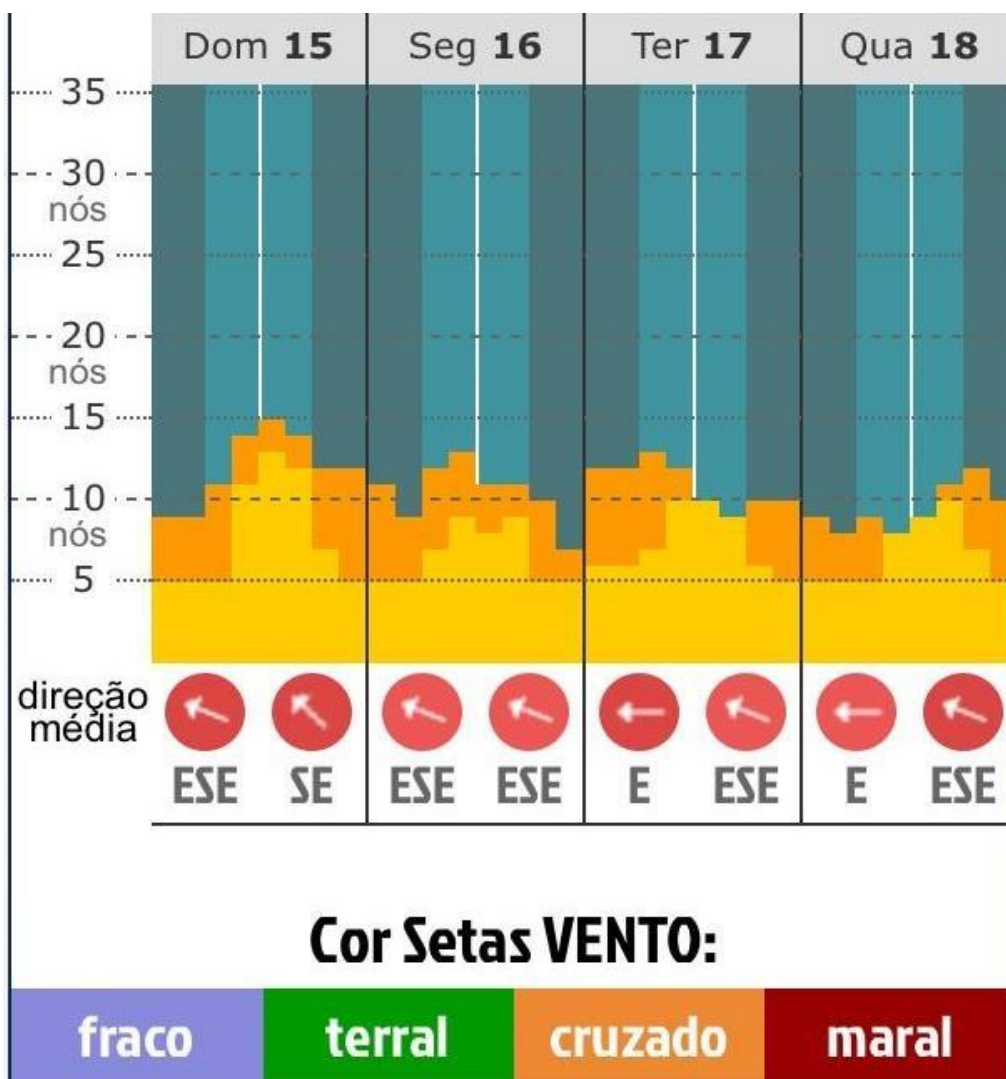
As áreas entre a costa e até 300 km têm um máximo diurno de precipitação associado à brisa marítima. A brisa marítima é máxima quando existe um contraste maior entre a TSM e a temperatura da terra. Isso ocorre no fim do outono e no início do inverno (maio, junho e julho). A parte leste do NEB, incluindo Ipojuca, sofre a influência dos sistemas de brisa em praticamente todo o ano (Souza, 2011).

3.4 VENTOS

Dados estatísticos de estudo, relativos ao período de outubro/2019 a maio/2020, caracteriza como ventos dominantes o de direção ESE (Figura 16). No regime de inverno, a incidência maior de direção permanece a de ESE, com velocidades médias elevando-se para a faixa de 9,0 a 11 nós. No verão, a predominância é caracterizada pelos ventos alísios, ventos do quadrante E. As velocidades nesses quadrantes ficaram em torno de 10 nós. O regime de ventos em toda região costeira caracteriza-se por ser bastante regular e sazonal, soprando em

90% do tempo do setor E-SE com velocidades médias de 6 a 10 nós. Os ventos alísios de sudeste e as brisas marinhas exercem grande influência nas condições climáticas da área, minimizando os efeitos térmicos advindos da insolação.

Figura 16 - Vento médio superficial costeiro entre os dias 15 e 18 de dezembro de 2019.



Fonte: Modificado de SURFGURU (2019).

3.5 MARÉS

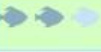
As marés para o litoral sul do Estado de Pernambuco são monitoradas através de poucas estações maregráficas. Atualmente, a DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil) realiza previsões regulares da altura das marés em apenas dois pontos da costa: Porto do Recife e Porto de Suape. É importante ressaltar que, a maior parte do país não tem estações maregráficas.

Assim como toda a costa litorânea de Pernambuco, a maré na região do Cabo é do tipo semi-diurna, com período médio de 12 h e 30 min, apresentando duas preamares e duas baixamars por dia. Os valores representativos da altura da maré são: 2,40 m para sizígia máxima (Figura 17), 2,10 m para sizígia média, medições regulares de 1,10 m para maré intermediária e 0,70 m para quadratura.

Segundo Manso et al. (2018) são mesomarés, com altura média de sizígia de 2,0m e altura média de quadratura de 0,9m, podendo atingir alturas de 2,6m durante as sizígias equinociais. Essas marés respondem principalmente ao forçante astronômico, sendo as contribuições das componentes não periódicas de origem meteóricas relativamente pequenas.

Em áreas estuarinas e costeiras as marés podem apresentar características distintas daquelas do oceano adjacente, uma vez que são grandemente modificadas pela descarga fluvial e pelas variações morfológicas locais (mudança na batimetria, estreitamento/alargamento de canais, etc.). À medida que se propaga pelas baías e estuários, o sinal de maré pode sofrer redução de sua amplitude pelo efeito de fricção com as margens e/ou fundo, ou ampliação, pelo efeito de ressonância, bem como experimentar mudanças de fase ou de suas características pela modificação da proporção e fase relativa de seus componentes, a exemplo das marés ao longo do rio Ipojuca.

Figura 17 - Tábua de maré do Porto de Suape entre dias 01 e 10 de fevereiro de 2019.

DIA			MARÉS DE SUAPE					ATIVIDADE MÉDIA
			1ª MARÉ	2ª MARÉ	3ª MARÉ	4ª MARÉ	COEFICIENTE	
1 Sáb			3:15 ▼ 0,7 m	9:19 ▲ 1,7 m	15:33 ▼ 0,7 m	21:58 ▲ 1,7 m	44 baixo	
2 Dom			4:14 ▼ 0,8 m	10:20 ▲ 1,6 m	16:39 ▼ 0,8 m	23:13 ▲ 1,7 m	40 baixo	
3 Seg			5:37 ▼ 0,9 m	11:44 ▲ 1,6 m	18:04 ▼ 0,8 m		40 baixo	
4 Ter			0:39 ▲ 1,7 m	7:01 ▼ 0,8 m	13:06 ▲ 1,6 m	19:21 ▼ 0,7 m	46 baixo	
5 Qua			1:48 ▲ 1,8 m	8:04 ▼ 0,7 m	14:09 ▲ 1,8 m	20:20 ▼ 0,5 m	56 médio	
6 Qui			2:41 ▲ 2,0 m	8:54 ▼ 0,5 m	14:59 ▲ 2,0 m	21:10 ▼ 0,3 m	69 médio	
7 Sex			3:27 ▲ 2,1 m	9:39 ▼ 0,3 m	15:45 ▲ 2,1 m	21:56 ▼ 0,2 m	82 alto	
8 Sáb			4:11 ▲ 2,3 m	10:21 ▼ 0,2 m	16:29 ▲ 2,3 m	22:41 ▼ 0,1 m	93 muito alto	
9 Dom			4:55 ▲ 2,4 m	11:04 ▼ 0,1 m	17:14 ▲ 2,4 m	23:26 ▼ 0,0 m	101 muito alto	
10 Seg			5:38 ▲ 2,4 m	11:47 ▼ 0,0 m	17:58 ▲ 2,4 m		105 muito alto	

Fonte: Modificado de TABUADEMARES (2020).

3.6 ONDAS

O clima de ondas das praias do Cabo caracteriza-se por duas estações anuais bem definidas: verão, entre os meses de dezembro a abril, e inverno, correspondendo aos meses de maio a novembro.

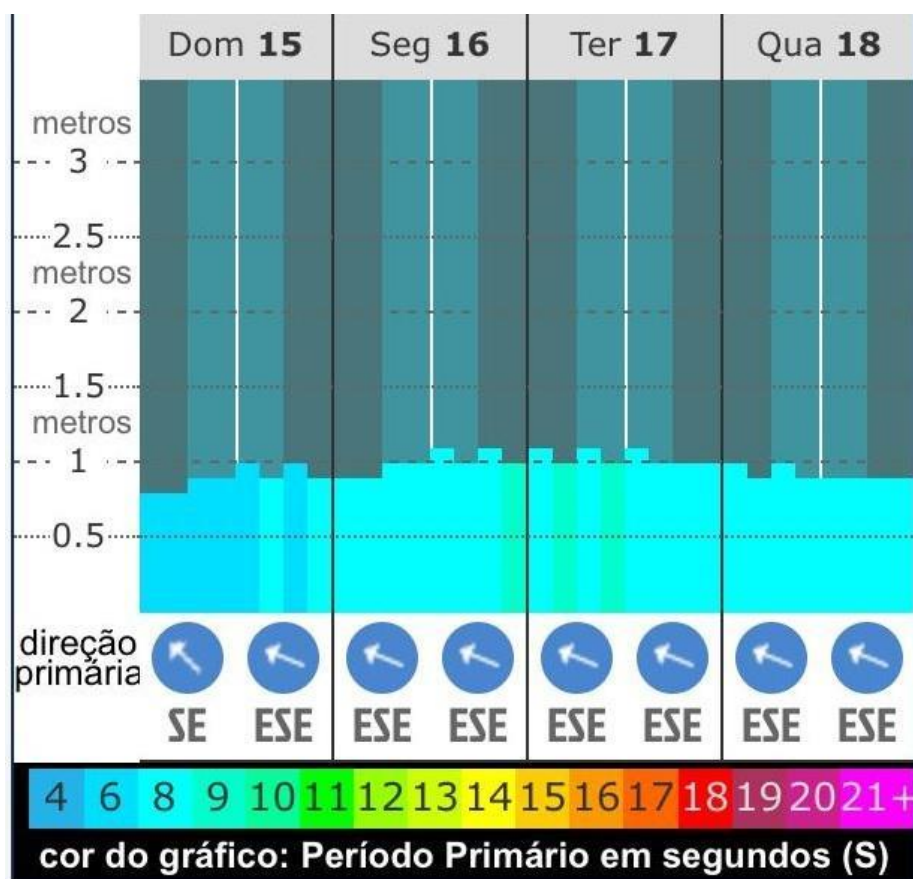
Os sistemas de ondas oceânicas que aportam às áreas costeiras do Estado de Pernambuco, em função da significativa constância na velocidade e direção do sistema de ventos, têm grande influência no transporte de sedimentos para a praia. As ondas de direção E-SE, associadas a ventos de mesma direção, têm altura média de 1 a 1,5 m e períodos de 5 a 7 s, são dominantes durante todo ano (Hogben e Lumb, 1967; U.S. NAVY, 1978; Dominguez et al., 1992).

Medidas de ondas efetuadas pela PORTOBRÁS, no Porto de Suape, nos períodos de março de 1977 a fevereiro de 1978 e de janeiro de 1979 a janeiro de 1984, usando ondógrafos instalados a aproximadamente 17m de profundidade, mostrou que as direções de ondas para

condição de primavera (setembro a novembro), de verão (dezembro a fevereiro) e de outono (março a maio), existe uma predominância de ondas se propagando perpendicularmente à praia, sendo que, no outono e na primavera, ocorre uma leve tendência no sentido S-N e no verão assumem a direção N-S. Para as condições de inverno, a direção predominante é S-N.

Com relação às alturas das ondas, observa-se que no outono e primavera, há uma predominância de valores em torno de 1,0 m, no verão oscilam entre 0,85 e 1,0 m (Figura 18) e no inverno, alcançam os maiores valores anuais, em torno de 1,25 m. Os períodos das ondas mencionadas ficam em torno de 6,5 s, para as condições de outono, inverno, primavera, e 5,0 s, no verão. A altura significativa média anual na área já referida atinge 1,11 m e período médio da ordem de 6,28 s. Os valores extremos observados são um dos parâmetros mais importantes para o cálculo de estruturas de proteção costeira ou outras obras (piers, marinas). A altura máxima ($H_{m\acute{a}x}$) variou ao longo dos anos entre 3,7 e 4,1 metros, com o maior valor ocorrendo no ano de 1983. A maior altura significativa variou entre 1,88 e 2,26 m e o maior período médio entre 9,84 e 12,24 segundos. As direções extremas variaram bastante ao longo dos anos, com a direção mais ao norte 89° ocorrendo no ano de 1980 e a direção extrema mais ao sul 177° no ano de 1981. Os dados do CPTEC - INPE (2005) apresentaram ondas com alturas significativas máximas nos meses de julho, agosto e setembro, respectivamente, com 2,10m, 2,15m, 2,27m, mas o valor máximo médio de altura significativa mensal atingida foi de 1,83 metros, conforme mostra a tabela 1. E os maiores períodos médios, ocorrem nos meses de maio e julho, com o valor de 7,56 segundos.

Figura 18 - Altura e período das ondas entre os dias 15 e 18 de dezembro de 2019.



Fonte: Modificado de SURFGURU (2019).

3.7 CORRENTES MARINHAS

Os sistemas de correntes que afetam a sedimentação e consequentemente a morfologia costeira são três diferentes tipos de correntes geradas por diferentes agentes dinâmicos: as correntes de deriva litorânea, que surgem quando as ondas não atingem perpendicularmente o litoral, o que resulta em um transporte paralelo à costa; as correntes de maré, produzidas pela diferença de altura da maré e as correntes geradas pelo vento, as quais não são tão regulares como as correntes de maré. Nas praias do Cabo (Figura 15), observa-se uma predominância da corrente de deriva no sentido norte, com velocidade máxima da ordem de 0,50m/s setor externo da linha (Azevêdo et al. 2021).

Tratando-se de uma região submetida a um regime de mesomaré, as correntes de maré exercem influência substancial no modelamento costeiro, principalmente quando estão

associadas ao período de ventos alísios de SE e as marés de sizígia. Esta associação produz intenso processo erosivo em toda zona litorânea.

Não existem dados por longo período de observação sobre velocidades de correntes próximas à costa. Um dos poucos trabalhos existentes foi o levantamento de dados através de fundeio (S4DWi da Inter Ocean Systems) efetuado pelo Projeto PROCOSTA (Processos Erosivos na Costa dos Municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes) na região de Boa Viagem durante o período de 29 de julho a 13 agosto de 2009. Neste período, foi observada a velocidade máxima de corrente em torno de 0,20m/s na profundidade de 7 metros em torno dos *beachrocks*.

Na área estudada, as correntes de maré exercem uma influência no modelamento costeiro, principalmente quando estão associados ao período dos mais intensos ventos que sopram de SE, e às vezes de sizígia. Esta associação produz intenso processo erosivo em toda zona litorânea.

3.8 MATERIAL EM SUSPENSÃO

As concentrações de material em suspensão nas águas da plataforma do Nordeste, são em geral muito baixas (inferiores a 0,5 mg/L), mesmo próximo à costa. Constituem-se exceções as áreas em frente a foz dos grandes rios, como por exemplo, a do Rio São Francisco, onde teores variam de 10 a 270 mg/L, com valor médio de 64 mg/L. A desagregação bioquímica dos depósitos de algas calcárias representa uma fonte secundária de sedimentos (Coutinho, 1970).

Segundo Barreto & Summerhayes (1975) somente pequenas quantidades de grãos minerais alcançam o mar e mais da metade dos suspensóides próximo à costa, são geralmente de origem orgânica. Há um decréscimo das concentrações, tanto de origem orgânica como inorgânica, no sentido externo da costa.

As baixas concentrações de material em suspensão, nas águas da plataforma, podem resultar da pouca produtividade do Atlântico Equatorial, da pouca produção de sedimentos em regiões semiáridas ou, ainda, devido à retenção dos sedimentos finos pela vegetação costeira dos manguezais, fato comum na costa pernambucana (Manso et al. 2018)

O maior suprimento de material fino para a plataforma interna ocorre no período de inverno. Algumas determinações realizadas na plataforma interna adjacente à cidade do Recife apresentaram valores de até 4,5mg/l (Coutinho et al, 1994).

3.9 GEOLOGIA

3.9.1 Geologia Regional

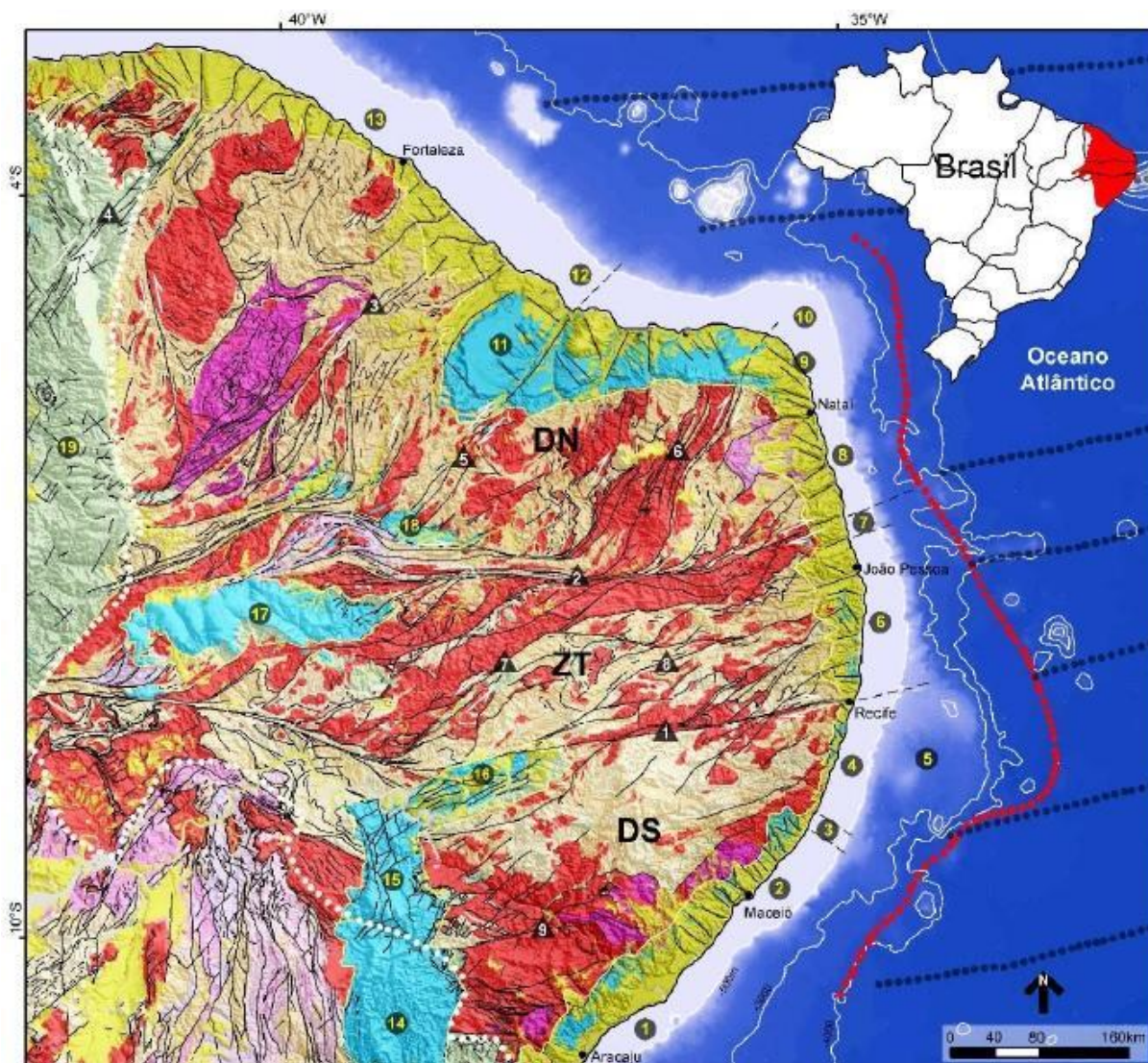
Quanto à geologia, no contexto regional, a área está inserida na porção centro sul da Província da Borborema (Almeida et al, 1977). A província Borborema está situada na porção nordeste da Plataforma Sul americana (Almeida, 1981; Santos et al., 2010; Araújo et al., 2013), é limitada a sul pelo Cráton São Francisco, a oeste pela bacia intracratônica do Parnaíba, a norte pela bacia Potiguar e as bacias da margem equatorial, e a leste é limitada pelas bacias marginais associadas a evolução do Atlântico Sul, as bacias Alagoas, Pernambuco, Paraíba e a Plataforma de Natal (Figura 19) (Matos, 1999; Brito Neves et al., 2002; Barbosa e Lima Filho, 2006; Barbosa et al., 2007; Magalhães et al., 2014b).

A Província Borborema é produto de uma complexa evolução estrutural formada a partir de uma aglutinação de massas continentais (Almeida et al., 1981; Santos et al., 2010), a partir de uma série de eventos orogenéticos que ocorreram durante o Pré-cambriano (Santos et al., 2010; Neves et al., 2012). A Província Borborema é formada por gnaisses e migmatitos Arqueanos e Paleoproterozóico (Sá et al., 2002; Neves et al., 2012, 2015; Dantas et al., 2013), e por rochas associadas ao Cinturão Cariris Velhos, no qual representa o embasamento das rochas supracrustais (Neves et al., 2009). No fim do Pré-cambriano e início do Cambriano, a Província Borborema foi afetada por intrusões graníticas (Santos e Medeiros, 1999; Leite et al., 2000; Archanjo et al., 2008; Van Schmus et al., 2008; Santos et al., 2010; Neves et al., 2012), e posteriormente, estes gnaisses e migmatitos foram retrabalhados por extensas zonas de cisalhamento transcorrentes de orientação preferencial NE-SW, nas fácies anfibolito e xisto verde (Vauchez et al., 1995; Neves e Mariano, 1999; Neves et al., 2002). Após a evolução Pré-cambriana da Província Borborema, durante o Paleozóico, iniciou-se o processo de fragmentação do supercontinente Gondwana que culminou com o *break-up* continental no Cretáceo e magmatismo em algumas bacias marginais do Atlântico Sul (Chang et al., 1992; Matos, 1999). Após a fragmentação do Gondwana, e a separação total da América do Sul e a

África, a Província Borborema sofreu forte soerguimento de suas regiões central e marginal que culminou com a denudação associada às superfícies de aplainamento no seu interior (Maia e Bezerra, 2009). Segundo Gusmão (2008) este soerguimento estaria sendo provocado por causa do empuxo da base da crosta, devido a um *underplating* magmático no Cenozóico.

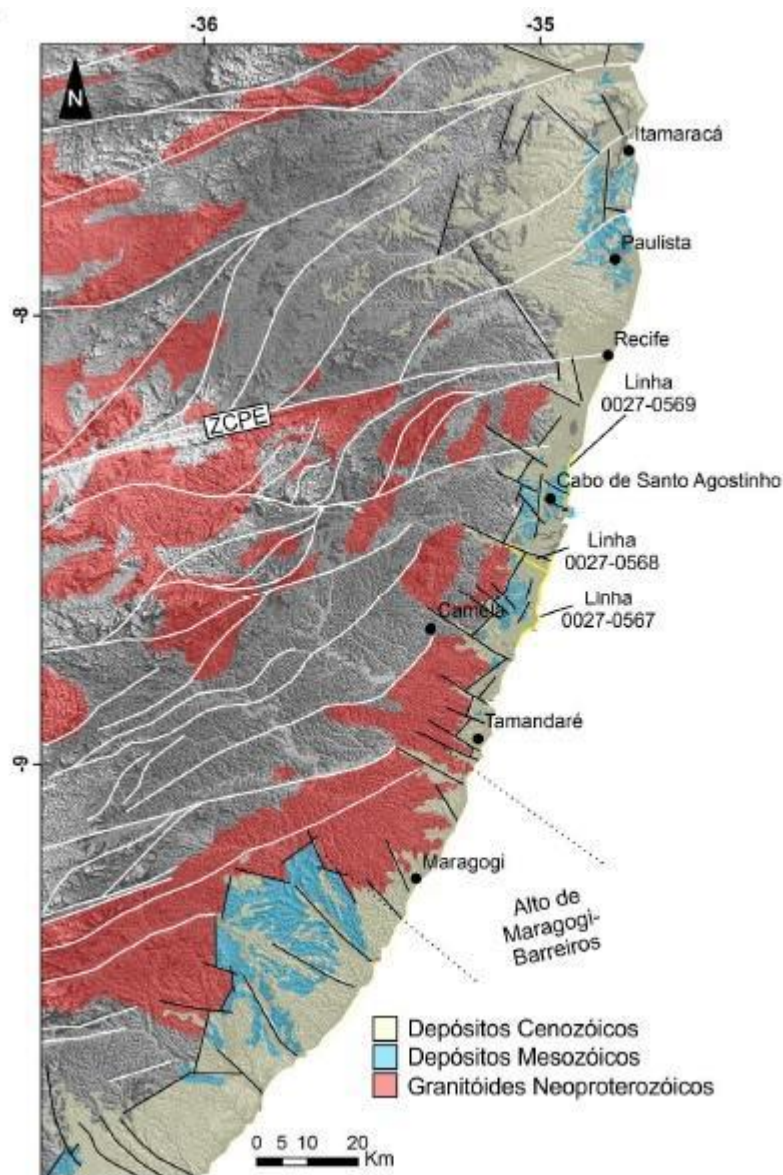
No entanto, o último campo de tensão instalado desde o Mioceno foi responsável por reativar as principais zonas de cisalhamento Pré-Cambrianas da Província Borborema. Segundo Bezerra et al. (2014), este último campo de tensão está relacionado com a reativação transcorrente, apresentando uma componente compressional E-W, e extensional N-S. Na Bacia Paraíba, a norte da Bacia Pernambuco, Lima et al. (2016) observou a partir de dados de campo, de poços e geofísicos, que após o *break-up* neste trecho da margem, as estruturas tanto do embasamento próximo, quanto associadas a fase rifte da Bacia Paraíba foram reativadas, e possivelmente controlaram a deposição da Formação Barreiras e Pós-Barreiras em pequenos grábens Cenozóicos. Assim como na Bacia Paraíba, as estruturas dúcteis Pré-Cambrianas do embasamento próximo da Bacia Pernambuco, exerceram um importante controle no processo de abertura e acomodação das estruturas rifte e nos eventos de reativação tardios a esta fase de abertura da Bacia Pernambuco (Figura 20).

Figura 19 - Mapa de localização da Província Borborema, situada na região nordeste do Brasil.



Fonte: Correia Filho (2017).

Figura 20 - Mapa da faixa costeira e embasamento adjacente a Bacia de Pernambuco.



Fonte: Correia Filho (2017).

3.9.2 Geologia Local

Localmente, a geologia do litoral corresponde a rochas pertencentes à Bacia de Pernambuco em sua porção sul. A Bacia Pernambuco representa uma bacia marginal da plataforma sul-americana e está inserida no contexto geotectônico da Província Borborema (Almeida et al., 1977; Araújo et al., 2013). Esta bacia apresenta uma região emersa estreita, com 8 a 10 km de largura e extensão de 80 km aproximadamente. Sua faixa costeira é

limitada pela Zona de Cisalhamento de Pernambuco (ZCPE), a norte, e pelo alto de Maragogi-Barreiros, a sul (Figura 21). Este alto atua como um divisor entre a Bacia Pernambuco e a Bacia de Alagoas (Barbosa e Lima Filho, 2006; Maia, 2012; Correia Filho et al., 2015; Buarque et al., 2016).

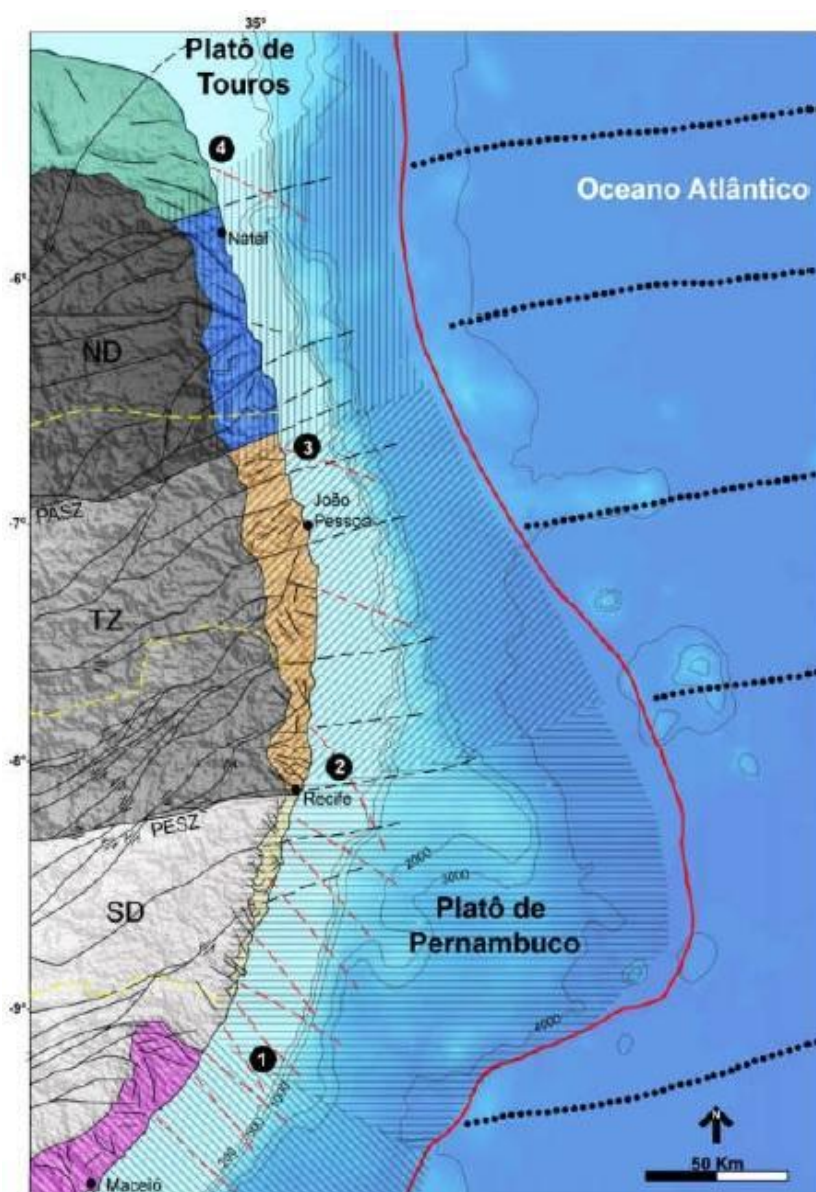
Com relação à litoestratigrafia, a Bacia Pernambuco apresenta as Formações Cabo, Suape, Paraíso, Estiva, Algodoads e Calumbi, conforme a carta estratigráfica (Figura 22) proposta por MAIA (2012), apresentando ainda sedimentos da Formação Barreiras, unidade estratigráfica cuja ocorrência se identifica de forma descontínua, por exemplo, no promontório do Cabo. Porém, Correia Filho (2017) sugere que a existência da Formação Algodoads precisa ser revista. As rochas aflorantes na zona costeira compreendem conglomerados e arenitos da Formação Cabo de idade Aptiana; arenitos, folhelhos e argilitos da Formação Suape do Albiano Inferior; arenitos, siltitos e argilitos da Formação Paraíso do Albiano Superior; calcários, margas e arenitos calcários da Formação Estiva do Cenomaniano-Santoniano; e arenitos, argilitos e arenitos conglomeráticos da Formação Barreiras do Mioceno-Pleistoceno (Correia Filho et al. 2019).

A sucessão sedimentar da Bacia de Pernambuco possui rochas intrusivas e extrusivas pertencentes à Suíte Magmática Ipojuca. Nascimento (2003) classificou os componentes litológicos da Província em três grupos: rochas plutônicas a hipoabissais, representadas pelo Granito do Cabo e variações; rochas vulcânicas, em forma de derrames, soleiras e plugs de composição variada: basaltos, traquitos, riolitos e rochas piroclásticas (ignimbrito); bem como diques riolíticos tardios, intrusivos nas demais unidades, apresentando idade incerta (somente os diques têm idade incerta, as demais unidades têm idade em torno de 100 milhões de anos).

Nas faixas de praia atingidas pelo derramamento de óleo, ocorrem rochas da Suíte Ipojuca, a exemplo do granito do cabo, que é parte do substrato nas praias de Paraíso, Calhetas e Gaibu; e os traquitos, que são rochas vulcânicas que ocorrem nas praias de Pedra do Xaréu e Itapuama (Figura 23). Além disso, nos arenitos de praia (*beachrocks*) e recifes de corais nas praias de Itapuama, do Paiva e de Enseada dos Corais, também foram identificadas manchas de óleo, além das regiões de cordões de areia e de sedimentos lamosos-arenosos que ocorrem nos estuários próximos às praias afetadas. A zona litorânea é dominada principalmente por uma cobertura sedimentar Quaternária e Recente: areias e argilas marinhas

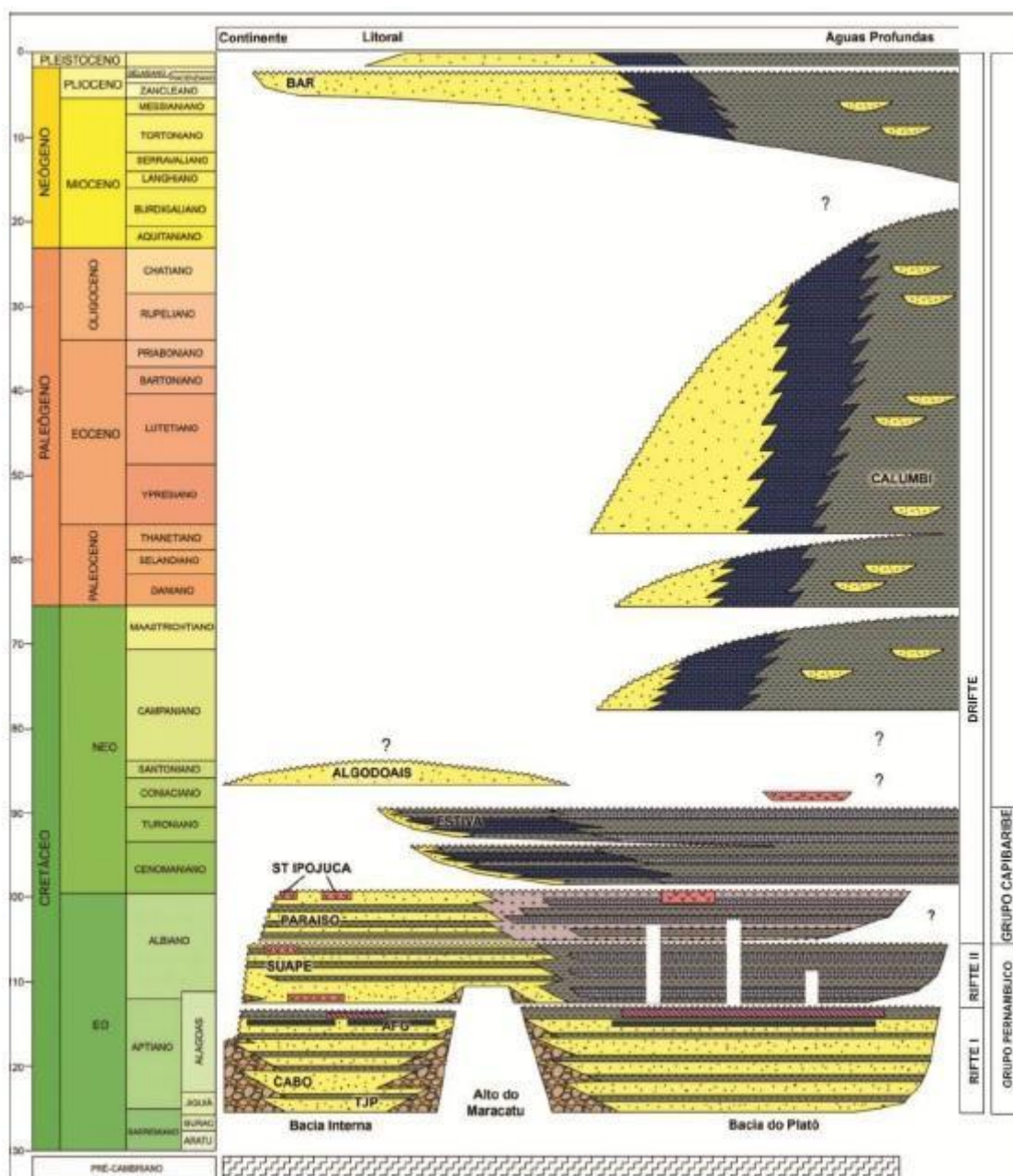
estão associadas a estuários, mangues e planícies de maré; Terraços arenosos do Pleistoceno e Holoceno formados por paleopraias (Dominguez et al. 1990, Mio & Giacheti 2007, Suguio et al. 2011).

Figura 21 - Mapa de localização das bacias marginais na borda oriental da Província Borborema, onde a zona costeira da Bacia de Pernambuco, região marcada pela cor verde claro, é limitada pela Zona de Cisalhamento de Pernambuco (representada pelo número 2, na legenda do mapa), a norte, e pelo alto de Maragogi-Barreiros (representada pelo número 1, na legenda do mapa), a sul.



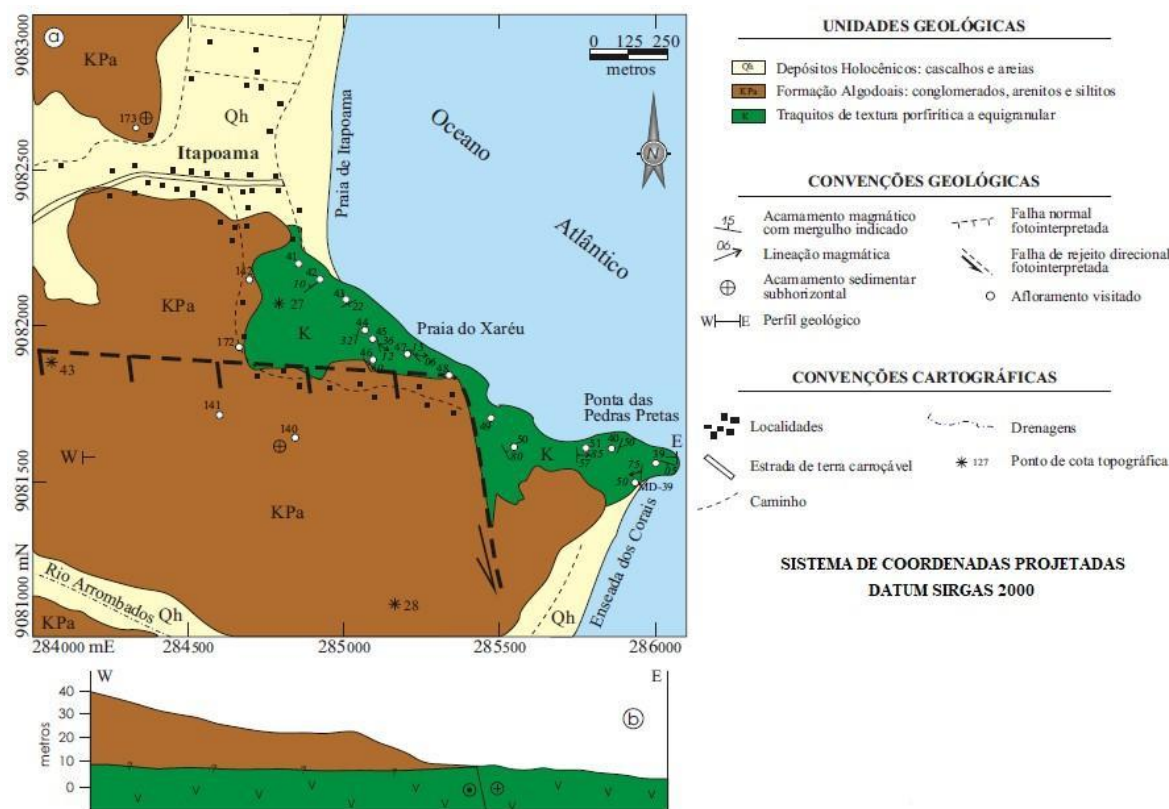
Fonte: Correia Filho (2017).

Figura 22 - Carta estratigráfica da Bacia de Pernambuco.



Fonte: Maia (2012).

Figura 23 - (a) Mapa geológico da região das praias estudadas. (b) Perfil geológico esquemático.



Fonte: Modificado de Nascimento (2003).

3.10 GEODIVERSIDADE COSTEIRA

A população do município do Cabo de Santo Agostinho é de aproximadamente 209.000 pessoas (SUAPE 2018). A região tem um relevo variável com três formas geomorfológicas distintas: o domínio montanhoso, as rampas de coluvião e a planície costeira (Neumann et al. 1998); a vegetação original do litoral era a Mata Atlântica, que foi substituída pela cana-de-açúcar na maior parte da área desde o século XVI (SUAPE 2018; Oliveira et al. 2020). A zona costeira apresenta grande geodiversidade (processos geológico e geomorfológico e formas de relevo) com praias arenosas, estuários, planícies de maré hipersalinas, costões rochosos, manguezais, recifes, piscinas naturais e *beachrocks*. As praias estudadas, Paiva (8°17'S, 34°56'W), Itapoama (8°18'S, 34°56'W) e Enseada (8°18'S, 34°57'W), formam uma zona litorânea contínua na costa central de Pernambuco, com aproximadamente 7 km de extensão (Figuras 15 e 29), e apresentam perfis deposicionais

estreitos. Essa região fica 12 km ao sul da cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco, e apenas 12 km ao norte do complexo portuário de SUAPE. Paiva e Enseada representam praias oceânicas expostas (Madruga Filho & Araújo 2003; Holanda et al. 2020), e ambas exibem uma orientação NNE-SSW (Figuras 15 e 29) e enfrentam na direção ESE. A praia de Itapuama, um geossítio (Nascimento et al. 2012), é classificada como uma praia em forma de baía parabólica parcialmente abrigada (Lino 2015, Holanda et al. 2020), com orientação ESE-WNW e orientação NNE-SSW (Figuras 15 e 29).

Não há estudos anteriores publicados sobre a sedimentologia e morfodinâmica marinha da Praia da Enseada dos Corais ou sobre as características sedimentológicas da Praia de Itapuama. Segundo Madruga Filho & Araújo (2003), a Praia do Paiva é composta principalmente por areias siliciclásticas finas a grossas moderadamente selecionadas, com baixo teor de carbonato de cálcio. No entanto, em um terraço na maré baixa local no *foreshore*, o teor de CaCO_3 foi superior a 30% (Figura 29).

O costão rochoso da Praia de Itapuama é formado por um grande afloramento de rochas traquíticas que foram inseridas na região como soleiras. Estas rochas têm uma textura porfírica com fenocristais milimétricos de sanidina embutidos em uma matriz de granulação fina (Nascimento et al. 2004; 2012). Estas rochas apresentam-se intensamente fraturadas, com planos de orientação E-W e N-S. A superfície dos afloramentos apresenta textura vesicular, com estruturas variando de 5 a 30 mm de diâmetro (Figuras 24C e 24D).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

O desenvolvimento das atividades descritas nesta metodologia é realizado com o apoio de equipe técnica formada por profissionais do Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastre (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental), Laboratório GEOQUANTT (Departamento de Geologia) e Laboratório de Geologia Marinha (Departamento de Oceanografia), ambos da UFPE, em parceria com o Laboratório de Geotecnia (Departamento de Geotecnia da EESC-USP) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio do Auxílio # 2020 / 03847-8.

O levantamento compreende os seguintes procedimentos: 1 - mapeamento e inspeção visual das praias, 2 - coleta de sedimentos das praias para análise microscópica qualitativa, 3 - registro fotográfico de diferentes aspectos dos resíduos e sua relação com a geodiversidade, 4 - análise sedimentológica de sedimentos, 5- uso de drone na criação dos modelos digitais do costão rochosos, e 6- levantamento geofísico capaz de realizar uma varredura contínua do ambiente.

4.2 ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA GEODIVERSIDADE, DOS RESÍDUOS DE PETRÓLEO E SEUS EFEITOS

Para a presente pesquisa, realizou-se um levantamento visual qualitativo nas áreas selecionadas durante as campanhas de dezembro de 2019 a março de 2021. O trabalho de campo utilizou bússolas, balanças, lupas de bolso, GPS, canivetes, martelos, espátula e pás. As informações fornecidas pelas pessoas que moram na área foram fundamentais para a seleção dos pontos de amostragem. O desenvolvimento das campanhas de campo ocorreu durante os períodos de maré baixa, com a melhor exposição dos perfis de praia, incluindo os pavimentos rochosos e linhas rochosas de praia. A análise dos resíduos de hidrocarboneto (*tar residues*) foi realizada em pavimentos rochosos, superfícies rochosas de praia, superfície de fundo das piscinas e áreas entre as rochas da face da costa, ambas expostas durante as marés baixas. A pesquisa também realizou coletas de sedimentos de praia e rochas para análises microscópicas apoiadas por luz ultravioleta portátil de amostras de rochas em laboratório para

caracterizar os aspectos de *tar residues* incrustados. A análise de nove amostras coletadas nas praias do Paiva, Itapuama e Enseada dos Corais foi realizada em laboratório por meio de aparelho de baixo custo, com frequência de 400 nm e potência de luz ultravioleta de 9 watts, conforme descrito por Riyis et al. (2019).

Uma série de trincheiras foram escavadas manualmente durante as campanhas de dezembro de 2019 a março de 2021 para verificar a ocorrência de resíduos de hidrocarboneto arrastados / enterrados em sedimentos nas estações de amostragem. As trincheiras foram de dois tipos: 1 - trincheiras quadradas de 0,40 m, com 0,50 m de profundidade e 2 - com 1 m de comprimento, até 0,30 m de largura e até 0,60 m de profundidade (Figura 24). As trincheiras foram escavadas nas partes inferior e superior das faces da costa, e os sedimentos foram coletados 0,05 m, 0,10 m, 0,20 e 0,30 m abaixo da superfície (Figura 24). Essas trincheiras permitiram uma análise visual *in situ* dos sedimentos no subsolo raso. As amostras coletadas também foram analisadas em laboratório. A análise sedimentológica abrange oito amostras de sedimentos coletadas nos três perfis durante a campanha de março de 2020. As análises do tamanho do grão foram realizadas pelo método de peneiramento e pipetagem (Muller, 1967). Os teores de carbonato de cálcio (CaCO_3) e Matéria Orgânica Total (TOM) foram determinados pela diferença de peso antes e após a acidificação, com 1N HCl e 1 N H_2O_2 , respectivamente (Carver, 1971). Os parâmetros de tamanho de grão foram empregados de acordo com a classificação faciológica de Larssonneur (1977), o tratamento estatístico de Folk e Ward (1957) e o diagrama de energia hidrodinâmica de Pejrup (1988). O conteúdo de carbono orgânico foi calculado com base no conteúdo de TOM multiplicado por 0,58 ao longo das análises dos sedimentos de praia que foram coletados (Allen, 1974).

Figura 24 - A) Exemplo das trincheiras quadradas escavadas para observar os sedimentos rasos enterrados nas estações de amostragem. A imagem mostra a ocorrência de dois leitos enriquecidos em minerais pesados, na Praia do Paiva. B) Trincheira rasa (faixa) escavada na Praia de Itapuama. C) Levantamento e coleta de *tar residues*, na Praia de Itapuama. D) Exemplo de coleta de *tar residues* em superfície rochosa, na Praia de Itapuama.



4.3 LEVANTAMENTO DE IMAGENS DO COSTÃO ROCHOSO E MODELAGEM DAS FEIÇÕES

Neste estudo, foram criados modelos digitais de encosta através do uso de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), aplicando na avaliação do costão rochoso que foi contaminado pelo derramamento do óleo. Este produto, de aquisição remota dos dados, permitirá um melhor entendimento do efeito de contaminação e quantificação de resíduos em relação aos aspectos de declividade e fraturamento dos substratos, considerando os aspectos geológico-geotécnicos e de risco ambiental.

Aplicou-se a caracterização do terreno, em uma encosta rochosa localizada na Praia de Itapuama, litoral sul do estado de Pernambuco que pertence ao Município do Cabo de Santo Agostinho. Nesta região, um estudo temporal (Bontempo Filho et al., 2022) realizado em praias arenosas que foram afetadas (Paiva, Itapuama e Enseada dos Corais), demonstrou que mais de um ano após o desastre a quase totalidade do contaminante foi removido mecanicamente na operação de limpeza e pela degradação produzida pela intensa dinâmica do meio ambiente costeiro. Entretanto, a persistência de quantidade importante de contaminante foi observada na área de costão rochoso localizado na Praia de Itapuama, que é composto por afloramentos de traquito (rocha vulcânica), intensamente fraturados (Figuras 26 e 28). Neste local, o contaminante se infiltrou em fraturas, falhas e vugs formados pela deformação mecânica das rochas e a erosão marinha.

Foram realizados dois levantamentos de imagens em julho de 2021 (Figura 25), realizados com uma plataforma DJI, modelo Phantom 4 Pro, com uma câmera tipo CMOS com 20 megapixels de resolução (4K - 4096×2160), abertura focal de f/2.8. Foram capturadas dois conjuntos de imagens: um deles em altitude de 7 m com um total de 55 imagens, e outro em uma altitude de 10 m, contendo 105 imagens (Figuras 25 e 26). O levantamento utilizado para a modelagem apresentada foi realizado a uma altitude de 7 m. Os levantamentos cobriram uma parte do pavimento rochoso e sua encosta compreendendo uma área de 95 x 20 m (Figuras 25 e 26). As imagens obtidas com o VANT foram processadas com base na técnica *Structure from Motion* (SFM) para obtenção das nuvens esparsas e densas de pontos (Westoby et al., 2012). A partir da nuvem densa, e após aplicação dos algoritmos de triangulação de malha e de textura, foi extraído o ortomosaico com resolução de 2mm,

aproximadamente. A qualidade do ortomosaico é fundamental para a vetorização manual da complexa rede de fratura que afeta o pavimento e a encosta rochosa. Ao todo foram traçadas 3090 linhas que correspondem aos planos de fraturas e falhas identificados no afloramento rochoso. Com auxílio de softwares de geoprocessamento, foi possível quantificar e avaliar a distribuição da densidade de fraturas (n° de fraturas/m²) (componente P20) a partir de uma malha quadriculada de amostragem com 50cm de lado.

Com base na malha de fraturas obtida é possível utilizar algoritmos que definem a densidade de fratura por metro linear (P10) ou por área (P20), o efeito de agrupamento de estruturas (clusterização) e o efeito de compartimentação do maciço (Zeeb et al., 2013). Além disso, foi possível elaborar um mapa de declividade que corresponde à intensidade de mergulho (0-90°) das superfícies que compõem o afloramento rochoso ao longo do ortomosaico. Desta forma, foi possível estabelecer uma relação entre a densidade do fraturamento e a declividade estimada da grande quantidade de superfícies do afloramento contaminado pelos resíduos de óleo.

Estas técnicas são hoje amplamente utilizadas para o estudo de sistemas de fraturas em rochas aflorantes análogas a reservatórios geológicos em subsuperfície (Zeeb et al., 2013; Sanderson e Nixon, 2015; Gutierrez e Youn, 2015). Aqui esse tipo de caracterização foi aplicado para se verificar as regiões do pavimento rochoso mais susceptíveis a acumulação e preservação do contaminante, em relação a declividade e densidade de fraturas.

O modelo obtido foi compartilhado por equipes de pesquisadores nos estados de Pernambuco e São Paulo, que puderam avaliar as informações. Este aspecto revela a vantagem da modelagem digital que pode ser divulgada/distribuída para vários atores que precisam planejar/decidir ações e avaliar processos temporais de forma remota, o que caracteriza um processo de tele-engenharia.

Figura 25 - Ortofoto criada a partir da junção de 105 imagens capturadas a 10 m de altitude; a) ortofoto completa apresentando 84,5 m por 41,5 m do local; b) Ampliação de 10 vezes da ortofoto apresentando região de 2,5 m; c) Ampliação de 20 vezes da ortofoto apresentando região de 1,25 m e d) Ampliação de 40 vezes da ortofoto apresentando região de 0,62 m e GSD de 0,5 cm/pixel.

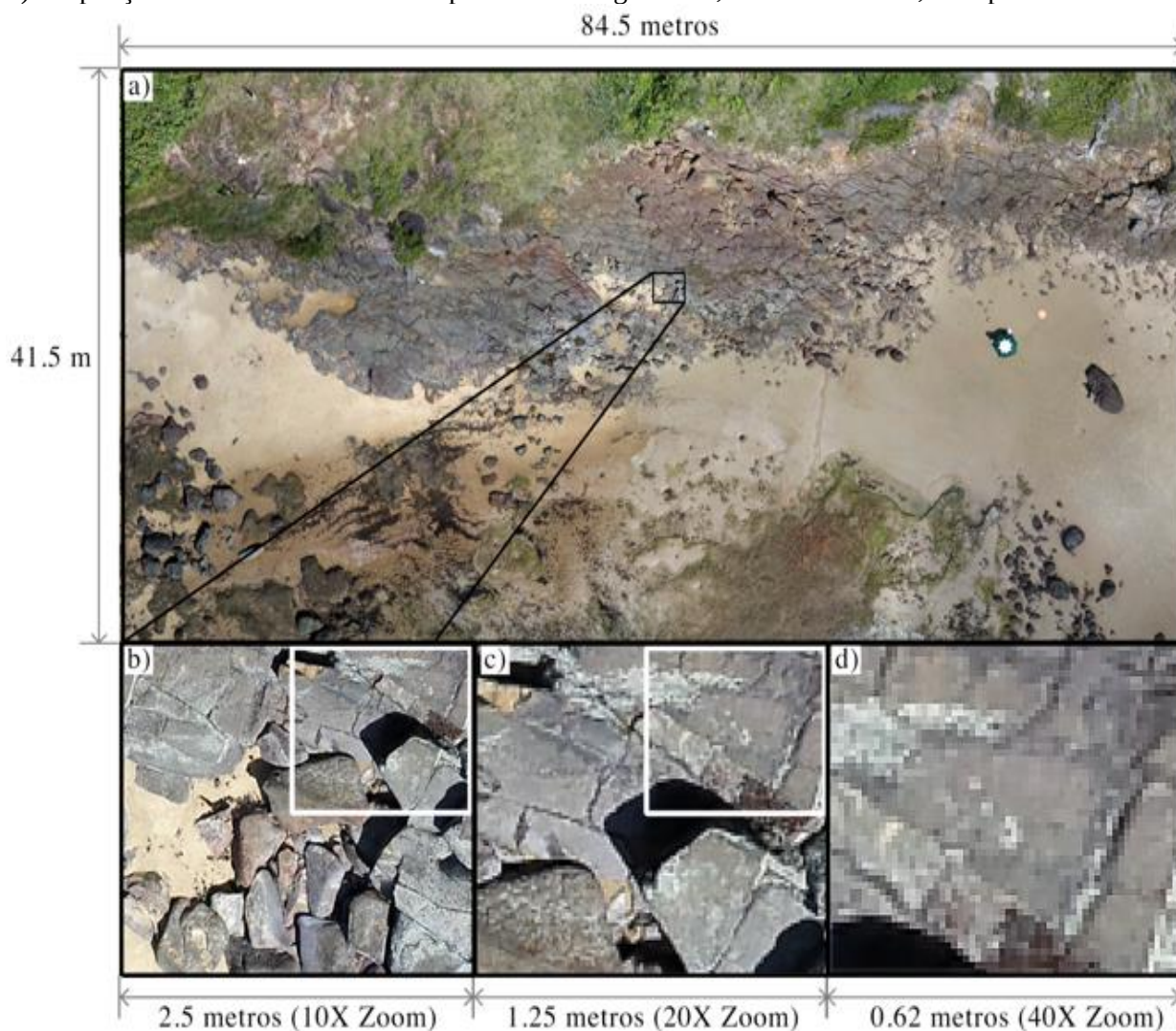
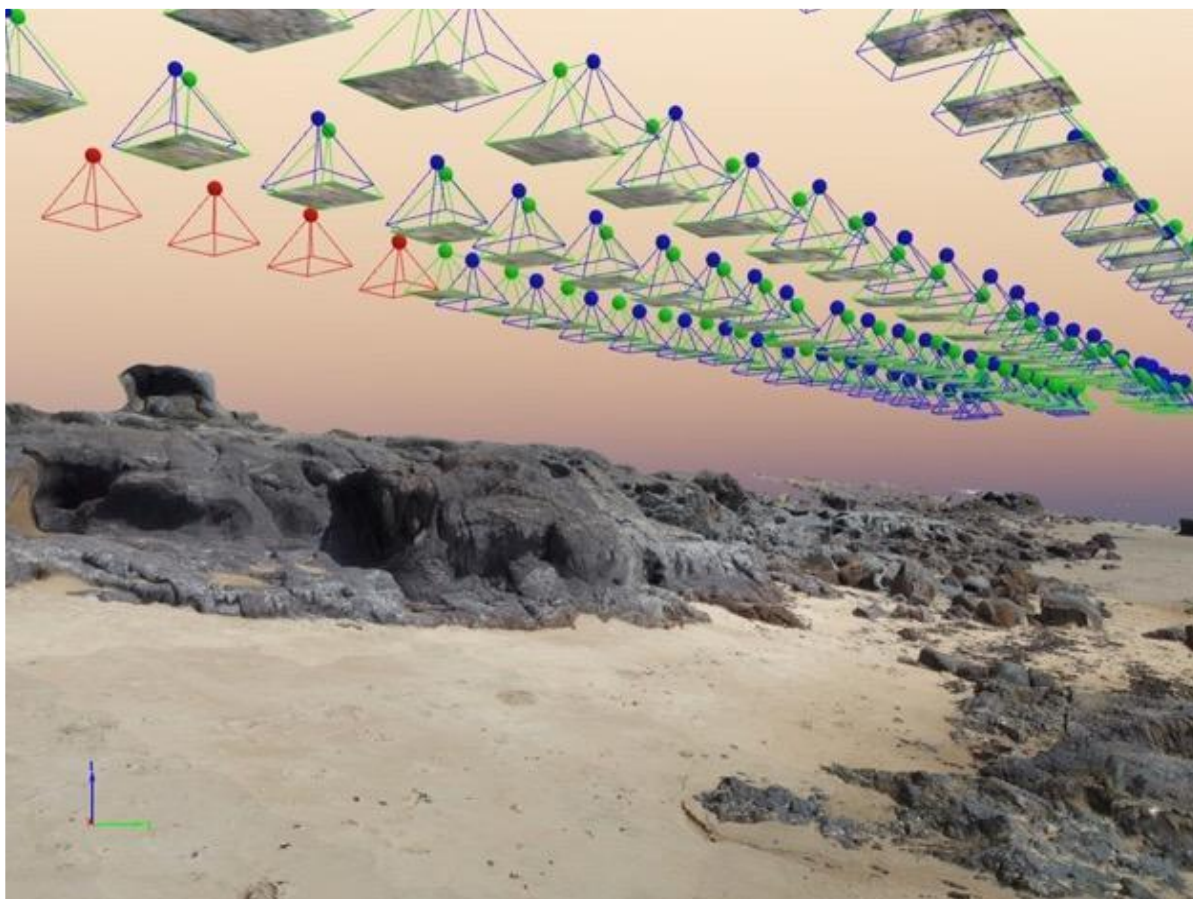


Figura 26 - Perspectiva de um trecho do costão rochoso da praia de Itapuama reconstruído como modelo digital a partir da aquisição de imagens. As esferas coloridas demonstram a localização da plataforma da fotogrametria gerada e projeção de imagens, conforme local de captura aérea.



4.4 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO VARRENDO CONTÍNUAMENTE AS ÁREAS DE ESTUDO

A metodologia tradicional de resistividade é baseada na transmissão de corrente contínua para a superfície através de dois eletrodos, enquanto a diferença de potencial resultante é registrada usando dois eletrodos adicionais. A resistividade de corrente contínua é amplamente utilizada em estudos ambientais. No entanto, a resolução da imagem e o tempo de aquisição podem ser caros para exames de varredura de locais contaminados. Com a demanda por tecnologias de alta resolução e alta velocidade de aquisição, foi desenvolvido o Método Resistivo Capacitivo (RC) (Kuras, 2002). Este método é apresentado como uma forma de utilizar uma metodologia de resistividade elétrica sem a necessidade de fazer contato

galvânico entre os eletrodos e o terreno. O método RC também permite a aquisição contínua de dados, possibilitando a investigação de grandes áreas com rápida operação de campo (Kuras, 2002, Kuras et al., 2006, Pan et al., 2014, Loke et al. 2013).

Neste estudo preliminar, foi utilizado o sistema OhmMapper (Geometrics Inc), que é composto pelo transmissor e receptores, além do data logger, para fazer o levantamento geofísico nas 3 áreas de estudos, em dezembro de 2021. Os receptores são conectados entre si por meio de cabos dipolo e o transmissor é conectado ao sistema receptor por meio de uma corda não condutora. Todo o conjunto é puxado ao longo da superfície do terreno por um operador (Figura 27).

Figura 27 - Sistema OhmMapper (Geometrics Inc), que é composto pelo transmissor e receptores, além do data logger, utilizado para fazer o levantamento geofísico na Praia de Paiva, em dezembro de 2021.



5 RESULTADOS

5.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos estudos, além de uma breve discussão, com o objetivo de permitir a análise e o planejamento de ações futuras, que possam promover melhorias na metodologia desenvolvida até o momento, visando atendimento dos objetivos propostos nesta pesquisa. Os resultados estabeleceram uma interpretação sobre o destino dos resíduos de óleo, e comparar a evolução dos *tar residue* gerados pela degradação posterior do óleo com outros exemplos de derramamentos de óleo em sistemas costeiros, bem como definir uma interpretação qualitativa da contaminação permanência de *tar residue* na região estudada quanto à sua complexidade geológica / morfológica, além de realizar um levantamento de imagens do costão rochoso da Praia de Itapuama, e a posterior modelagem de feições que permitiram a infiltração e preservação do contaminante nesta área.

5.2 IDENTIFICAÇÃO DAS LOCALIDADES / ÁREAS OLEADAS

Durante os meses de agosto de 2019 a março de 2020, foram verificadas grandes quantidades de manchas de petróleo cru, ao longo da região litorânea de todos os nove estados do Nordeste e parte do litoral Sudeste (Espírito Santo e Rio de Janeiro) do Brasil, afetando 1009 localidades (IBAMA, 2020) (Figura 28). Nos meses seguintes a este período, alguns vestígios de óleo continuaram a ser relatados na costa nordeste do Brasil pela Marinha do Brasil, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e civis. O agente responsável pelo derramamento de óleo não foi descoberto, apesar das investigações em andamento realizadas por organismos nacionais e internacionais. O IBAMA também sugeriu que a origem do derramamento poderia estar localizada de 400 a 700 km da margem brasileira, e possivelmente o óleo flutuou por aproximadamente 40 dias até atingir a costa.

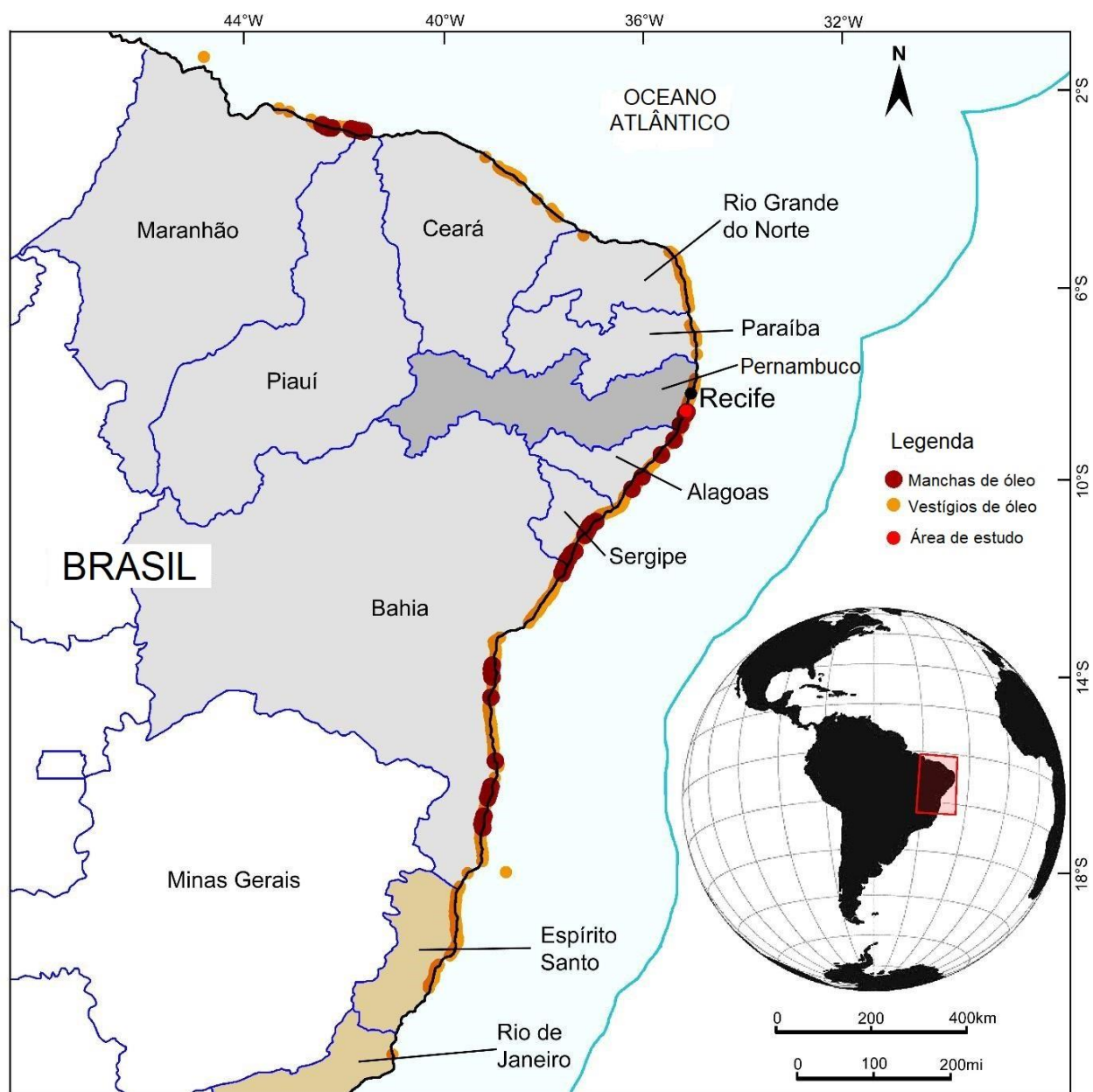
Algumas análises realizadas no óleo sugeriram que o material apresenta características compatíveis com o petróleo pesado produzido em alguns campos venezuelanos (De Oliveira et al. 2020, De Oliveira Soares et al. 2020). No entanto, nenhum acidente com petroleiros

transportando esses tipos de óleo foram relatados. De Oliveira et al. (2020) utilizaram análises químicas e estatísticas multivariadas para identificar a origem do petróleo e sugeriram que o material possui características químicas compatíveis com alguns tipos de petróleo venezuelano, indicando que representa petróleo bruto alterado devido ao tempo de permanência no mar ou a produto fabricado com óleo pesado produzido neste país. Lourenço et al. (2020), mostraram que amostras de óleo coletadas em vários locais da costa brasileira compartilham a mesma fonte, e que as assinaturas químicas não são conclusivas para determinar a origem geológica.

Estimativas recentes afirmam que mais de 5.000 toneladas de óleo foram removidas das praias, manguezais e recifes de corais brasileiros contaminados pelo acidente de agosto de 2019 a janeiro de 2020 (Brum et al., 2020). Magris e Giarrizzo (2020) descreveram a extensão do impacto do derramamento de óleo nos habitats marinhos costeiros, bem como uma lista de espécies costeiras ameaçadas e impactos socioeconômicos. O acidente causou danos à economia devido à paralisação da atividade relacionada ao turismo e à pesca, que fornecem a maioria dos empregos nessas regiões (Magris e Giarrizzo, 2020; Câmara et al., 2021).

No litoral de Pernambuco, o óleo afetou uma região com rica biodiversidade marinha, que inclui bentos, peixes, mamíferos marinhos, aves e uma série de ecossistemas complexos e frágeis, como manguezais e prados de ervas marinhas, já atingidos pela pressão antropogênica (Araujo et al., 2007). Últimos relatórios divulgados pelo governo de Pernambuco afirmam que a operação de limpeza de praias e rios da zona costeira resultou na retirada de cerca de 1.650 toneladas de resíduos (óleo misturado com areia e outros materiais) desde as primeiras manchas de óleo no Rio São José. Praia da Coroa Grande, em 17 de outubro de 2019. Ao todo, segundo o governo, foram atingidas 48 localidades e 8 rios em 13 municípios do estado. O material recolhido foi entregue ao Centro de Tratamento de Resíduos Pernambuco, em Igarassu, no Grande Recife. No local, ele é encaminhado a fábricas de cimento para virar combustível (G1 da Globo.com, 2020, Notícia 29/01/2020).

Figura 28 - Mapa mostrando a distribuição das áreas contaminadas na zona costeira brasileira até o final de 2019, causado pelo derramamento de óleo no mar. O derramamento atingiu nove estados do Nordeste do Brasil e dois estados do Sudeste. A área de estudo está localizada 40 km ao sul da cidade de Recife (ponto vermelho), no litoral do Estado de Pernambuco. A zona azul clara marca a zona econômica exclusiva. O encarte mostra a região impactada na margem leste do Brasil.



Fonte: Modificado de IBAMA (2020); Gonçalves (2020).

A área mais afetada no Estado de Pernambuco foi a região litorânea da cidade de Cabo de Santo Agostinho, onde aproximadamente 1.032 toneladas de lixo foram removidas das praias (Figura 29). Esta região apresenta uma grande diversidade de sistemas deposicionais costeiros, como praias arenosas, costões rochosos, planícies de marés, pântanos salgados, enseadas e canais estuarinos, faixas de mangue e piscinas em *beachrocks* e recifes (Manso et al. 2018). A poluição afetou severamente as três praias estudadas, e o óleo foi depositado em praias de areia, fortemente influenciadas pela erosão marinha; pequenas piscinas de maré baixa, associadas a *beachrocks* e linhas de recifes; e no costão rochoso formado por rochas ígneas aflorantes do período Cretáceo (Figura 30). A operação de limpeza foi realizada principalmente por meios mecânicos do óleo depositado nas praias, que se misturou com sedimentos e ervas marinhas.

Figura 29 - Registro da poluição causada pelo evento de derramamento de óleo na área de estudo. A) Manchas de óleo, Praia de Itapuama. B) Trabalhos de limpeza realizados por funcionários do governo e voluntários na Praia do Paiva. C) Sacos plásticos contendo óleo retirados das praias. D) Vista aérea dos costões rochosos da Praia de Itapuama durante o clímax da chegada do petróleo ao litoral. A topografia do costão rochoso é formada por pequenos *beachrocks* e poças de recifes com substratos arenosos na região do *foreshore*. E) Pastilhas de óleo emulsificado percoladas através de fraturas e juntas naturalmente formadas nas rochas aflorantes na pós-praia da Praia de Itapuama. F) Parte do costão rochoso da Praia de Itapuama, que se encontra recoberta por sedimentos. Seta amarela - óleo flutuando durante a maré baixa, seta branca - pedaços de óleo depositados durante a maré vazante, seta vermelha - pedaços de óleo depositados durante a maré alta na zona de supramaré. Seta branca - óleo depositado entre as rochas no *foreshore*, seta vermelha - óleo que inundou e inundou as superfícies rochosas que afloram na parte superior da zona do *foreshore*.

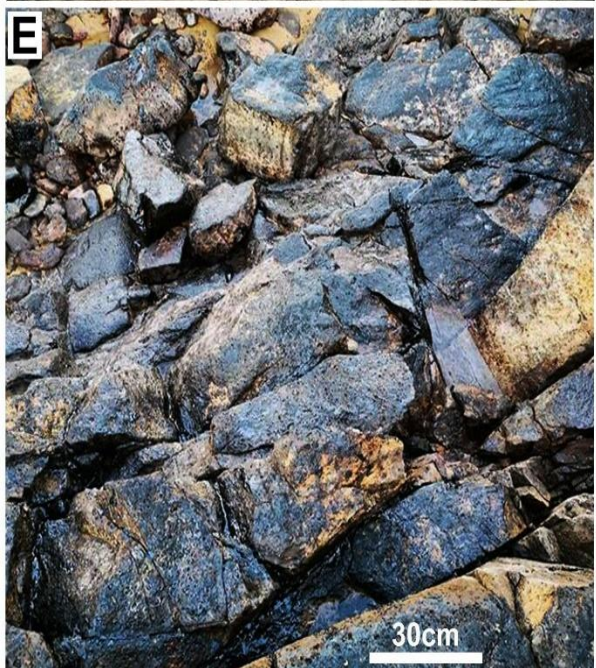
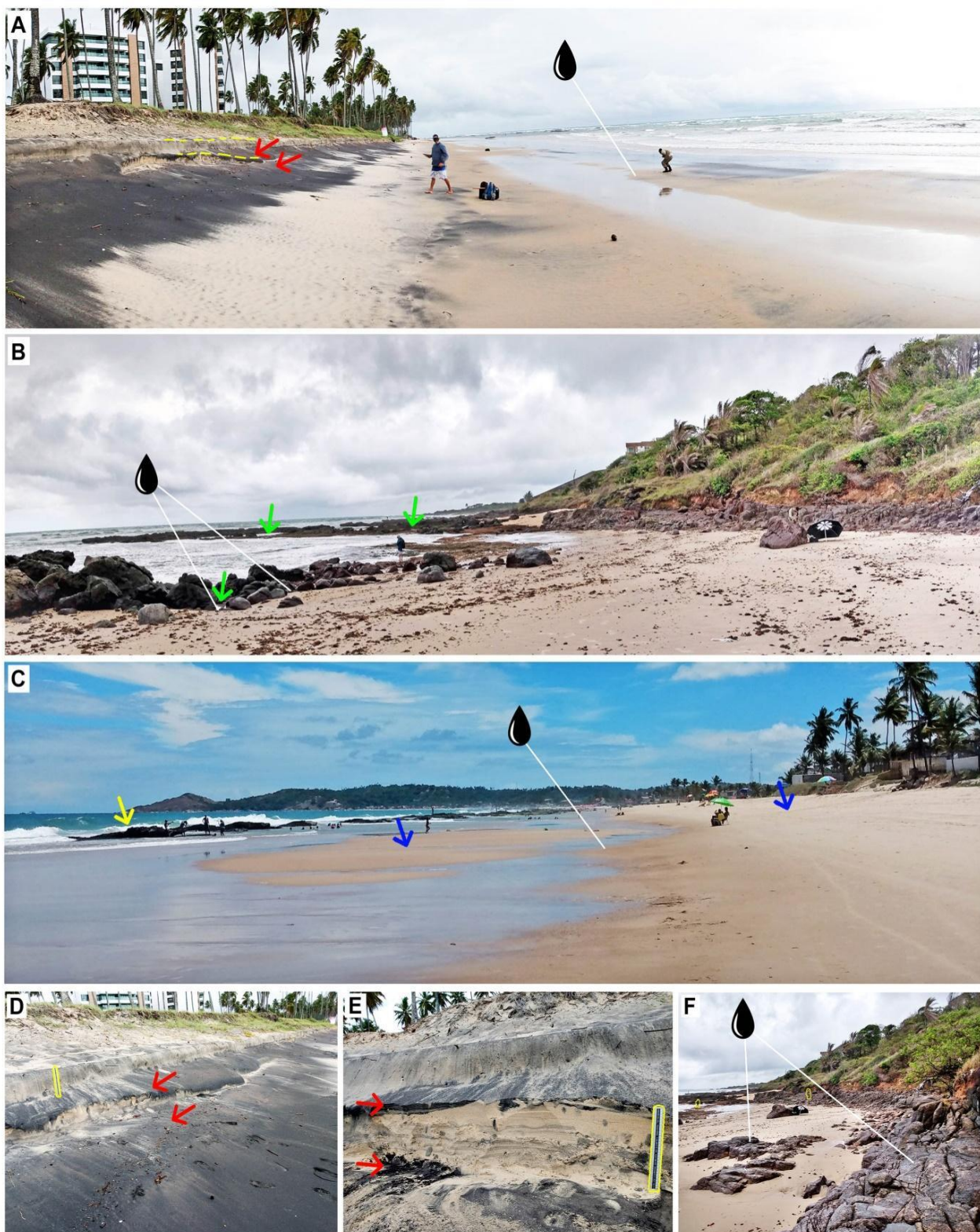


Figura 30 - Características das praias estudadas. A) Foto do setor sul da Praia do Paiva, voltada para nordeste. As linhas amarelas tracejadas mostram o limite da escarpa dos processos erosivos mais recentes. B) Costão rochoso da Praia de Itapuama, voltado para sudeste. As setas verdes indicam pequenas piscinas. C) Foto da Praia de Enseada dos Corais, virada a sul-sudeste. Setas azuis indicam as zonas costeiras e costeiras. A seta amarela indica os *beachrocks*. D) e E) As setas vermelhas mostram escarpas formadas por erosão recente e dois leitos contendo minerais pesados depositados (marcador amarelo - régua de 30 cm). F) Superfícies rochosas na parte superior de *foreshore* da praia de Itapuama e afloramentos rochosos onde a região de *foreshore* é coberta por areia. O símbolo da gota preta indica ocorrências de resíduos de hidrocarbonetos encontrados durante o estudo. As fotos foram tiradas em março de 2021 durante a maré baixa.



5.3 ANÁLISE DA PRESENÇA DO ÓLEO E DO EFEITO DA SUA CONTAMINAÇÃO

Nos meses seguintes de 2020, “bolotas” de hidrocarboneto (*tar balls*) continuaram a ser registradas ao longo da costa brasileira, principalmente em julho / agosto, após fortes tempestades que exumaram os depósitos soterrados na primavera anterior. Em Pernambuco, funcionários do governo relataram resíduo de hidrocarboneto (*tar residue*) no município do Cabo de Santo Agostinho, ao sul de Recife, e nas praias do Janga e Paulista, ao norte. No Cabo de Santo Agostinho, houve relatos de ocorrência de *tar residue* na praia de Itapuama, incrustados em rochas e *beachrocks*. Além das *tar balls* encontradas nos meses subsequentes ao desastre, muitas áreas do costão rochoso da Praia de Itapuama permanecem contaminadas porque o óleo infiltrou vesículas, fraturas e juntas formadas nas superfícies rochosas (Figura 31), e o *tar residue* permaneceu pouco alterado pelos efeitos do intemperismo doze meses depois.

As *tar balls* e os agregados minerais de óleo se formam durante a emulsificação e intemperismo do petróleo bruto e sua interação com os minerais (Kiruri et al., 2013). O “*tar residue*” marinho representa conglomerados de óleo intemperizados encontrados em praias, sistemas de transição como estuários e a superfície do oceano aberto, e no fundo do mar (Warnock et al., 2015). *Tar residue* marinhos podem se originar de emissões antropogênicas e naturais, como infiltrações de petróleo. O termo “*tar balls*” define um agregado redondo de óleo intemperizado geralmente com menos de 100 mm de diâmetro. Os agregados discretos com mais de 100 mm são designados de *tar patties*. Grandes depósitos espessos de óleo intemperizado que estão parcialmente ou totalmente submersos na água são chamados de *tar mats* (Warnock et al., 2015). O intemperismo do petróleo bruto envolve uma combinação de processos como espalhamento, evaporação, dissolução, biodegradação, emulsificação, sedimentação, dispersão e oxidação, o que deixa uma concentração de compostos de petróleo mais pesados e viscosos. Alguns *tar residues* marinhos resultam da mistura de óleo e sedimentos como areias ricas em quartzo e partículas biogênicas. A mistura com areia faz com que o óleo perca sua flutuabilidade e afunde (Warnock et al., 2015).

Figura 31 - Os rissóis de hidrocarboneto (*tar patties*) percolaram através de fraturas formadas naturalmente e juntas de rochas que afloram na costa da Praia de Itapuama.

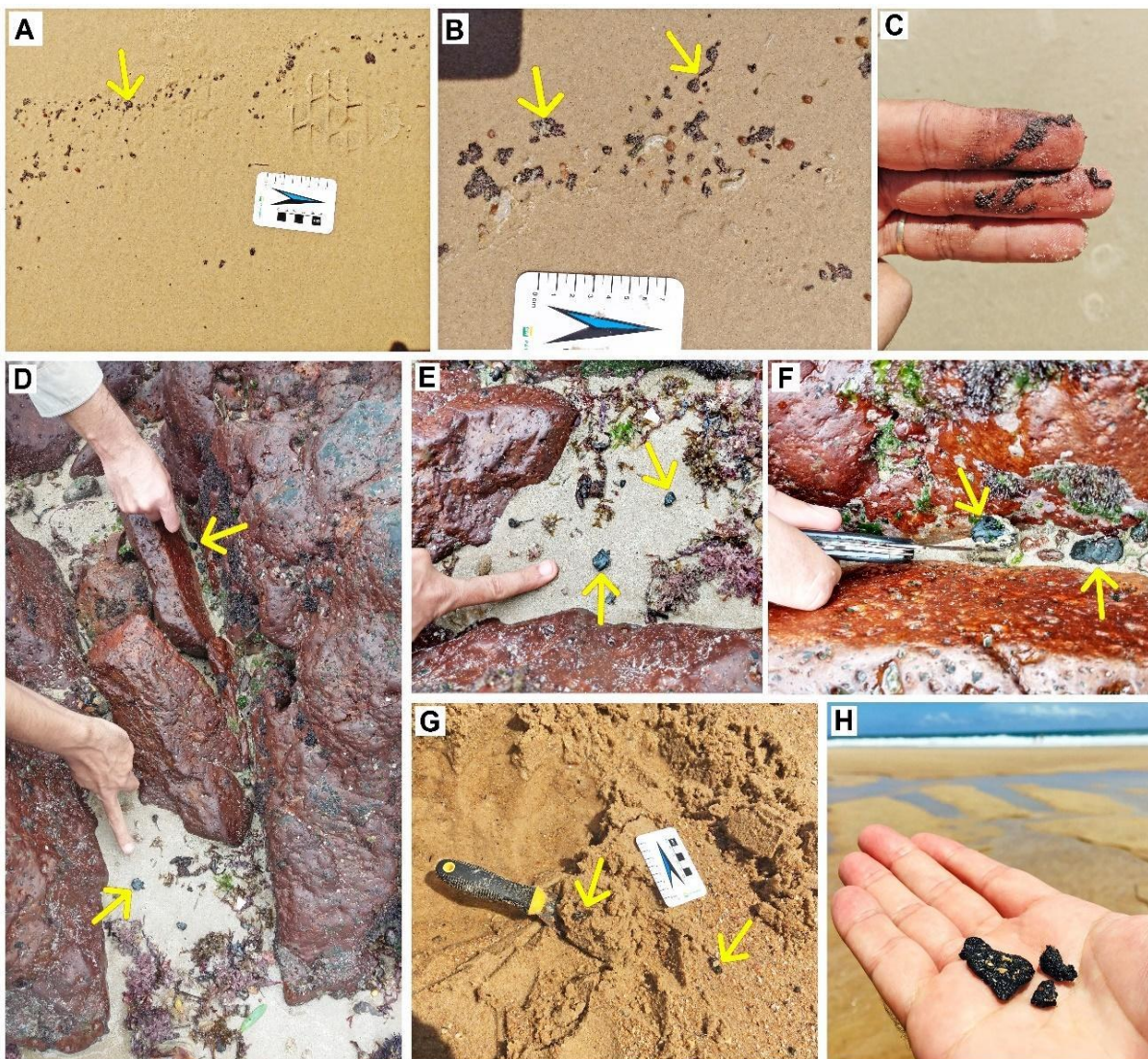


5.3.1 *Tar balls* encontrados nas praias

Durante os trabalhos de campo, foi encontrada uma pequena quantidade de *tar balls* variando de 5 a 30 mm de diâmetro nas três praias. As quantidades encontradas são relativamente pequenas quando comparadas à proporção do contaminante que apareceu em 2019 (Figura 32A, B e C). Todas as *tar balls* foram encontradas na face da costa durante o período de maré baixa. As *tar balls* encontradas na Praia do Paiva (janeiro de 2021), representam partículas dispersas com diâmetros de 5 a 30 mm, que surgiram com a oscilação das marés e possivelmente foram remobilizadas durante as tempestades. O material apresenta alguma viscosidade, mas a maioria dos fragmentos apresenta aspecto duro e crocante. O resíduo foi misturado a sedimentos, partículas siliciclásticas e biogênicas (Figura 32C). *Tar balls* encalhadas de aproximadamente 10 a 20 mm também foram encontradas na Praia da Enseada em janeiro de 2021 (Figura 32G e 32H). Este material também apresenta alguma viscosidade e mais consistência em relação aos *tar residues* encontrados na Praia do Paiva. O resíduo foi misturado com sedimentos e quase não apresentou fluorescência sob a luz ultravioleta usada. Os fragmentos são arredondados e também levados pela oscilação das marés.

Tar balls com aproximadamente 10 a 20 mm foram encontradas próximas às rochas na face litorânea da Praia de Itapuama (Figura 32D e 32E). Esses resíduos foram isolados com outras partículas orgânicas e também presos em espaços entre as rochas (Figura 32F). Este material apresenta menor teor de partículas minerais e biogênicas e consistência sólida. Possivelmente, representa os resíduos remanescentes do contaminante original, que ficou preso nas rochas e não foi arrastado para os sedimentos. Assim, o processo de degradação pode ser diferente para esses resíduos das *tar balls* encontradas nas praias de areia (Paiva e Enseada dos Corais). Essas *tar balls* também não apresentam fluorescência sob a luz ultravioleta usada, provavelmente pela perda de substâncias voláteis.

Figura 32 - Exemplo de *tar balls* e *tar residues* encontrados nas praias estudadas. A a C) *Tar residues* com dimensões de 5 a 30 mm encontrados na zona de arrebentação da Praia do Paiva, em janeiro de 2021. Os *tar fragments* isolados foram lavados com fragmentos biogênicos e apresentam uma consistência viscosa. D a F) *Tar balls* encontradas no fundo de uma piscina durante a maré baixa na zona de arrebentação da Praia de Itapuama, março de 2021. Os *tar fragments* isolados foram encontrados com partículas detríticas biogênicas, e também presos em fraturas naturais (F). G e H) *Tar balls*, de 5 a 30 mm de diâmetro, encontradas na zona de arrebentação da Praia da Enseada, durante a maré baixa de janeiro de 2021. O material apresenta consistência sólida e está misturado a partículas siliciclásticas e biogênicas.

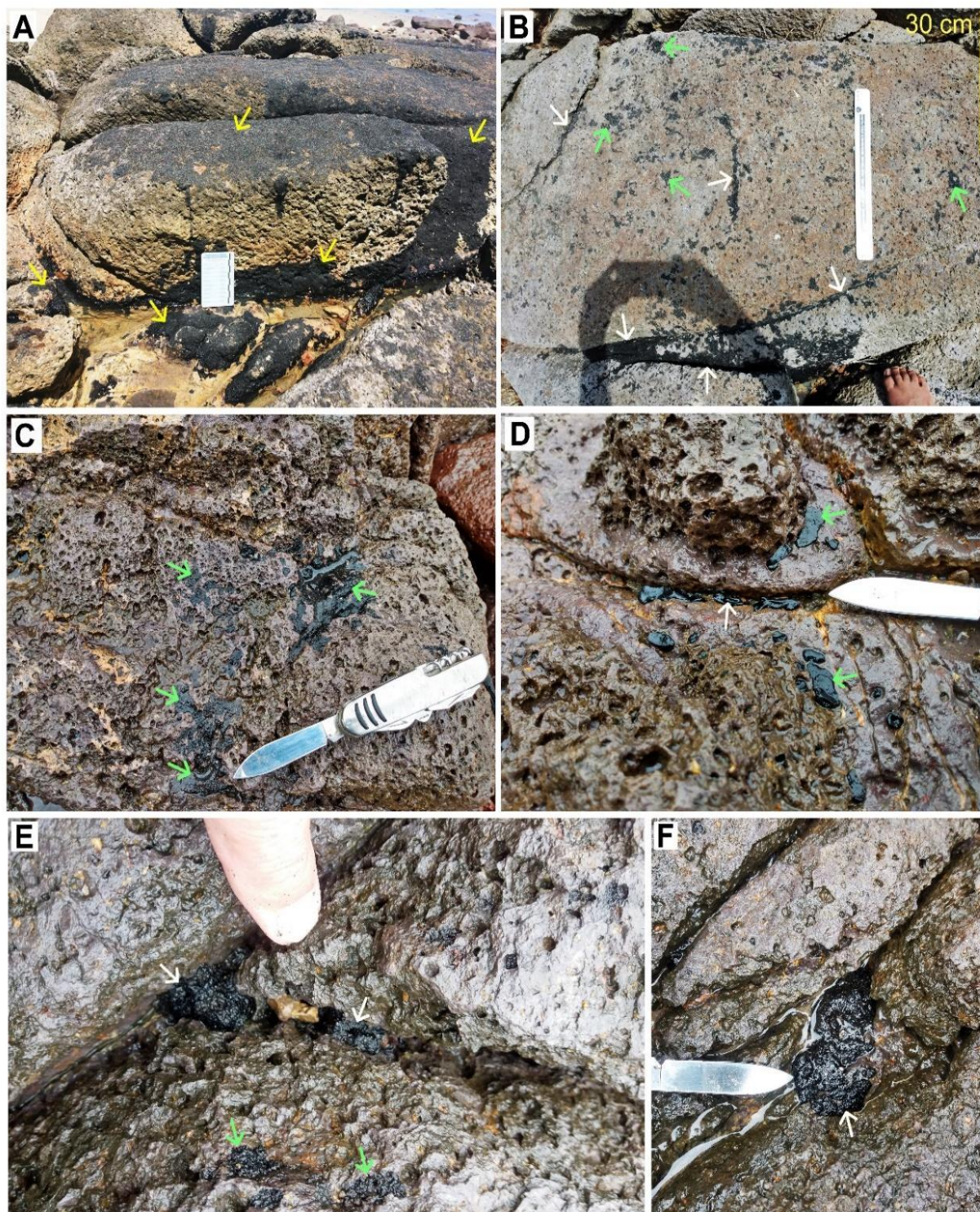


Não foram encontradas *tar balls*, ou *tar patties*, encalhadas nos sedimentos escavados das trincheiras nas estações de amostragem, na costa e na face da costa das praias de areia. A análise dos sedimentos com microscópio portátil não mostrou evidências claras de partículas de *tar residues*, o que necessita de mais estudos.

5.3.2 *Tar residues* incrustados no costão rochoso

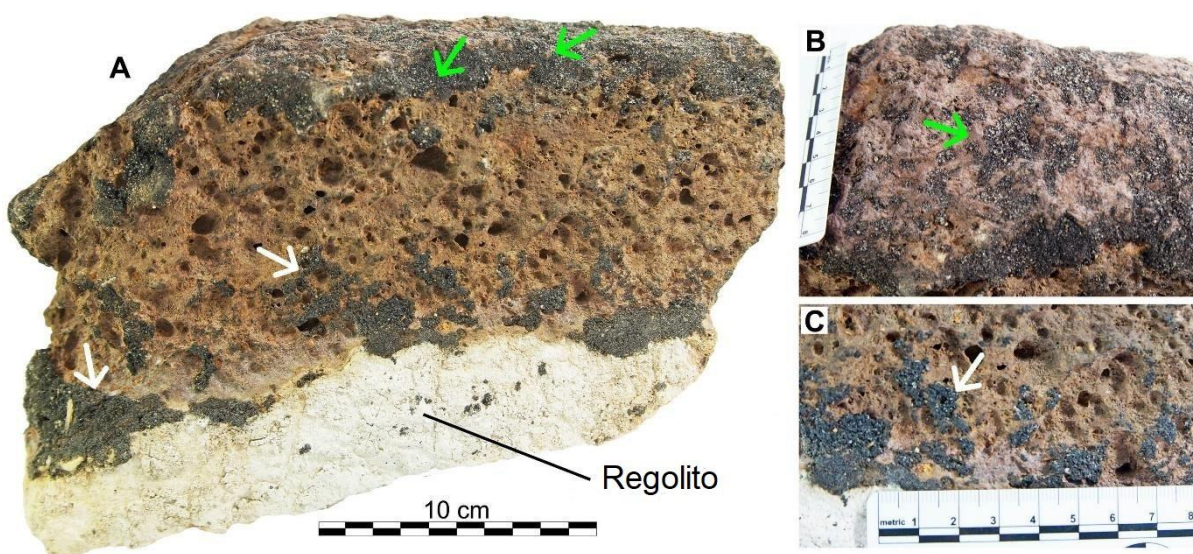
Uma quantidade expressiva de *tar residue* permanece incrustada na superfície das rochas traquíticas no costão rochoso da Praia de Itapuama (Figura 33A a 33F). A incrustação está presente no pós-praia porque só é afetada pela erosão hídrica durante as marés vivas. Este efeito ajudou a reduzir a degradação dos *tar residue* que não são expostos a condições subaquáticas. A maior parte dos *tar residue* remanescentes estão incrustados em fraturas naturais, juntas e nas vesículas das rochas traquíticas (Figuras 33 e 34). Após a degradação inicial, o agregado se misturou aos sedimentos percolados através das fraturas da rocha e vesículas preenchidas (Figura 34C). A superfície externa dos *tar residue* que preenchem as vesículas e fraturas foi intemperizada, apresentando aspecto oxidado. As *tar vesicles* representam um filme de milímetro de espessura que pode ser raspado com uma lâmina de metal (Figura 32F).

Figura 33 - *Tar residues* nas rochas traquíticas da Praia de Itapuama. A) Resíduos de óleo aderidos à superfície das rochas e presos dentro de juntas e vesículas na pós-praia, dezembro de 2019. B) Imagem do pavimento de rocha na parte superior da pós-praia com *tar residue* visíveis presos em fraturas e juntas (setas brancas) e textura vesicular (setas verdes). C) *Tar residues* presos em vesículas (setas verdes) em uma superfície sub-vertical. D) Detalhe de uma superfície horizontal com *tar residue* presos nas juntas (seta branca) e vesículas (setas verdes). E e F) *Tar residues* presos nas juntas (seta branca). A quebra do material permite que o contaminante se infiltre profundamente nas juntas da rocha. As fotos C a F foram tiradas em janeiro de 2021.



Amostras mesoscópicas coletadas para análise mostraram que os *tar residues* percolaram profundamente as juntas (Figura 34). O alargamento natural das vesículas por processos meteóricos criou cavidades de até 40 mm e conexões entre as cavidades que foram preenchidas por *tar residues* (Figura 34). Essas vesículas dentro das juntas ajudam a proteger os *tar residues* do intemperismo subaéreo. A lixiviação desse material continuará a liberar contaminantes por mais tempo do que o material exposto nas praias.

Figura 34 - Amostra de rocha mesoscópica coletada dos afloramentos da Praia de Itapuama em dezembro de 2019. A) Imagem de uma face de junta. B) A figura mostra que o contaminante incrustou as vesículas nas superfícies externas dos afloramentos (setas verdes - topo), C) e percolou pelas juntas, criando acúmulos em seus contatos (setas brancas). A parte esbranquiçada da amostra marca a zona enterrada (inferior) que foi lixiviada e alterada.



A raspagem do *tar* incrustado nas vesículas revelou que o interior do filme apresenta aspecto brilhante e consistência viscosa, o que sugere um estado menos alterado do material, protegido nas cavidades das vesículas (Figura 35A e 35B). A análise dos *tar residues* raspados dos traquitos sob a luz ultravioleta usada mostrou a pequena assinatura de hidrocarbonetos leves, o que indica a degradação de alto grau do material (Figura 35I a 35K). A análise microscópica comparativa de *tar residues* raspados das rochas (Figura 35C e 35D) e

tar balls encontrados nas praias de areia (Figura 35E e 35F) mostraram que, aparentemente, as *tar balls* apresentam menor conteúdo siliciclástico.

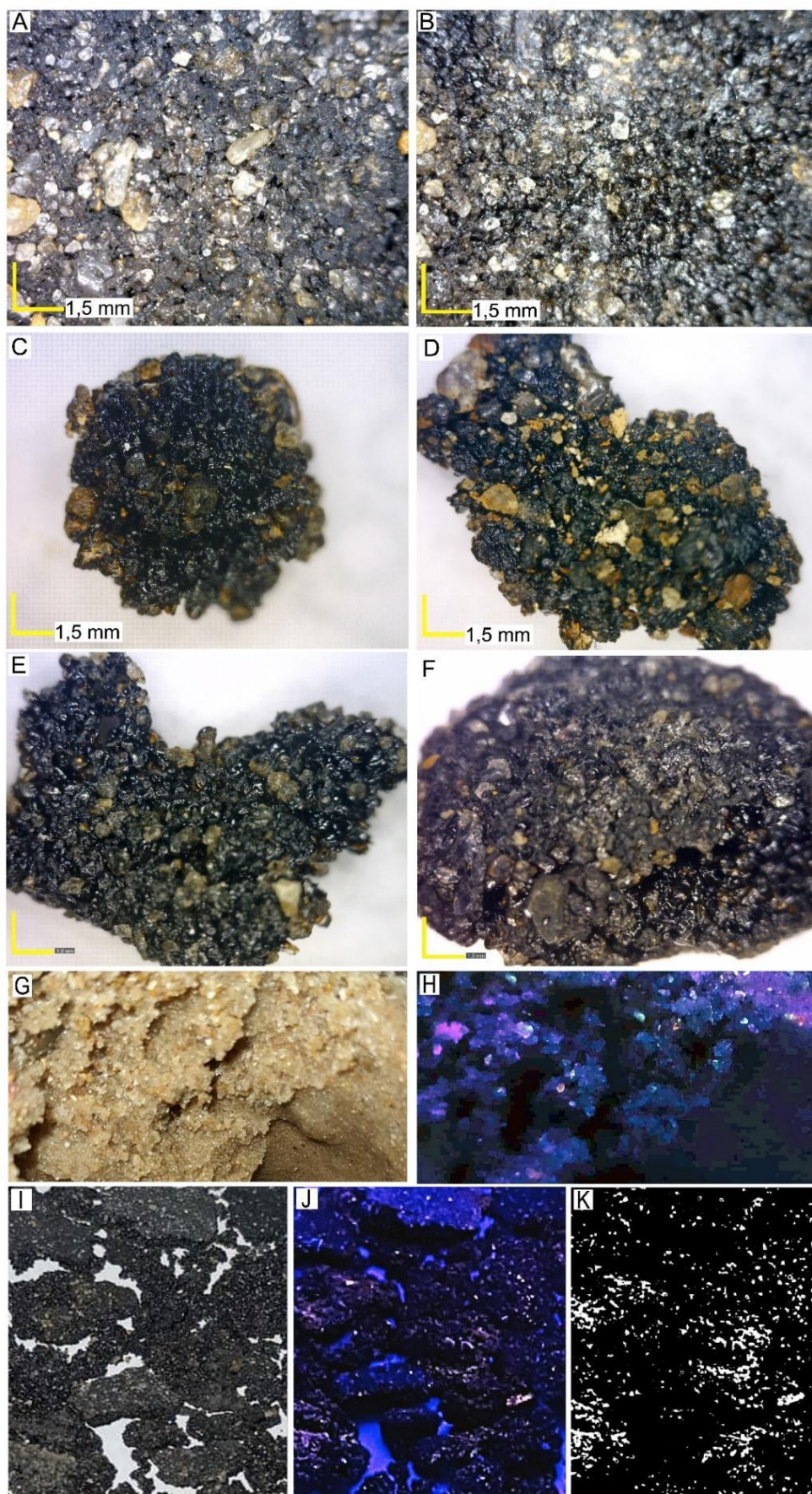
A análise sedimentológica mostrou que as praias apresentam fácies areia litoclástica (AL1b) (Larsonneur, 1977), e a textura varia de areia fina a média, moderadamente selecionada (Folk e Ward, 1957). Os sedimentos apresentam baixos teores orgânicos e estão sujeitos a altíssima hidrodinâmica (IVa) de acordo com o diagrama de Pejrup (1988). Estes sedimentos de praia são essencialmente compostos por areias, cujos teores variaram de 99,46 a 100,00% (média: 99,87 +/- 0,21%). Partículas de cascalho e lama são observadas apenas no perfil da praia de Itapuama, com 0,44% de cascalho e 0,10% de silte na estação 2B; e 0,03% (cascalho) e 0,34% (silte) na estação 2C. Siltes também foram observados nas estações 1A e 1B, no perfil de Paiva, representados por teores extremamente baixos, 0,10% e 0,03%, respectivamente. O teor de argila está ausente nas amostras coletadas, no período do outono.

Os parâmetros geoquímicos dos sedimentos, como os teores de carbonato de cálcio, são baixos e variaram de 2,9 a 8,4%, com média de 4,6% +/- 2,2%, e são classificados como litoclásticos (Larsonneur et al., 1982). O teor de Matéria Orgânica Total (MOT) e o conteúdo estimado de Carbono Orgânico Total (COT) (Allen, 1974) variaram de 0,43 a 3,30% (média: 1,39 +/- 0,85%) e de 0,25 a 1,00% (média: 0,80 +/- 0,49%), respectivamente. Essas faixas de concentração são baixas e típicas de ambientes de faces de praia altamente dinâmicos. Embora se observe na praia do Paiva (estação 1B) um valor relativamente enriquecido (3,30%) de MOT e COT (1,00%), mas também considerado por Romankevich (2013) como de baixo teor (<2% COT).

O caráter sedimentar destas praias de areia está diretamente relacionado à natureza dos aportes fluviais de sedimentos terrestres costeiros e ao padrão de distribuição. A fácies de plataforma predominante é dominada por sedimentos biogênicos de areia e cascalho mal classificados, com baixos teores de matéria orgânica (Barcellos et al., 2020). A fácies de areia da praia rica em quartzo que predomina na orla é o resultado da mistura de sedimentos ribeirinhos e relíquias da plataforma, constantemente retrabalhados pela ação das correntes litorâneas locais. Esses processos mantêm esses depósitos siliciclásticos arenosos ao longo da

costa e da plataforma interna (Manso et al., 2018), e a mistura com lamas terrígenas (Larsonneur et al., 1977) ocorre perto da foz do rio (Barcellos et al., 2020).

Figura 35 - A e B) Fotos dos *tar residues* aderidos nas vesículas da amostra mostrada na Figura 29. A) superfície do material oxidado e intemperizado, e B) aspecto interno após a remoção mecânica da superfície do resíduo incrustante, que está internamente melhor preservado. O material que recobre as rochas é intensamente misturado a grãos de minerais siliciclásticos e fragmentos de rocha. C e D) *Tar residue* removido das vesículas. E e F) *Tar balls* coletadas na Praia da Enseada, janeiro de 2021. Este material é macio e viscoso, e os fragmentos possuem menor conteúdo de grãos clásticos e biogênicos. A superfície é menos oxidada e intemperizada do que a observada para os *tar residues* nas rochas expostas. G e H) Fotos com luz visível e luz ultravioleta de amostras de areia coletadas na Estação 3, Praia da Enseada. Nenhuma fluorescência relacionada a hidrocarbonetos foi detectada, apenas fluorescência relacionada a materiais biogênicos. I, J e K) Imagens de *Tar residues* removidos das rochas. Luz visível, imagens de luz ultravioleta e processamento de contraste para destacar as áreas fluorescentes detectadas. A análise sugere luminescência relacionada a *tar residues* muito alterados.



5.4 AVALIAÇÃO MAPEAMENTO DOS RESÍDUOS DE ÓLEO NO COSTÃO ROCHOSO COM O APOIO DE VANT / DRONE

Neste trabalho foi realizado um levantamento de imagens do costão rochoso da Praia de Itapuama, e a posterior modelagem de feições que permitiram a infiltração e preservação do contaminante nesta área. Feições como densidade de fraturamento e declividade permitiram definir áreas mais susceptíveis ao cúmulo e manutenção do contaminante com baixo custo e elevado nível de precisão. Desta forma demonstra-se uma aplicação do uso de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) para o acesso de risco a contaminação e do impacto prolongado do desastre.

A análise dos dados permitiu definir que o fraturamento do maciço rochoso apresenta dois principais trends de estruturas, um dominante NW-SE, e um secundário NE-SW (Figura 36A). As fraturas apresentam variada gama de aberturas na rocha preservada de submilimétrica até fraturas de 20 mm de abertura. Entretanto, as fraturas expostas na superfície rochosa passam por erosão intensa e sua abertura aparente pode chegar a apresentar de alguns centímetros a dezenas de centímetros. Como demonstrado na Figura 33, o contaminante percolou nestas fraturas e ficou preservado da erosão marinha e ação do intemperismo. O resíduo também aderiu à superfície das rochas e preencheu cavidades formadas pela erosão (vugs) marinha. Na Figura 36 é possível observar o padrão de fraturamento (linhas pretas), e a análise da densidade de fraturas por área. Também pode ser possível verificar a existência de áreas com maior densidade, formando corredores alinhados na direção NW-SE.

Na Figura 37 tem-se representada a estimativa de declividade das superfícies que compõem o pavimento rochoso e parte da encosta rochosa. As cores iniciando em azul forte (0-10) a verde claro (40-50) indicam locais onde a superfície apresenta baixo ângulo de inclinação, circundadas por áreas de coloração vermelho a marrom que indicam as escarpas do afloramento e as fácies dos planos de fraturas erodidos (Figura 37). Para melhor representação das inclinações da Figura 37 o critério de cores segue o padrão crescente de comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

No trabalho de campo foi possível constatar que a região de maior densidade de fraturas apresenta maior concentração de contaminante. Além disso, os locais com os blocos compartimentados pelas fraturas apresentam superfície (topo) com baixo ângulo (Figura 38), como também apresentam maior tendência de manutenção do contaminante do que as fácies de alto ângulo das escarpas expostas do afloramento, e do que as superfícies inclinadas das fraturas erodidas com aberturas alargadas (Figuras 33 e 38). Este fato está relacionado com a textura irregular das superfícies das rochas e a presença de vugs (Bontempo Filho et al., 2022).

Figura 36. A) Mapeamento digital dos planos de fraturas e falhas (linhas pretas), e cálculo da densidade de fratura por área (P20). B) Mapa das regiões com maior densidade de fraturamento no pavimento rochoso exposto na praia.

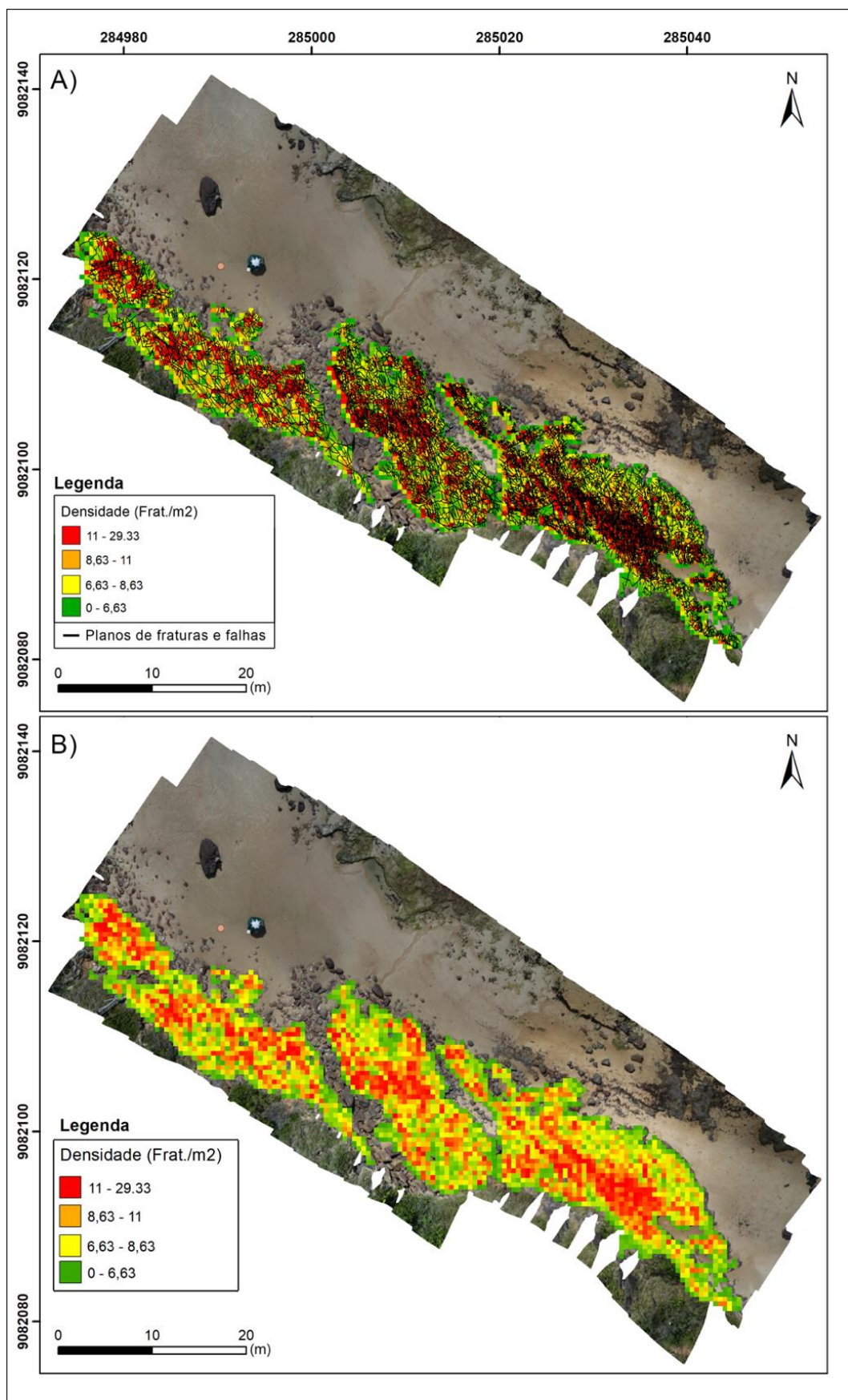


Figura 37 - Mapas onde se tem A) a sobreposição dos traços de falhas e fraturas sobre o mapa de declividade das superfícies modeladas. B) declividade onde se observa intensa compartimentação do pavimento rochoso e a formação de blocos com superfícies de baixo ângulo (cores azuis a verde-claro). As setas em preto indicam os locais onde ocorre maior concentração de superfícies de blocos com baixo ângulo de inclinação horizontal e maior densidade de fraturas.

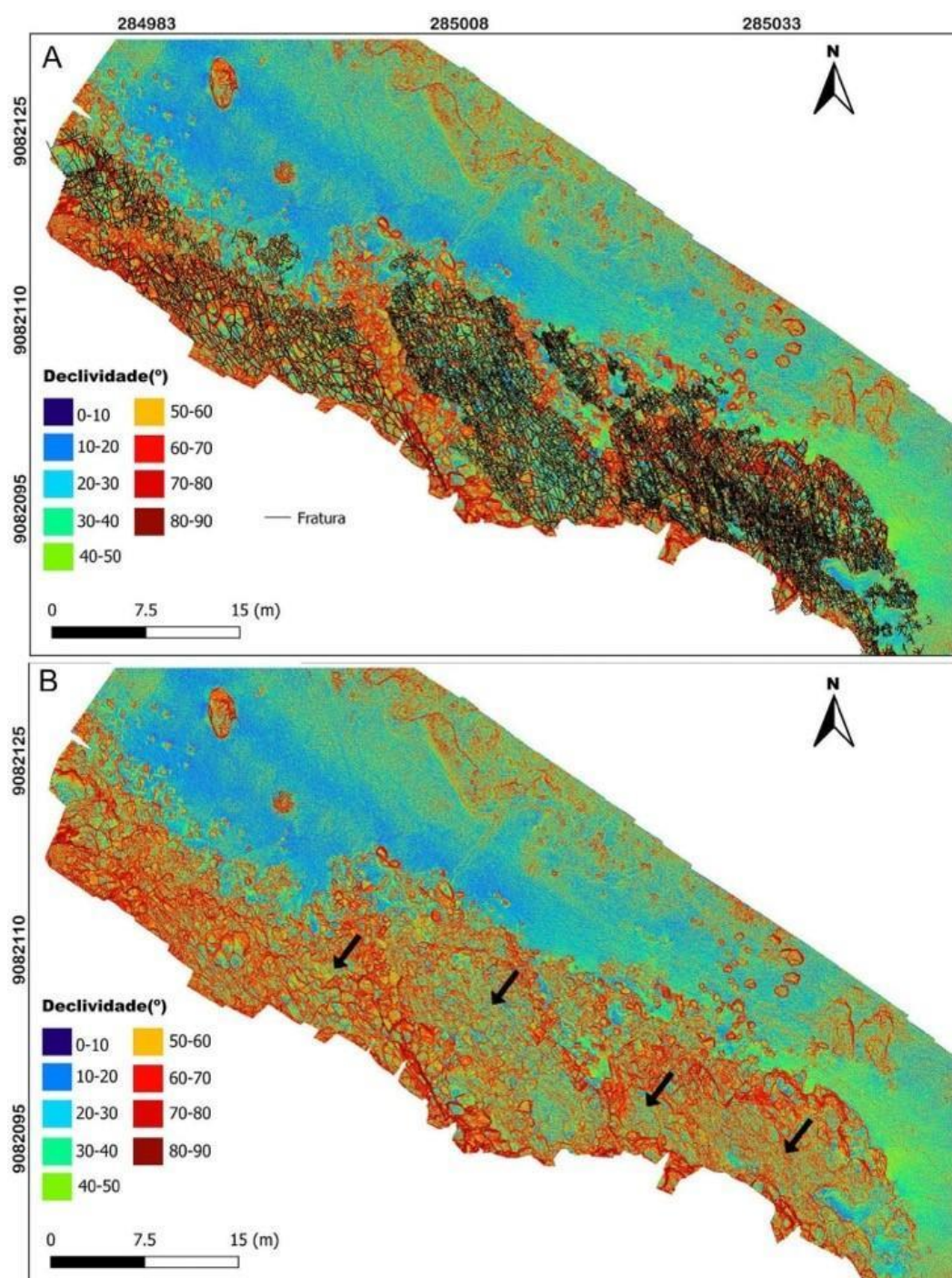
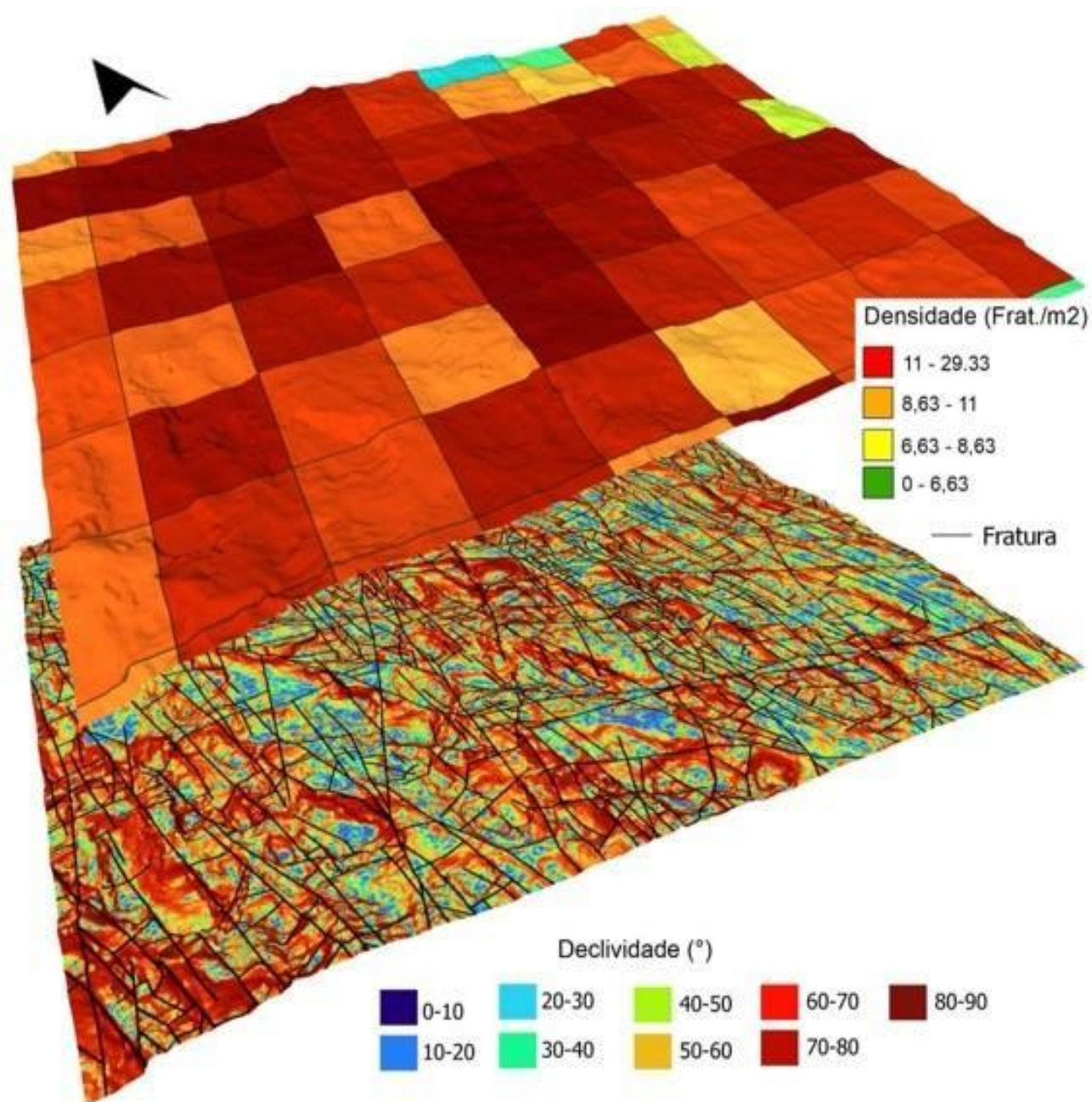


Figura 38 - Detalhe de uma parte do modelo apresentando zonas de maior risco de manutenção do contaminante, criada a partir da integração de mapas de declividade com os traços de fraturas e falhas (inferior), e mapa de densidade de fraturas em uma malha que pode ser redimensionada para um grid de maior espaçamento.



5.5 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO UTILIZANDO O MÉTODO RESISTIVO CAPACITIVO (RC)

Conforme mencionado anteriormente, nos testes nas praias foi utilizado o método Resistivo Capacitivo (RC) com o equipamento OhmMapper para confirmar a inexistência de óleo nos locais afetados pelo derramamento de óleo, já que os métodos diretos faziam análises apenas em alguns pontos das praias. Assim, com o OhmMapper, foram programadas linhas de varredura entre 150 e 200 metros de comprimento e uma distância de 10 metros entre as linhas.

Os testes foram realizados nas 3 praias (Paiva, Itapuama e Enseada dos Corais) onde o vazamento chegou em quantidades significativas. Foram 3 linhas de levantamento na Praia de Itapuama, 3 na Praia do Paiva e 2 na Enseada dos Corais. Como o ambiente de praia é extremamente condutivo, os parâmetros de aquisição que se mostraram mais adequados foram com o conjunto de cabos de 10 metros. Os parâmetros foram cabos dipolo de 10 metros, dois receptores e distâncias de corda não condutora de 1,25 e 2,5 metros, suficientes para investigar os sedimentos até uma profundidade máxima de cerca de 4 metros. Como a espessura do sedimento retrabalhado pelas marés na região é estimada em 1 metro, essa configuração permitiria a investigação da região de possível ocorrência de resíduos.

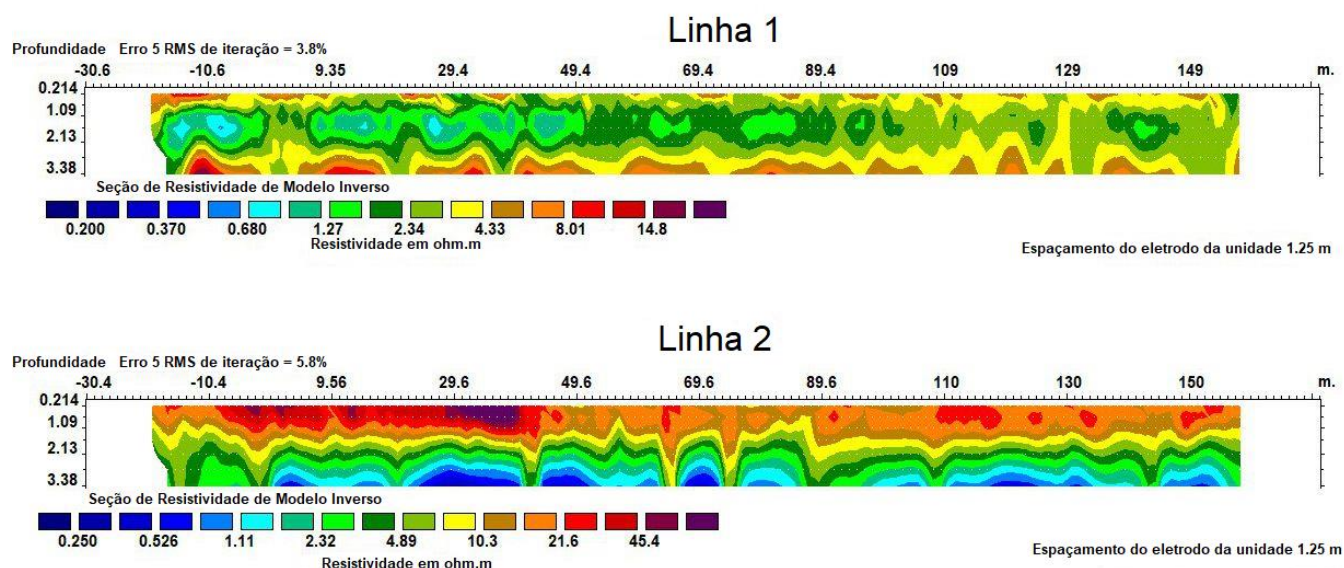
Como exemplo, duas linhas de levantamento CR foram realizadas na praia da Enseada dos Corais, de norte a sul, separadas por 10 metros (Figura 39). Os resultados preliminares são apresentados na Figura 40. A linha 1 mostra uma camada de areia insaturada na parte mais superficial com resistividade superior a 5 ohm.m, seguida por uma zona mais condutora devido à influência da resistividade da água do mar. Na posição mais baixa do perfil existem zonas de resistividade ligeiramente mais elevadas (entre 5 e 14 ohm.m) que podem estar relacionadas com camadas de areia mais compactadas ou presença de *beachrocks*. Na Linha 2 a parte da superfície é um pouco mais resistiva quando comparada a todas as outras seções, principalmente entre 25 e 40 metros, onde os valores de resistividade chegam a 50 ohm.m. Embora esses valores sejam um pouco maiores, eles não parecem estar relacionados à contaminação, pois ocorrem na superfície, onde não foi observada a presença de óleo. Junto a

esta camada ocorre a zona de areia saturada com água salgada, com resistividades inferiores a 5 ohm.m.

Figura 39 - Duas linhas de levantamento RC realizadas na praia da Enseada dos Corais, de norte a sul, separadas por 10 metros.



Figura 40 - Resultado preliminar das Seções de Resistividade de Modelo Inverso realizadas na praia de Enseada dos Corais.



5.6 DISCUSSÃO

O derramamento de óleo que afetou a costa nordeste do Brasil reanimou a apreensão causada por acidentes semelhantes envolvendo derramamento na história recente, como o petroleiro Exxon Valdez no Alasca em 1989 (Shigenaka, 2014), e a plataforma Deepwater Horizon no Golfo do México em 2010 (Parham e Gundlach, 2015). Informações sobre a quantidade e a natureza do contaminante que lavou na costa brasileira, bem como sua evolução no meio ambiente nos próximos anos, são necessárias para entender melhor o impacto de longo prazo e os efeitos remanescentes da contaminação. Isso ajudará a comparar a contaminação do petróleo brasileiro com outros desastres. O presente trabalho fornece uma análise qualitativa de uma pequena faixa costeira com uma diversidade geológico-morfológica complexa que foi altamente afetada pelo derramamento de óleo.

O acidente do Exxon Valdez liberou aproximadamente 35.500 toneladas de petróleo bruto no oceano, que atingiu principalmente a região de Prince William Sound e se espalhou por 2.100 km de costa (Nixon e Michel, 2018). Após 31 anos desde o acidente, estudos que continuam a ser produzidos por agências governamentais e instituições de pesquisa mostram

que os danos ambientais persistem no Golfo do Alasca, principalmente na região de Prince William Sound. A persistência dos contaminantes do óleo (compostos tóxicos) em ambientes costeiros, mesmo após décadas da ocorrência do desastre, são discutidos por Gundlach et al. (1983), Guterman (2009), Peterson et al. (2003) e Schrope (2010, 2011). O derramamento causou impregnação na superfície dos corais, pássaros e moluscos e mortalidade massiva de alguns grupos críticos. As impregnações causadas por mantas de óleo em sedimentos de praias arenosas podem reaparecer na superfície por décadas após a contaminação (Payne et al. 2008). As impregnações causadas por mantas de óleo em sedimentos de praias arenosas podem reaparecer na superfície por décadas após a contaminação (Payne et al., 2008). Em apenas um ano de trabalho de limpeza na região de Prince William Sound, a Exxon Corporation removeu mais de 30.000 toneladas de petróleo bruto (Piper, 1993), que custou mais de dois bilhões de dólares e dois milhões de horas de trabalho (Rice et al., 2007). No entanto, Wolfe et al. (1994) estimaram que menos de 20% do volume inicial derramado naquela região foi removido. Lindeberg et al. (2018) confirmou que 26 anos após o acidente do Exxon Valdez a presença física desta contaminação continua. No caso do Alasca, a morfologia e as características geológicas da costa revelam-se fatores críticos para a maior persistência do contaminante. O óleo atingiu as praias protegidas de cascalho de grão grosso de William Sound, que apresentam substratos estáveis blindados. O óleo que percolou a superfície blindada e impregna sedimentos ainda estava presente no ambiente em profundidades superiores a 0,25 m, em praias com blindagem estável dezoito anos após o acidente (Mitchel et al., 2010). Nixon et al. (2013) apontaram para a influência de fatores geomórficos, permeabilidade do substrato, baixa exposição às ondas e blindagem em praias graves como motivadores da persistência de óleo em subsuperfície. Lindeberg et al. (2018), sugeriram que após 14 anos do derramamento há poucas evidências de mudança na distribuição das intensidades de oleosidade ou na localização das zonas contaminadas nas praias de William Sound. Os estudos do autor mostraram óleo remanescente em 8 dos 9 locais revisitados desde o acidente e que a permanência do óleo sequestrado em sedimentos e protegido de lavagens hidrológicas, em condições subterrâneas rasas de baixo oxigênio inibiu a biodegradação. Essas condições certamente farão com que o contaminante persista no meio ambiente por décadas.

A explosão da Deepwater Horizon resultou no derramamento de 22.000 toneladas de óleo na costa nordeste do Golfo do México, estimado em 965 km de praias de areia poluídas. Bociu et al. (2019) realizaram um experimento *in situ* de três anos e pesquisas para quantificar a decomposição temporal dos aglomerados de sedimentos de óleo resultantes (*tar balls*) na Flórida enterrados nos 0,50 m superiores de praias arenosas. O monitoramento dos parâmetros químicos e da resposta de fluorescência mostrou que *tar balls* enterradas de até 60 mm de diâmetro levariam aproximadamente 30 anos para se decompor. Eles mostram que as *tar balls* enterradas profundamente nas areias da praia se decompõem através da rápida degradação do óleo microbiano na areia da praia permeável com ventilação maré, o que, de acordo com os autores, enfatiza o papel da praia como um reator biocatalítico aeróbio. Parham e Gundlach (2015) estudaram a evolução sedimentar de agregados óleo-areia do derramamento Deepwater Horizon em praias arenosas do Golfo do Norte do México. Segundo esses autores, as condições de ondas e marés altas resultaram em deposição de óleo na zona de supramaré e soterramento em profundidades de até 1 m, que produzem grandes volumes de agregados óleo-areia. O efeito das variações sazonais do nível de água (verão) e da energia ondulante, combinadas com as tempestades e a dinâmica da sobre lavagem, retrabalharam o óleo enterrado / encalhado. Exposição subsequente causada pela hidrodinâmica de praia de agregados de areia e óleo enterrados, potencializou sua rápida degradação por meio do intemperismo *in situ* e desagregação em condições de superfície, subsuperfície e subtidais. O autor enfatiza que a energia de ondas contínuas / sobre lavagem e intemperismo serão eficazes para a quebra de resíduos remanescentes de longo prazo.

Em relação à etnologia dos diversos tipos de agregados sedimento-óleo (Gustitus & Clement, 2017), sugerimos que o material encontrado nas praias estudadas pode ser classificado como *tar residues* (*tar balls* - *tar aggregates*), formados devido à erosão de areias oleaginosas em praias poluídas por óleo pesado (Warnock, 2015). No entanto, parte dos resíduos deixados possivelmente tenham formado *tar balls* pelágico, resultantes da mistura do óleo afundado e seu arrastamento em sedimentos que foram posteriormente retrabalhados e lançados em terra. Consideramos os resíduos encontrados aderidos às rochas expostas como um tipo de *tar residue* resultante da mistura *in situ* com sedimentos transportados pelo vento e pelas ondas. Este material incrustado não foi o resultado do retrabalho nas praias nem o efeito

de agregados transportados pelágicos. Este tipo de ocorrência de *tar* é pouco descrito na literatura e certamente merece estudos mais detalhados.

As pequenas quantidades de *tar balls* encalhadas encontradas e a aparente ausência de resíduos macroscópicos (*tar patties* e agregados de areia e óleo) até 0,60 m de profundidade nos sedimentos de inframaré e de intermaré sugerem que os processos de intemperismo e degradação potencializados pela alta energia condições foi eficaz para decompor a maior parte do contaminante deixado pela operação de limpeza.

Como fica claro na comparação com outros desastres ocorridos em diferentes ambientes marinhos, alguns parâmetros como energia das ondas, morfologia, clima e geodiversidade, são pontos-chave para o prolongamento da poluição. Processos de erosão-acreção que podem remobilizar grandes volumes de sedimentos possibilitam a biodisponibilidade dos resíduos, bem como sua exposição ao intemperismo. Yim et al. (2020) descreveu a rápida recuperação do derramamento de óleo de Hebei Spirit na costa oeste da Coreia do Sul. O derramamento liberou 10.900 toneladas de três tipos de óleo cru e contaminou 200 km de litoral, afetando gravemente vários ecossistemas. Os autores mostraram que, após dez anos de monitoramento, a concentração de resíduos de óleo na água do mar, sedimentos e ostras caiu rapidamente para os níveis de fundo em 16, 75 e 33 meses, respectivamente. Comunidades bentônicas danificadas entre marés e submarés se recuperaram após seis anos. Yim et al. (2020) mostrou que a mistura de marés altas (~ 9 m) e a operação de limpeza intensiva (~ 1,2 milhões de voluntários) durante o período inicial de contaminação contribuíram para a recuperação rápida, que foi 4-5 vezes mais rápida do que o caso Exxon Valdez.

Os resultados do presente estudo mostraram uma homogeneidade expressiva em termos de composição e padrão de distribuição de fácies nos perfis das praias. É caracterizada essencialmente por areias siliciclásticas com grãos minerais pesados nas praias do Paiva e da Enseada. As características são semelhantes até mesmo na Praia da Enseada, onde o perfil típico é abrigado por uma linha rochosa de praia na orla. Essas características estão de acordo com o padrão já descrito para a Praia do Paiva (Madrugá Filho e Araújo, 2003). Também encontramos componentes marinhos granulares dominados por grãos de carbonato de cálcio e lodos no perfil de Itapuama.

As estações de amostragem na Praia do Paiva permitiram a coleta de amostras de sedimentos na superfície e 1,2 m de profundidade (trincheira) na região da face superior da praia. Esta área foi severamente afetada pela deposição de *oil patties* em outubro de 2020. A análise dessas amostras mostrou que os sedimentos representam areia fina (1A) a média (1B), moderadamente classificada e são predominantemente litoclásticos (> 99,90% de CaCO_3) (Larsonneur et al., 1982). Características faciológicas semelhantes foram relatadas por Madruga Filho e Araújo (2003). Esses autores indicam que a faciologia está diretamente relacionada às flutuações locais da energia das ondas. A análise da composição química dos sedimentos da Praia do Paiva (1,2 a 1,3 m de profundidade) revelou também valores relativamente enriquecidos de MOT (3,30%) e COT (1,00%) para os depósitos arenosos. Este valor inesperado de alta concentração de matéria orgânica pode estar relacionado à decomposição subsuperficial do resíduo de óleo depositado em 2019 antes da deposição dos sedimentos amostrados.

Os resultados permitem considerar que as três praias estudadas estão sujeitas a influências de energia das ondas bastante semelhantes, dominadas por alta hidrodinâmica, conforme indicado por 100% da análise de tamanho de grão (Pejrup, 1988). Holanda et al. (2020) e Lino (2015) classificaram as praias do Paiva e Itapuama como de moderada a alta vulnerabilidade à erosão, de acordo com o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) (Martins et al., 2016). Consideramos os mesmos aspectos para a Praia da Enseada. No entanto, a condição relativamente abrigada e a orientação diferente da Praia de Itapuama são responsáveis pelo maior conteúdo de CaCO_3 e pelas *tar balls* encalhadas encontradas na zona entremarés, o que sugere uma condição hidrodinâmica comparativamente mais baixa.

Lino (2015) e Holanda et al. (2020) descreveram a variação sazonal do perfil do setor que compreende as praias de Paiva e Itapuama e demonstraram que estas praias apresentam efeitos anuais de acreção e erosão com até 1 m de variação vertical, principalmente na zona de espraçamento nos terraços de maré baixa. A erosão da praia aumenta no período de outono-inverno (março a junho) devido à maior energia das ondas. As praias de areia estudadas apresentam perfil convexo durante o verão (dezembro a março) e côncavo no inverno (Manso et al. 2001). No inverno, formam-se patamares de baixa-mar e, no verão, os perfis se moldam para exibir o ritmo barra-e-praia e o estágio barra-e-praia transversal (Praia do Paiva)

(Holanda et al., 2020). Terraços de maré baixa também se formam na Praia de Itapuama durante o inverno (Lino, 2015).

Durante o clímax da chegada do óleo ao litoral, de 17 a 25 de outubro de 2019, os perfis das praias foram erodidos e apresentavam a forma côncava característica criada pela remobilização sazonal da areia. Durante o verão seguinte (dezembro de 2019 a março de 2020), os resíduos de óleo deixados foram soterrados por areias remobilizadas e os perfis das praias mudaram para um formato convexo. Durante o estágio morfodinâmico subsequente do ciclo anual (julho a agosto de 2020), *tar balls* encalhadas na praia surgiram em várias localidades após fortes tempestades que atingiram o litoral. Este material provavelmente que foi enterrado na última primavera-verão foi erodido - exumado e remobilizado pelas correntes das marés.

A análise temporal realizada por Bontempo Filho et al., 2022 permitiu propor que dezessete meses após o início do derramamento, a maior parte dos resíduos nas praias de areia foi degradada pelo intemperismo, influenciados pelas características hidrodinâmicas de alta energia da área. É preciso ressaltar que a enorme mobilização de voluntários na operação de limpeza possivelmente representa o aspecto fundamental para a rápida recuperação das praias, conforme destacado por Wang et al. (2020) e Yim et al. (2020). A energia e a rápida remobilização dos sedimentos representam outro parâmetro chave para uma recuperação mais rápida. Apesar do intemperismo e degradação de resíduos nas praias de areia, a praia rochosa de Itapuama apresenta uma situação diferenciada, com uma quantidade expressiva de *tar residues* remanescentes em incrustação nas rochas. Na atualidade, a ocorrência de *oil patties* enterrados nessas praias provavelmente é rara, mas não podemos descartar essa possibilidade. O principal risco à frente na área de estudo é representado pela exumação sazonal e redistribuição de resíduos encalhados nas praias de areia e lixiviação de resíduos no costão rochoso da Praia de Itapuama.

As informações geradas por esta pesquisa permitiram sugerir um modelo que resume o destino dos resíduos de óleo nas praias estudadas, evidenciando os três estágios temporais para as três praias estudadas (Figura 41).

Estágio 1 - Mostra a extensão da contaminação por óleo na zona intermarés influenciada pela variação das marés e na zona de backshore devido ao espriamento. Não

pesquisamos a zona situada abaixo do nível da maré baixa, e a contaminação remanescente de óleo nesta zona e na plataforma interna não é clara. A operação de limpeza removeu a maior parte do óleo que chegou à costa. O derramamento de óleo ocorreu durante o processo sazonal de erosão de areia nas praias (Figura 41).

Estágio 2 - Os resíduos remanescentes misturaram-se com o sedimento e formaram agregados óleo-areia, que foram soterrados pelo subsequente processo sazonal de mobilização de areia nas praias (acrecção) (Figura 41). O rápido desgaste e degradação foram impulsionados pela alta permeabilidade e oxigenação do substrato.

Estágio 3 - Esta etapa representa o primeiro período de verão após o derramamento. Os resíduos de óleo encalhados nas praias arenosas foram exumados e retrabalhados. Bolotas de hidrocarboneto encalhadas são evidências da persistência dos contaminantes. Não se prevê encontrar nestas praias grandes quantidades de resíduos de hidrocarboneto. No entanto, os resíduos de hidrocarboneto incrustados nas fraturas e vesículas da praia rochosa (Itapuama) estão protegidos da erosão marinha e persistem com tempo evidenciando um risco (Figura 41).

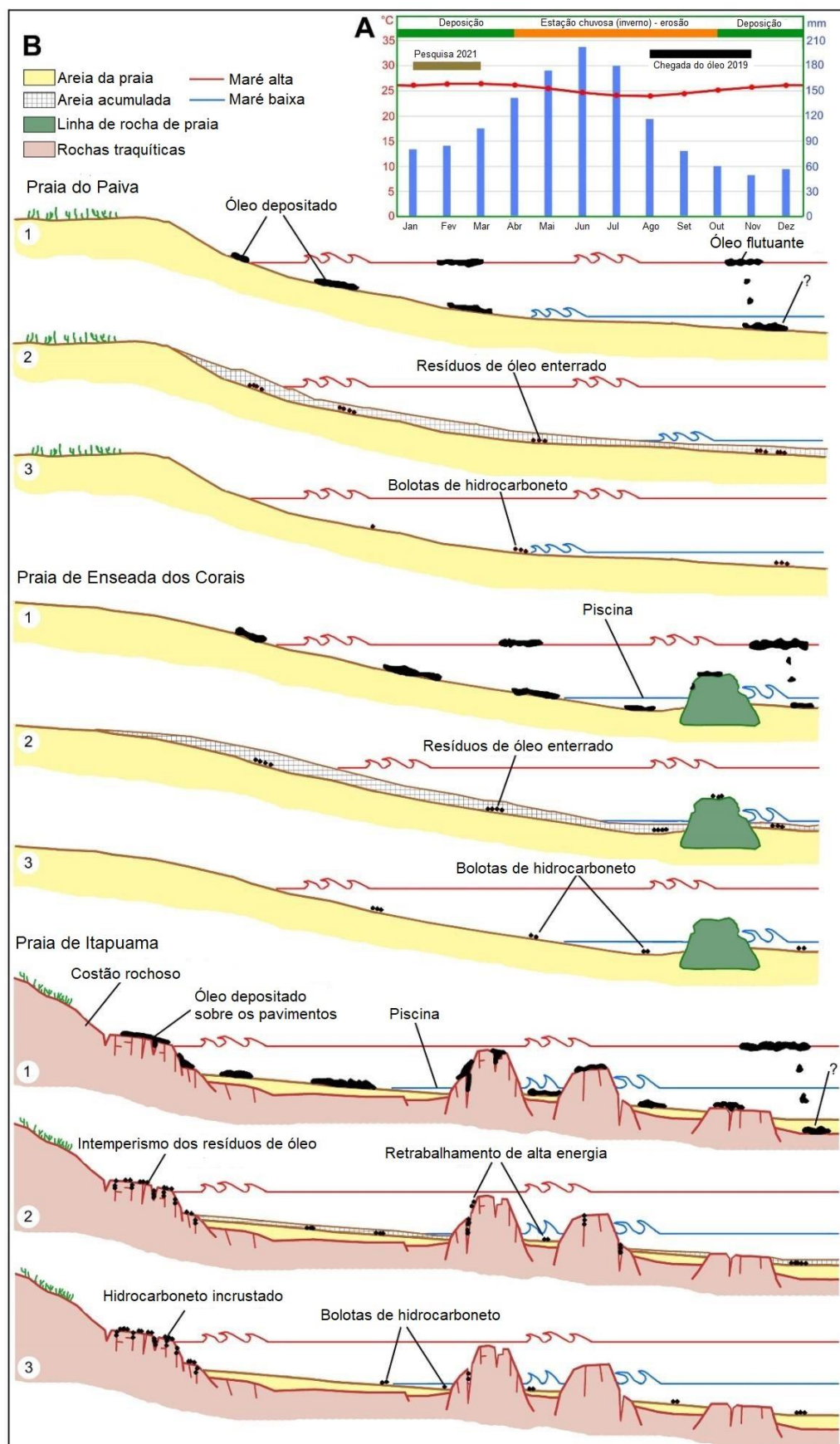
Com relação à elaboração do modelo digital por Somenzi et al., 2022, ela permitiu definir a razão entre a área mais susceptível de manutenção do contaminante em toda a área do afloramento estudado (Figura 38). Uma vez que padrão de reconhecimento de feições lineares pode ser reconhecido e calibrado para um processo de reconhecimento automático, esta metodologia, para a verificação de áreas que potencialmente vão permanecer com o contaminante por período mais longo, poderia ser aplicada a áreas maiores, afloramentos em ilhas e em encostas litorâneas em que não se permite o acesso. Esta também pode ser aplicada a superfícies de afloramentos contaminados que constituem encostas verticais rochosas, e suas componentes subverticais e horizontais.

A utilização de modelos digitais de encostas gerados a partir do uso de drones pode ser aplicado na inspeção de encostas rochosas, na avaliação de queda de rochas, no colapso de encostas e de paredões rochosos. Neste trabalho foi utilizado como principal método para providenciar recursos para avaliação do impacto de longo prazo da contaminação por resíduos de hidrocarbonetos em uma encosta rochosa. A calibração do modelo criado pode permitir a

ampliação de sua aplicação para áreas de grande extensão, nas quais não é possível o acesso de técnicos e equipamentos.

É importante ressaltar que métodos geofísicos foram sugeridos para estender a investigação como estratégia de pesquisa capaz de escanear rápida e continuamente o ambiente subsuperficial da praia para a ocorrência de resíduos de óleo. Para responder a essa questão, foi necessário utilizar uma metodologia capaz de realizar uma varredura contínua do ambiente. A prospecção geofísica foi utilizada como método complementar aos estudos anteriores. O estudo utilizou o Método de Resistividade Capacitiva para avaliar as praias impactadas onde foram realizadas investigações prévias. Os resultados preliminares de todas as seções realizadas confirmaram a inexistência de óleo nos locais afetados pelo derramamento de óleo, já que os métodos diretos faziam análises apenas em alguns pontos das praias serão apresentados. E serão publicados em um artigo científico em breve.

Figura 41. Modelo esquemático de óleo evolução da contaminação. a) Climografia com temperaturas médias mensais (vermelho) e precipitação (azul) para Cidade do Cabo de Santo Agostinho (fonte: climatedata.org/Copernicus Climate change Services. Os dados meteorológicos foram coletados entre 1999-2019). A estação chuvosa (inverno) marca o período de erosão sazonal. b) A proposta dos três estágios para a evolução dos resíduos de hidrocarboneto nas praias estudadas. 1- Deposição do óleo. A variação das marés permitiu que os contaminantes chegassem ao *foreshore* e partes da zona de backshore. Esta etapa ocorreu após o período erosivo, quando as praias arenosas apresentaram um perfil côncavo. 2 - Resíduos deixados após a operação de limpeza foram retrabalhados e enterrados devido ao processo de alta energia da remobilização da areia. Nesse período, os resíduos de hidrocarboneto sofreram intemperismo intenso (químico, mecânico, bioquímico) e decomposição. 3- A etapa erosiva seguinte permitiu a exumação de agregados óleo-areia (bolotas de hidrocarboneto encalhadas). A meteorização dos resíduos de óleo incrustados no costão rochoso teve uma evolução diferente, o que impediu a sua degradação.



6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1 CONCLUSÕES

A presente pesquisa, mostrou que a operação de limpeza imediata e massiva apoiada por voluntários removeu a maior parte dos resíduos de óleo depositado nas praias arenosas estudadas. Esse foi o aspecto crucial para a rápida recuperação observada nesta pesquisa. Os resíduos de óleo remanescentes misturados à areia deram origem a pequenas quantidades de agregados areia-óleo, soterrados e intensamente retrabalhados nas praias e eventualmente exumados no processo sazonal de remobilização da areia nos perfis das praias. A rápida degradação e quebra desses agregados foram potencializadas pelo ambiente de alta energia (marés), parâmetros climáticos e boas condições de permeabilidade / oxigenação dos substratos. Após quatorze meses do derramamento, as poucas *tar balls* encalhadas em superfícies duras ou ainda remobilizadas na superfície são a evidência da persistência de resíduos nas praias, que tendem a diminuir rapidamente nos próximos anos. Os *tar residues* formados nas rochas da praia de Itapuama sofreram uma evolução diferente devido à proteção criada pelo substrato, que provavelmente persistirá por mais tempo do que o esperado para os resíduos nas praias arenosas.

O uso de plataforma de aquisição de imagens (VANT), viabilizou a criação de modelos digitais detalhados do terreno, e esta representa uma alternativa relevante para avaliação ambiental e de riscos geológico-geotécnicos associados a desastres como o caso estudado. A modelagem do afloramento composto pelo pavimento e encosta rochosos integrada a inspeções de campo permitiram definir um critério que possibilita avaliar o risco de contaminação e de retenção do contaminante por longo período. Foi possível identificar áreas que apresentam maior densidade de estruturas (falhas e fraturas), e que apresentam também menor inclinação das superfícies dos compartimentos fraturados. Estas tendem a acumular e proteger o contaminante do processo de degradação natural pela erosão marinha e o intemperismo.

A aquisição de dados de resistividade em seções contínuas escaneou os locais, de forma que se houvesse resíduos de óleo a resposta sensível do método mostraria zonas de alta resistividade, conforme previsto pelos estudos de modelagem. Os resultados preliminares de

todas as seções realizadas não mostraram anomalias de alta resistividade. Os valores de resistividade variaram de 0,2 a 18 ohm.m, confirmando que não há mais resíduo de óleo soterrado. Esta constatação confirma a hipótese de que provavelmente a resposta rápida que removeu a maior parte dos poluentes e reduziu a contaminação remanescente combinada com a degradação da maior parte do material residual devido ao ambiente de alta energia que caracteriza estas praias, resultou numa recuperação dos ambientes praias estudado.

Conclui-se que características morfológicas, diversidade geológica e parâmetros dinâmicos são revelados como fatores-chave para compreender criticamente o destino dos resíduos de óleo em regiões costeiras que se enquadram nas características das praias estudadas.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Esta tese teve o intuito de abordar o maior desastre ambiental do litoral brasileiro ocorrido em 2019, analisar temporalmente a contaminação por óleo, com foco no controle e resposta exercida pela geodiversidade local no processo de permanência desse contaminante. Por conseguinte, sugere-se que mais estudos sejam realizados na zona de inframaré e na plataforma interna adjacente. A coleta de sedimentos da superfície e subsuperfície pode mostrar o nível de persistência de resíduos nessas áreas. É também fortemente recomendado continuar a investigar as praias com novas campanhas de escavação no terreno e monitoramento, especialmente dos contaminantes nas superfícies rochosas, para verificar a persistência de resíduos e agregados de hidrocarboneto e compostos tóxicos disseminados associados a hidrocarbonetos degradados. Outros estudos precisam considerar a caracterização química dos resíduos oleosos encontrados nessas praias para descartar confusões de contaminantes produzidos por navios que navegam próximo à zona litorânea devido ao intenso tráfego relacionado ao porto do Complexo SUAPE.

É importante destacar que após três anos do desastre de 2019, diversas localidades no litoral do nordeste brasileiro voltaram a registrar o aparecimento de novos vestígios de óleo. Só no Estado de Pernambuco, mais de 400 quilos de material foram achados em 12 municípios desde 25 de agosto de 2022, segundo a Agência Estadual de Meio Ambiente do Estado de Pernambuco (CPRH). Porém, segundo a Marinha do Brasil, os vestígios de óleo

achados nas praias são de um "novo incidente" e não têm relação com as manchas que chegaram na costa da região em 2019. A partir das análises de amostras dos resíduos de óleo, há indicação de que houve um novo evento, cuja hipótese mais provável aponta para um incidente envolvendo petróleo cru, produzido no Golfo do México, proveniente do descarte de água oleosa lançada ao mar, após a lavagem de tanques de navio petroleiro, em alto mar. As análises foram conduzidas pelo Laboratório de Compostos Orgânicos em Ecossistemas Costeiros e Marinhos (OrganoMAR), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE); pelo Centro de Excelência em Geoquímica, Petróleo, Energia e Meio Ambiente (Lepetro/IGEO), da Universidade Federal da Bahia (UFBA); e pelo Laboratório de Geoquímica Ambiental Forense (LGAF) do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), da Marinha do Brasil, que é a unidade oficial da autoridade marítima brasileira, para realização de investigações de origem de incidentes deste tipo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, D.M. 1974. The relationship between variable selection and data agumentation and a method for prediction. *technometrics*, 16(1), 125-127.
- ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B.B., FUCK, R.A. Províncias Estruturais Brasileiras. In: Simpósio de Geologia do Nordeste. Campina Grande, 1977. Atas. Campina Grande, SBG/NE, p. 363-391, 1977
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sciences Review*, 17: 1–29, 1981.
- ALVES, M. A. S.; MARQUES, R. F. C.; OYAMA, M. D. Detecção de DOL a partir de filtros temporais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008, São Paulo. Anais... São Paulo: CBMET, 2008.
- ANP. 2012. INVESTIGAÇÃO DO INCIDENTE DE VAZAMENTO DE PETRÓLEO NO CAMPO DE FRADE. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, p. 71.
- ANP. 2016. Exsudação e subsidência ocorrida no Campo de Frade. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, p. 40.
- ANP E DPC. 2001. Análise do acidente com a plataforma P-36. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis; Diretoria de Portos e Costa/Marinha do Brasil. Rio de Janeiro, p. 24.
- ASSIS, H. M. B. 1999. Cartografia geomorfológica do município do Cabo de Santo Agostinho/PE. Sistema de informações para gestão territorial da Região Metropolitana do Recife (Projeto Singre) - Série Cartas Temáticas - Volume 04.
- ARAGÃO, J. O. R. A influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico na dinâmica do tempo e do clima do Nordeste do Brasil. In: ESKINAZI-LEÇA, Enide; NEUMANN-LEITÃO, Sigrid; COSTA, Mônica Ferreira da (Org.). *Oceanografia: um cenário tropical*. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2004. p. 131-184.

ARAUJO, M., MEDEIROS, C. & RIBEIRO, C. 1999. Energy balance and time-scales of mixing and stratification in the Jaboatão estuary, NE-Brazil. *Rev. Bras. Ocean.*, São Paulo - BR, v. 47, n.2, p. 145-154.

ARAUJO, M.C.B., SOUZA, S.T., CHAGAS, A.C.O., BARBOSA, S.C. & COSTA, M.F. 2007. Análise da ocupação urbana das praias de Pernambuco, Brasil. *Rev. Gestão Cost. Int.*, 7(2), 97-104.

ARAUJO, C.E.G.; WEINBERG, R.F.; CORDANI, U.G. Extruding the Borborema Province (NE-Brazil): a two stage Neoproterozoic collision process. *Terra Nova*, 26(2): 157-168. doi: 10.1111/ter.12084, 2013.

ARCHANJO, C.J.; HOLLANDA, M.H.; RODRIGUES, S.W.O.; BRITO NEVES, B.B.; ARMSTRONG, R. Fabrics of pre- and syntectonic granite plutons and chronology of shear zones in the Eastern Borborema Province, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 30: 310-326, 2008.

AZEVEDO, L., DUARTE, H., MICHIMA, P., VELEDA, D. & KREUGER, A. 2021. Methodology for Maritime Risk Assessment in Ports due to Meteo-oceanographic Factors: The Case of the port of Suape, Brazil. *Risk analysis*

BARBOSA, J.A. & LIMA FILHO, M.F. Aspectos estruturais e estratigráficos da faixa costeira Recife-Natal: observações em dados de poços. *Boletim de Geociências da Petrobras*. 14(2): 287-306, 2006.

BARBOSA, J. A.; NEUMANN, V. H.; LIMA FILHO, M.F.; SOUZA, E.M.; MORAES, M. A. Estratigrafia da faixa costeira Recife-Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil. *IG. Série B, Estudos e Pesquisas*, v. 17, p. 3-30, 2007.

BARCELLOS, R.L., FLORES-MONTES, M.J., ALVES, T.M. & CAMARGO, P.B. 2016. Modern sedimentary processes and seasonal variations of organic matter in an urban tropical estuary, Jaboatão River (PE), Brazil. *J Coast Res*, (75), 38-42.

BARCELLOS, R.L., MELO, M.C.S.S., SIAL, A.N. & MANZO, V.A.V. 2020. Sedimentary Organic Matter Characterization on a Tropical Continental Shelf in Northeastern Brazil. *Int. J Geosci*, v. 11, p. 393-419.

BARRETO, H.T. & SUMMERHAYES, C.P. (1975) Oceanography and suspended matter of northeastern Brazil. *Journ. Sedim. Petrol.*, 45 (4): 822-833.

BARRETO, C. A., 2002. “Petróleo e Meio Ambiente”. In: *Revista da Faculdade de Direito de Campos, Campos dos Goytacazes, RJ, ano 3, nº 3.*

BEZERRA, F.H.R.; ROSSETTI, D.F.; OLIVEIRA, R.G.; MEDEIROS, W.E.; NEVES, B.B. Brito; BALSAMO, F.; NOGUEIRA, F.C.C.; DANTAS, E.L.; ANDRADES FILHO, C.; GÓES, A.M. Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. *Tectonophysics (Amsterdam)*, v. 614, p. 78-90, 2014, 2014.

BOCIU, I., SHIN B., WELLS, W.B., KOSTKA, J.E., KONSTANTINIDIS, K.T. & HUETTEL, M. 2019. Decomposition of sediment-oil-agglomerates in a Gulf of Mexico sandy beach. *Scient Rep*, 9(1), 1-13.

BOEHM, P. D., PAGE, D. S., GILFILLAN, E. S., STUBBLEFIELD, W. A., & HARNER, E. (1995). Shoreline ecology program for Prince William Sound, Alaska, following the Exxon Valdez oil spill: Part 2—Chemistry and toxicology. In *Exxon Valdez oil spill: Fate and effects in Alaskan waters*. ASTM International.

BONTEMPO FILHO, E. B.; COUTINHO, R. Q.; BARBOSA, J. A.; BARCELLOS, R. L.; GIACHETI, H. L. & RAMOS, G. M. S. 2022. Temporal monitoring of contamination in three sandy beaches from the 2019 oil spill near Cabo de Santo Agostinho, Northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.94(Suppl. 2). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210513>.

BRITO NEVES, B.B.; VAN SCHMUS, W.R.; FETTER, A. North-western Africa-Northeastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. *Journal of South American Earth Sciences*, 34(3-4): 275-278, 2002.

BRUM, H.D., CAMPO-SILVA, J.V., OLIVEIRA, E.G., 2020. Brazil oil spill response: government inaction. *Science* 367, 155–156.

BUARQUE, B.V.; BARBOSA, J.A.; MAGALHÃES, J.R.G.; CRUZ OLIVEIRA, J.T.; FILHO, O.J.C., 2016. Post-rift volcanic structures of the Pernambuco Plateau, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 251-267.

CÂMARA, S.F., PINTO, F.R., DA SILVA, F.R., DE OLIVEIRA SOARES, M. & DE PAULA, T.M. 2021. Socioeconomic vulnerability of communities on the Brazilian coast to the largest oil spill (2019–2020) in tropical oceans. *Ocean & Coastal Manage*, 202, 105506.

CARVER, R.E. 1971. *Procedures in sedimentary petrology*. John Wiley & Sons Incorporated.

CETESB, 2008. Limpeza de Ambientes Costeiros, acessado em janeiro de 2023. <http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/vazamento/acoes/limpeza.asp>

CETESB, 2008. Tipos de Manchas e Ações de Resposta, acessado em janeiro de 2023. <http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/vazamento/mancha/mancha.asp>

CHANG, H.K.; KOWSMANN, R.O.; FIGUEIREDO, A.M.F.; BENDER, A.A. Tectonics and Stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. *Tectonophysics*, 213: 97-138, 1992.

CHOU, S. C. Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul. 1990. 153 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1990.

COHEN, J. C. P. Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia. 1989. 153 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1989.

CORREIA FILHO, O. J., BARBOSA, J. A., TAVARES, B., DA SILVA, H. A., DE ARAUJO MONTEIRO, K., FABIN. C. E. G. & DA SILVA, S. M. 2019. Reativação Tectônica Quaternária no Domínio Sul da Província Borborema, NE do Brasil: Integração de Dados Morfométricos, Geológicos e Geofísicos da Bacia do Rio Una. *Anuário do Instituto de Geociências* 42(4): 219-237.

CORREIA FILHO, O. J., 2017. Análise de estruturas compressãoais na região onshore da Bacia Pernambuco, NE do Brasil-possíveis influências no potencial petrolífero. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

CORREIA FILHO, O.J.; SANTANA, F.R.; RIBEIRO, B.; HENRIQUE, R.; BARBOSA, J.A; HENRIQUE, V. 2015. Análise De Estruturas Rúpteis Na Formação Suape, Albiano Da Bacia De Pernambuco, e Implicações Sobre A Idade Do Rifte Na Margem Oriental Do Nordeste Do Brasil. In: XXVI Simpósio de Geologia do Nordeste, 2015, resumo, Natal-RN. XXVI SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE.

COUTINHO, P.N., 1976. Geologia Marinha da plataforma continental Alagoas-Sergipe. Tese Livre Docência. Univ. Fed. Pernambuco, 119p.

COUTINHO, P.N., MANSO, V.A.V., LIMA FILHO, M.F., LIMA, A.T.O., MEDEIROS, A.B., PEDROSA, F.J.A., MARTINS, M.H.A., CHAVES, N.S., SAMPAIO, A.S., LIRA, A.R.A., MENEZES, M.C.B., BRITO, M.F. 1994. Coastal quaternary of Pernambuco, Brazil. In International Sedimentological Congress (Vol. 14).

CPTEC - INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br>.

DANTAS, E.L.; SOUZA, Z.S.; WERNICK, E.; HACKSPACHER, P.C.; MARTIN, H.; XIAODONG, D.; LI, J. 2013. Crustal Growth in the 3.4-2.7 Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Research*, 227: 120-156.

DAVIES, J.L., 1964. A Morphogenic Approach to world Shoreline. *Z. Geomorphology*, 8:127-142.

DE OLIVEIRA, O.M., QUEIROZ, A.F.D.S., CERQUEIRA, J.R., SOARES, S.A., GARCIA, K.S., PAVANI FILHO, A. & MOREIRA, Í.T. 2020. Environmental disaster in the northeast coast of Brazil: Forensic geochemistry in the identification of the source of the oily material. *Mar Pollut Bull*, 160, 111597.

DE OLIVEIRA SOARES, M., TEIXEIRA, C.E.P., BEZERRA, L.E.A., PAIVA, S.V., TAVARES, T.C.L., GARCIA, T.M. & CAVALCANTE, R.M. 2020. Oil spill in South Atlantic (Brazil): Environmental and governmental disaster. *Mar Policy*, 115, 103879.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação (tábuas de marés). Disponível em: [http://www.dhn.mar.mil.br/serviços/tábuas das marés](http://www.dhn.mar.mil.br/serviços/tábuas%20das%20marés).

DOMINGUES, E. D. C., SCHETTINI, C.A.F., TRUCCOLO, E. C. & OLIVEIRA J. C. D. 2017. Hydrography and currents on the Pernambuco Continental Shelf. *RBRH* 22. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170027>.

DOMINGUEZ, J. M.L., BITTENCOURT, A.C.S.P. & MARTIN, L. 1992. Controls on Quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast Brazil: roles off sea-level history, trade winds and climate. *Sedimentary Geology*. (80): 213-232.

DOMINGUEZ, J.M.L., BITTENCOURT, A.C.D.S.P., LEÃO, Z.M.D.A.N & DE AZEVEDO, A.E.G. 2018. Geologia do Quaternário costeiro do estado de Pernambuco. *Rev. Bras. Geoc.*, 20(1-4), 208-215.

EXXON VALDEZ OIL SPILL TRUSTEE COUNCIL. 2010. Exxon Valdez oil spill restoration plan. Update on injured resources & services. May 2010. Anchorage, AK.

EXXON VALDEZ OIL SPILL TRUSTEE COUNCIL – EVOSTC. Disponível na página eletrônica <http://evostc.state.ak.us>. Acesso em março de 2020.

FERRANTI, L. et al. Tropical-extratropical interaction associated with the 30-60 days oscillation and its impact on medium and extended range prediction. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 47, p. 2177-2199, 1990.

FOLK, R.L. & WARD, W.C. 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *J Sediment Res*, 27(1), 3-26.

G1 da Globo.com, 2020, Notícia em 29/01/2020. Cinco meses após primeira aparição, fragmentos de óleo ainda são encontrados em praias de Pernambuco. Globo, 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2020/01/29/cinco-meses-apos-primeira-aparicao-fragmentos-de-oleo-ainda-sao-encontrados-em-praias-de-pernambuco.ghtml>>.

Acesso em: 06/02/2021.

GABARDO, I. T., MENICONI, M. F. G., FALCÃO, L. V., VITAL, N. A., PEREIRA, R. C. L., & CARREIRA, R. S. 2001. Hydrocarbon and ecotoxicity in seawater and sediment samples of Guanabara Bay after the oil spill in January 2000. In *International Oil Spill Conference* (Vol. 2001, No. 2, pp. 941-950). American Petroleum Institute.

GIRÃO, O. et al. O papel do clima nos estudos de prevenção e diagnóstico de riscos geomorfológicos em bacias hidrográficas na Zona da Mata Sul de Pernambuco. GUERRA, Antônio José Teixeira. JORGE, Maria do Carmo Oliveira (Orgs.). *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

GRAY, M. 2013. *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. (2nd. ed.), Wiley Blackwell, Chichester, UK.

GONÇALVES, LR, WEBSTER, DG, YOUNG, O, POLETTE, M & TURRA, A. 2020. The Brazilian Blue Amazon under threat: Why has the oil spill continued for so long?. *Ambiente & Sociedade*, 23.

GUIMARÃES, T. D. O. (2016). Patrimônio geológico e estratégias de geoconservação: Popularização das geociências e desenvolvimento territorial sustentável para o Litoral Sul de Pernambuco (Brasil).

GUNDLACH, ER, BOEHM, PD, MARCHAND, M, ATLAS, RM, WARD, DM & WOLFE, DA. 1983. The fate of Amoco Cadiz oil. *Science*, 221(4606), 122-129.

GUSMÃO, R.O. Arcabouço Geofísico, Isostasia e Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de sua Margem Continental (Nordeste do Brasil). Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal-RN, 411 pp, 2008.

GUSTITUS, SA & CLEMENT, TP. 2017. Formation, fate, and impacts of microscopic and macroscopic oil-sediment residues in nearshore marine environments: A critical review. *Ver Geoph*, 55(4), 1130-1157.

GUTERMAN, L. 2009. Exxon valdez turns 20.

GUTIERREZ, M.; YOUN, A. D. Effects of fracture distribution and length scale on the equivalent continuum elastic compliance of fractured rock masses. Volume 7, Issue 6, December 2015, Pages 626-637.

HAYES, M. O.; MICHEL, J. Factors determining the long-term persistence of Exxon Valdez oil in gravel beaches. *Marine Pollution Bulletin*, v. 38, n. 2, p. 92-101, 1999.

HOGBEN, N., & LUMB, F. E. (1967). *Ocean Wave Statistics: A Statistical Survey of Wave Characteristics Estimated Usually from Voluntary Observing Ships Sailing Along the Shipping Routes of the World*. HM Stationery Office.

HOLANDA, T. F., GONCALVES, R. M., LINO, A. P., PEREIRA, P. S. & SOUSA, P. H. G. O. 2020. Classificação das variações morfodinâmicas e processos costeiros, praia do paiva. *Rev. Bras. Geom.*, v. 21, p. 235-251. IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2020. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br>>. Acesso em: 26/04/2020.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. OPRC Convention: International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation, 1990, Including Final Act of the Conference and Attachment (resolutions 1 to 10). IMO Publishing, 1991.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. 1978. Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios – MARPOL 73/78. Disponível em: <http://www.enautica.pt/publico/professores/baptista/NT_II/Marpol_73_78_Anexos_I_V.pdf>. Acesso em janeiro de 2023.

_____, IMO - International Maritime Organization. Disponível em: <<http://www.imo.org/Pages/home.aspx>>. Acesso em janeiro de 2023.

INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION / ISDR 2005. - Hyogo Framework for Action 2005-2015. Building World Conference on Disaster Reduction, 18-22 January 2005, Kobe, Hyogo, Japan. United Nations, Geneva.

ITOPF - International Tanker Owners Pollution Federation. Oil Tanker Spill Statistics 2019. International Tanker Owners Pollution Federation Ltd., London, 2019.

KETKAR, K. W. The Oil Pollution Act of 1990: a decade later. Spill Science & Technology Bulletin, v. 7, n. 1-2, p. 45-52, 2002.

KIRURI, LW, DELLINGER, B & LOMNICKI, S. 2013. Tar balls from Deep Water Horizon oil spill: environmentally persistent free radicals (EPFR) formation during crude weathering. Environ sci & technol, 47(9), 4220-4226.

KOENING, ML, ESKINAZI-LEÇA, E, NEUMANN LEITÃO, S & MACÊDO, SJD. 2002. Impactos da construção do Porto de Suape sobre a comunidade fitoplanctônica no estuário do rio Ipojuca (Pernambuco-Brasil). Acta Bot. Brasilica, 16(4), 407-420.

KÖPPEN W. 1948. Climatologia. México. Fundo de Cultura Econômica.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. Monthly Weather Review, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

KURAS, O. 2002. The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface: Ph.D. thesis, University of Nottingham. 286 p.

KURASS, O., BEAMISH, D., MELDRUM, P.I., OGILVY, R.D. 2006. Fundamentals of the capacitive resistivity technique, *Geophysics*, 71 (3), p. G135-G152.

LAFAYETTE, K. P. V. 2006. Estudo Geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE. Recife/PE. Tese (doutorado) Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Civil.

LANZILLOTTA, H. A. A. 2008. Árvores de Decisão como Ferramentas de Apoio à Resposta a Derrames de Óleo. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia FEN/UERJ, M.Sc., Pós-graduação em Engenharia Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial. 152 f.

LARSONNEUR, C. 1977. La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise au point et utilisée en manche.

LARSONNEUR, C, BOUYASSE, P & AUFFRET, JP. 1982. The superficial sediments of the English Channel and its western approaches. *Sedimentology*, 29(6), 851-864.

LEACOCK, E. The Exxon Valdez oil spill. *Environmental Disasters*. New York: Facts On File, Inc. 2005. 100p.

LEITE, P.R.B.; BERTRAND, J.; LIMA, E.S.; LETERRIER, J. 2000. Timing of granitic magmatism in the northern Borborema Province, Brazil: aU±Pb study of granitoids from the Alto Pajeu Terrain. *Journal of South American Earth Sciences*, 13: 549-559.

LIMA, A. J. R. DE. 2013. Simulação de Contenção e Recuperação de Vazamento de Petróleo em Mar Aberto Utilizando Técnicas de Realidade Virtual. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. 169 p.

LIMA, J.C.F.; BEZERRA, F.H.R.; ROSSETTI, D.F.; BARBOSA, J.A.; MEDEIROS, W.E.; CASTRO, D.L.; VASCONCELOS, D.L. Neogene-Quaternary fault reactivation influences coastal basin sedimentation and landform in the continental margin of NE Brazil. *Quaternary International*, v. 1, p. 1-12, 2016.

LINDEBERG, M. R., MASELKO, J., HEINTZ, R. A., FUGATE, C. J., & HOLLAND, L. (2018). Conditions of persistent oil on beaches in Prince William Sound 26 years after the Exxon Valdez spill. *Deep Sea research part II: Topical studies in Oceanography*, 147, 9-19.

- LINO, AP. 2015. Variabilidade morfodinâmica de curto-termo de uma praia de mesomaré. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- LOKE, M.H., CHAMBERS, J.E., RUCKER, D.F., KURAS, O., WILKINSON, P.B. 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method, *Journal of Applied Geophysics*, 95, p. 135-156.
- LOURENÇO, R. A., COMBI, T., da ROSA ALEXANDRE, M., SASAKI, S. T., ZANARDI-LAMARDO, E., & YOGUI, G. T. (2020). Mysterious oil spill along Brazil's northeast and southeast seaboard (2019–2020): Trying to find answers and filling data gaps. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111219.
- MACHADO, C. C. C. et al. Distúrbios ondulatórios de leste como condicionante a eventos extremos de precipitação em Pernambuco. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 11, p. 146-188 jul./dez. 2012.
- MADRUGA FILHO, JD & ARAÚJO, TCM. 2003. Características Sedimentológicas da Praia do Paiva, Município do Cabo de Santo Agostinho-PE. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, II Congresso do Quaternário dos Países de Línguas Ibéricas, II Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa, Recife. Anais do IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, p. 01-03.
- MAGALHÃES, J.R.; BARBOSA, J.A.; OLIVEIRA, J.T.C.; LIMA FILHO, M.F. Characterization of the ocean-continent transition in the Paraíba Basin and Natal Platform region, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 32(3): 481-496, 2014b.
- MAGRIS, R.A., GIARRIZO, T., 2020. Mysterious oil spill in the Atlantic Ocean threatens marine biodiversity and local people in Brazil. *Mar. Pollut. Bull.* 153, 110961.
- MAIA, M. F. B. Revisão Estratigráfica do Intervalo Aptiano-Albiano da Bacia de Pernambuco Nordeste do Brasil (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil, 226 p, 2012.
- MAIA, R.P.; BEZERRA, F.H.R. Neotectônica, Geomorfologia e Sistemas Fluviais: Uma análise preliminar do contexto Nordestino. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2009.

- MALLMANN, D. L. B., NUNES, K. C., SA, L. A., & ARAUJO, T. C. M. 2011. Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo do litoral de Pernambuco. Recife, PE: Liceu Ed.
- MANSO, VAV, TOLDE, EE, MEDEIROS, C & ALMEIDA, LESB. 2001. Perfil Praial de Equilíbrio da Praia de Sirinhaém, Pernambuco. Rev. Bras. Geog., v. 2, n.1, p. 45-49.
- MANSO, V. A. V., et al. 2018. Pernambuco. In: Dieter Muehe, MMA. (Org.). Panorama da Erosão Costeira no Brasil, Pernambuco. 1ed. Brasília: Biblioteca do Ministério do Meio Ambiente, v. 1, p. 345-380.
- MARCELINO, E. V. 2008. Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos. Caderno Didático nº 1. INPE/CRS, Santa Maria, 2008.
- MARTINS, KA, DE SOUZA PEREIRA, P, LINO, AP & GONÇALVES, RM. 2016. Determinação da erosão costeira no Estado de Pernambuco através de geoindicadores. Rev Bras Geom, 17(3).
- MATOS, R.M.D. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break up between Brazil and west Africa. In: N.R. Cameron, R.H. Bate & V.S. Clure, (eds). The oil and gas habitats of the South Atlantic. Geol. Soc. Spec. Pub., 153: 55-73, 1999.
- MMA; CONAMA. 2001. Relatório sobre o impacto ambiental causado pelo derramamento de óleo na Baía de Guanabara. Ministério do Meio Ambiente; Conselho Nacional do Meio Ambiente. Brasília.
- MEKONNEN, A.; TRORNCROFT, C. D.; AIYYER, A. R. Analysis of Convection and Its Association white African Easterly Waves. Journal of Climate, v. 19, p. 5405-5421, 2006.
- MICHEL, J., NIXON, Z., HAYES, M.O., SHORT, J., IRVINE, G., BETENBAUGH, D., BORING, C., MANN, D. 2010. Distribution of subsurface oil from the Exxon Valdez oil spill Exxon Valdez Oil Spill Restoration Project Final Report (Project 070801), National Oceanic and Atmospheric Administration, Juneau, AK. p. 121
- MICHEL, J.; ESLER, D.; NIXON, Z. 2016. Studies on Exxon Valdez Lingering Oil: Review and Update on Recent Findings–February 2016. Report for the Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council. Alaska Department of Fish and Game and US Geological Survey, Anchorage, Alaska.

- MIO, G. D. & GIACHETI, H. L. 2007. The use of piezocone tests for high-resolution stratigraphy of Quaternary Sediment Sequences in the Brazilian coast. *An Acad Bras Cienc* 79: 153-170.
- MIRANDA, T.S., SANTOS, R.F., BARBOSA, J.A., GOMES, I.F., ALENCAR, M.L., CORREIA, O.J., FALCÃO, T.C., GALE, J.F.W., NEUMANN, V.H., 2018. Quantifying aperture, spacing and fracture intensity in a carbonate reservoir analogue: Crato Formation, NE Brazil. *Marine and Petroleum Geology* 97, 556–567.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. 2002. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste do Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, 1-10.
- MONTEIRO, A. G. 2003. Metodologia de avaliação de custos ambientais provocados por vazamento de óleo – O estudo de caso do Complexo REDUC-DTSE. UFRJ. Rio de Janeiro, p. 270.
- MÜLLER, G. 1967. *Methods in sedimentary petrology*.
- NASCIMENTO, MAL. 2003. Geologia, geocronologia, geoquímica e petrogênese das rochas ígneas cretácicas da província magmática do Cabo e suas relações com as com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco (NE do Brasil). Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 236p.
- NASCIMENTO, MAL, SOUZA, ZS, LIMA FILHO, MF, SÁ, EFJ, CRUZ, LR, FRUTUOSO JÚNIOR, LJ & GUEDES, IMG. 2004. Relações estratigráficas da província magmática do Cabo, Bacia de Pernambuco, Nordeste do Brasil. *Estudos Geológicos*, 14, 3-19.
- NASCIMENTO, MAL, MEDEIROS, VD & GALINDO, AC. 2008. Magmatismo ediacarano a cambriano no Domínio Rio grande do Norte, Província Borborema, NE do Brasil. *Estudos Geológicos*, 18(1), 4-29.
- NASCIMENTO, MAL, FERREIRA, RV & WILDNER, W. 2012. Litoral sul de Pernambuco (PE). *Geoparques do Brasil: propostas*. CPRM, Rio de Janeiro, 647-686.
- NAVY, U. S. *Marine Climatic Atlas of the World, V. IV, South Atlantic Ocean*. Washington DC 325p, 1978.

NASPOLINI, G. F. 2018. Prevenção e resposta ao derramamento de petróleo na exploração e produção offshore: Análise internacional e recomendações para o Brasil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.

NEFF, J.M., OWENS, E.H., STOKER, S.W., MCCORMICK, D.M. 1995. Shoreline oiling conditions in Prince William sound following the Exxon Valdez oil spill. Exxon Valdez Oil Spill: Fate Eff. Alsk. Waters. pp. 312-346.

NEUMANN, V.H., MEDEIROS, C., PARENTE, L., NEUMANN LEITÃO, S & KOENING, M.L. 1998. Hydrodynamism, sedimentology, geomorphology and plankton changes at Suape area (Pernambuco-Brazil) after a Port Complex Implantation. An Acad Bras Cienc, 70(2), 313-323.

NEVES, B.B.B.; VAN SCHMUS, W.R.; FETTER, A. 2002. North-western Africa-Northeastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. Journal of African Earth Sciences, 34: 275-278.

NEVES, S.P. 2015. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brazil): widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogen. Journal of South American Earth Sciences, v. 58, p. 150-164.

NEVES, S.P. & MARIANO, G. 1999. Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: Pernambuco Lineamento, Northeastern Brazil. Journal of Structural Geology, 21: 1639-1383.

NEVES, S.P.; BRUGUIER, O.; SILVA, J.M.R.; BOSCH, D.; ALCANTARA, V.C., LIMA, C.M. 2009. The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): Evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis? Precambrian Research, v. 175, n. 1-4, p. 187-205.

NEVES, S.P.; MONIÉ, P.; BRUGUIER, O.; SILVA, J.M.R. 2012. Geochronological, thermochronological and thermobarometric constraints on deformation, magmatism and thermal regimes in eastern Borborema Province (NE Brazil). Journal of South American Earth Sciences, 38: 129-146.

- NIXON, Z., MICHEL, J., HAYES, M. O., IRVINE, G. V., & SHORT, J. 2013. Geomorphic factors related to the persistence of subsurface oil from the Exxon Valdez oil spill. *Journal of Coastal Research*, (69), 115-127.
- NIXON, Z.; MICHEL, J. 2015. Predictive modeling of subsurface shoreline oil encounter probability from the Exxon Valdez oil spill in Prince William Sound, Alaska. *Environmental Science & Technology*, v. 49, n. 7, p. 4354-4361.
- NIXON, Z.; MICHEL, J. 2018. A Review of distribution and quantity of lingering subsurface oil from the Exxon Valdez Oil Spill. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 147, p. 20-26.
- OLIVEIRA, TRS, SANTOS, L, EICHLER, PPB, BARKER, CP & BARCELLOS, RL. 2020. Benthic foraminifera of tropical estuarine-lagoonal-bays system, in the suape harbor, brazil: a case study. *J Foram Res*.
- ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DE SAÚDE. 2014. Desastres Naturais e Saúde no Brasil. Brasília, DF: OPAS, Ministério da Saúde. 49p. il. (Série Desenvolvimento Sustentável e Saúde).
- ORTEGA, O.J., MARRETT, R.A., LAUBACH, S.E. 2006. A Scale-Independent Approach to Fracture Intensity and Average Spacing Measurement. *AAPG Bulletin*, 90(2): 193–208.
- PAGE, D. S., GILFILLAN, E. S., BOEHM, P. D., & HARNER, E. 1995. Shoreline ecology program for Prince William Sound, Alaska, following the Exxon Valdez oil spill: Part 1—study design and methods. In *Exxon Valdez oil spill: Fate and effects in Alaskan waters*. ASTM International.
- PAN, L., ADAMCHUK, V.I., PRASHER, S., GEBBERS, R., TAYLOR, R.S., DABAS, M., 2014. Vertical soil profiling using a galvanic contact resistivity scanning approach, *Sensors (Switzerland)*, 14 (7), p. 13243-13255.
- PAYNE, James R. et al. 2008. Long term monitoring for oil in the Exxon Valdez spill region. *Marine Pollution Bulletin*, v. 56, n. 12, p. 2067-2081.
- PARHAM, PR & GUNDLACH, E. 2015. Sedimentary Evolution of Deepwater Horizon/Macondo Oil on Sand Beaches of the Northern Gulf of Mexico, USA. *Open J. Ocean Coast. Sci.*, 2(1), 34-47.

- PARDAL, EC, DE ARRUDA XAVIER, D, DE OLIVEIRA, IMV, MONTES, MDJF & BARCELLOS, RL. 2019. Variedade sedimentológica e geoquímica em um sistema estuarino tropical sob influência antrópica no nordeste brasileiro (rio capibaribe-pe). *Pesquisas em Geociências*, 46(3).
- PASSOS, T, PENNY, D, SANDERS, C, DE FRANÇA, E, OLIVEIRA, T, SANTOS, L & BARCELLOS, RL. 2021. Mangrove carbon and nutrient accumulation shifts driven by rapid development in a tropical estuarine system, northeast Brazil. *Mar Pollut Bull*, 166, 112219.
- PAYNE, JR, DRISKELL, WB, SHORT, JW & LARSEN, ML. 2008. Long term monitoring for oil in the Exxon Valdez spill region. *Mar Pollut Bull*, 56(12), 2067-2081.
- PEDROSA, L. F. Análise dos Mecanismos de Planejamento e Resposta para Incidentes com Derramamento de Óleo no Mar: uma Proposta de Ação. Instituto Alberto Luís Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 118. 2012.
- PEIPKE, E. 2006. The impact of an oil spill on artisanal fishermen in Baía de Guanabara and possibilities for a sustainable future. Royal Institute of Technology. Estocolmo. (1402-7615).
- PEJRUP, M. 1988. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach. *Tide-influenced sedimentary environments and facies*. Reidel, Dordrecht, 289-300.
- PETERSON, CH, RICE, SD, SHORT, JW, ESLER, D, BODKIN, JL, BALLACHEY, BE & IRONS, DB. 2003. Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. *Science*, 302(5653), 2082-2086.
- PIPER R., 1993. The Exxon Valdez oil spill – Final Report: State of Alaska response. Anchorage, Alaska Dep. of Environ. Conservation, LCCN 93-072684.
- RICE S.D., SHORT J.W., CARLS M.G., MOLES A., SPIES R.B., 2007. The Exxon Valdez oil spill. Elsevier, In: Long term ecological change in the Northern Gulf of Alaska, p. 419-520.
- RIYIS, MT, DE JESUS, LS, ARAKAKI, E & GIACHETI, HL. 2019. Varredura vertical de amostras de solo com LNAPL utilizando dispositivo de baixo custo com luz ultravioleta. *Águas Subterrâneas*, 33(3), 247–257.

- ROMANKEVICH, EA. 2013. Geochemistry of organic matter in the ocean. Springer Sci & Business Media.
- ROSER, Max., 2013. Oil spills. Our World in Data.
- SÁ, J.M.; BERTRAND, J.M.; LETERRIER, J.; MACEDO, M.H.F. 2002. Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14: 851-866.
- SANDERSON, D. J.; NIXON C. W. (2015) The use of topology in fracture network characterization. In: *Journal of Structural Geology* 72. p. 55 e 66.
- SANTOS, E.J. & MEDEIROS, V.C. 1999. Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*. 29(1): 73-84.
- SANTOS, E.J.; VAN SCHMUS, W.R.; KOZUCH, M.; NEVES, B.B.B. 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 29: 61-76.
- SCHROPE, M. 2010. The lost legacy of the last great oil spill.
- SCHROPE, M. 2011. Oil spill: Deep wounds. *Nature News*, 472(7342), 152-154.
- SHIGENAKA, G. 2014. Twenty-Five Years After the Exxon Valdez Oil Spill: NOAA's Scientific Support, Monitoring, and Research. Seattle: NOAA Office of Response and Restoration. 78 pp.
- SHORT, AD. 2006. Australian beach systems—nature and distribution. *J Coast Res*, 22(1 (221)), 11-27.
- SILVA, E. P. 2004. Caracterização Geo-Ambiental e estudo da variabilidade espaço-temporal de processo erosivo no Parque metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho – PE/Brasil. Dissertação de mestrado apresentada à pós-graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco -CTG. Recife/PE.
- SILVA, V. P. 2010. Distúrbios ondulatórios de leste: estudo de casos que afetaram a costa leste do NEB. 2010. 77 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, JP.

SOARES, M.O., TEIXEIRA, C.E.P., BEZERRA, L.E.A., PAIVA, S.V., TAVARES, T.C.L., GARCIA, T.M., ARAÚJO, J.T., CAMPOS, C.C., FERREIRA, S.M.C. 2020. Oil spill in South Atlantic (Brazil): environmental and governmental disaster. *Mar. Policy* 115, 103879.

SOMENZI, C. S., BONTEMPO FILHO, E.B., BARBOSA, J.A., CORREIA FILHO, O.J., COUTINHO, R.Q., GIACHETI, H.L. 2022. Uso de drones na criação de modelos digitais de encostas: Aplicação na avaliação de um costão rochoso contaminado por óleo. VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Porto de Galinhas, PE.

SOUZA, W. M. 2011. Impactos socioeconômicos e ambientais dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE. 2011. 121 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

SOUZA FILHO, A. M. D. 2006. Planos Nacionais de Contingência para Atendimento a Derramamento de Óleo: Análise da Experiência de Países Representativos das Américas para Implantação no Caso do Brasil. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 217 p.

SUAPE. 2018. Agenda Ambiental Local do Porto de Suape. Access in: 25/05/2019. Available in: http://www.suape.pe.gov.br/images/meio_ambiente/agenda_ambiental/AGENDA_AMBIENTAL_LOCAL_SUAPE_2018.pdf.

SUGUIO, K, BEZERRA, FH & BARRETO, AM. 2011. Luminescence dated Late Pleistocene wave-built terraces in northeastern Brazil. *An. Acad. Bras. Cienc.*, 83(3), 907-920.

TEIXEIRA, J. L. & GALVÍNCIO, J. D. 2010. Uso de Geotecnologias para a Caracterização Física Espacial da Bacia Hidrográfica do Grupo de Pequenos Rios Litorâneos (GL2) / PE. *Revista Brasileira de Geografia Física* 02 / 133-139.

VAN SCHMUS, W.R.; OLIVEIRA, E.P.; SILVA FILHO, A.F.; TOTEU, S.F.; PENAYE, J.; GUIMARÃES, I.P. 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. In: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A. J., Brito Neves, B.B. & De Wit, M.J. (eds) *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London, Special Publications, 294: 69-99.

- VAUCHEZ, A.; NEVES, S.P.; CABY, R.; CORSINI, M.; EGYDIO-SILVA, M.; ARTHAUD, M.; AMARO, V. 1995. The Borborema shear zone system, Ne Brazil. *Journal of South American earth Sciences*, 8(3-4): 247-266.
- WALKER, A. H. 2017. Oil Spills and Risk Perceptions. In: FINGAS, M. *Oil Spill Science and Technology*. 2ª. ed. Edmonton: Elsevier. Cap. 1, p. 1-70. Acesso em: 2018 janeiro de 2020.
- WANG, Y, LEE, K, LIU, D, GUO, J, HAN, Q, LIU, X & ZHANG, J. 2020. Environmental impact and recovery of the Bohai Sea following the 2011 oil spill. *Environ Pollut*, 263, 114343.
- WANKHEDE, A., 2011. Understanding Crude Oil Washing Operation on Oil Tanker Ships. Disponível em: <<http://www.marineinsight.com/marine/marine-news/headline/understanding-crude-oil-washing-operation-on-oil-tanker-ships/>>. Acesso em janeiro de 2023.
- WARNOCK, AM, HAGEN, SC & PASSERI, DL. 2015. Marine tar residues: a review. *Water, Air, Soil Pollut*, 226(3), 1-24.
- WESTOBY, W. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., REYNOLDS, J. M. 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179(2012):300-314.
- WHOI – Woods Hole Oceanographic Institution, 2020. Disponível em: <<https://www.whoi.edu>>. Acesso em: 01/04/2020.
- WOLFE, D., MICHEL, J., HAMEEDI, M. J., PAYNE, J. R., GALT, J. A., WATABAYASHI, G., ... & RICE, S. 1994. The fate of the oil spilled from the Exxon Valdez. *Environmental Science & Technology*, 28(13), 560A-568A.
- YIM, UH, et al. 2020. Rapid recovery of coastal environment and ecosystem to the Hebei Spirit oil spill’s impact. *Environ Int*, 136, 105438.
- ZEEB, C.; GOMEZ-RIVAS, E.; BONS, P. D.; BLUM, P. (2013). Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. *AAPG Bulletin*; 97 (9): 1545–1566.