

## Sensibilidade Ambiental a Derramamento de Óleo e Mapeamento de Unidades de Paisagem na Região Portuária do Maranhão

### *Environmental Sensitivity to oil spill and Landscape Units mapping in the Maranhão Port region*

Milena Marília Nogueira de Andrade<sup>1</sup>, Pedro Walfir Martins e Souza-Filho<sup>2</sup>,  
Claudio Fabian Szlafsztain<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural da Amazônia. Email: milenamarilia.andrade@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal do Pará, Instituto Tecnológico Vale. Email: pedropwm@gmail.com

<sup>3</sup> Universidade Federal do Pará. Email: iosele@ufpa.br

**RESUMO:** Os diversos casos de derramamento de óleo ocorridos no mundo incentivaram os órgãos e as entidades envolvidos a aperfeiçoarem os métodos, tanto preventivos como corretivos. O mapeamento da sensibilidade ambiental deve ser realizado para a minimização dos danos gerados pelo impacto ambiental potencial. Desse modo, o objetivo deste trabalho é aplicar o Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA), a partir do mapeamento das unidades de paisagem. As unidades de paisagem (17 no total) foram identificadas com recurso de interpretação visual de imagens de alta resolução Ikonos, trabalho de campo e inserção dos dados em um Sistema de Informação Geográfica. Posteriormente foi aplicado o ISA, representado numericamente de 1 a 10, em escala operacional. A área de estudo corresponde à região portuária de Itaqui na ilha de São Luís, Maranhão, onde há um intenso fluxo portuário e iminente ameaça de derramamento de óleo. Os resultados apontam para a presença de índices de alta a baixa sensibilidade ambiental nos seguintes ambientes: manguezal (ISA 10D), planície de maré lamosa (ISA 9A), escarpas protegidas em leitos sedimentares (paleofalésias) (ISA 8A), planície arenosa e bancos arenosos/lamosos (ISA 7), escarpas expostas com declives íngremes em areia (ISA 3B), praia com granulometria fina a média (ISA 3A), plataforma de abrasão (ISA 1C), e estruturas artificiais (ISA 1B).

**Palavras-chave:** Derramamento de óleo, Geomorfologia, Risco Ambiental, Sensoriamento Remoto.

**ABSTRACT:** Several cases of oil spills in the world have encouraged the agencies and entities to improve methods, both preventive and corrective. In order to minimize the damage generated by the potential environmental impact, the environmental sensitivity mapping must be performed. Thus, the objective of this work is to apply the Environmental Sensitivity Index (ESI), from the mapping of the landscape units. The landscape units (17 in total) were identified by visual interpretation of Ikonos high-resolution images, fieldwork and a Geographic Information System. Subsequently, the ESI was applied, numerically represented by 1 to 10, on an operational scale. The corresponding study area is the port region of Itaqui on the island of São Luís, Maranhão, where there is an intense port traffic and an imminent threat of oil spills. The results point to the presence of high to low environmental sensitivity indices in the following environments: mangroves (ISA 10D), low banks and tidal flats (ISA 9A), sheltered scarps in bedrock (Paleo-cliff) (ISA 8A), exposed sand tidal flats (ISA 7), scarps and steep slopes in sand (ISA 3B), fine to medium grained sand beaches (ISA 3A), exposed rocky cliffs with boulder talus base (ISA 1C), exposed, solid man-made structures (ISA 1B).

**Keywords:** Oil Spill, Geomorphology, Environmental Risk, Remote Sensing.

## 1. INTRODUÇÃO

O mapeamento da sensibilidade ambiental é um instrumento de planejamento fundamental em situações de execução de medidas de contingência ao derramamento de óleo e derivados. Nas últimas décadas, os avanços em modelagem da trajetória do óleo na superfície da água e o uso extensivo de sensoriamento remoto para identificação de recursos, tem auxiliado na prevenção e minimização dos impactos ambientais (Kankara e Prabhu, 2016; Santos e Andrade, 2009; Vethamony *et al.*, 2007). Os impactos são prognosticados a partir da identificação dos ambientes costeiros, das ameaças portuárias e do reconhecimento dos recursos socioeconômicos existentes na área (MMA, 2004). Estes recursos são melhores visualizados a partir de imagens de alta resolução radiométrica (Andrade *et al.*, 2009) que possibilita a visualização e identificação de alvos em locais de alta ou baixa frequência radiométrica (Hese e Schmulius, 2009).

As cartas de sensibilidade ambiental ao derramamento do óleo (Cartas SAO) no Brasil remontam à década de 90 quando foi divulgado o primeiro mapa de sensibilidade produzido pela Petrobrás (Martins *et al.* 2013). Em 1996 se iniciou um processo de padronização dos produtos cartográficos, nos moldes da metodologia NOAA, a partir de um documento de referência nacional (MMA, 2004; Araújo *et al.*, 2006). Desse modo, o mapeamento da sensibilidade ao óleo é composto por informações do meio físico, biótico e socioeconômico (Jensen *et al.*, 1993).

Durante a década de 2000 o Projeto Piatam Mar foi responsável pela geração de conhecimento relacionado com os ambientes costeiros da zona costeira amazônica com uso extensivo de sensoriamento remoto e geoprocessamento (Souza Filho *et al.*, 2009a). O uso de sensores de média resolução espacial e de radar permitiu o reconhecimento de diversos ambientes

estuarinos (Cardoso *et al.*, 2014; Rodrigues e Souza-Filho, 2011a), a identificação de mudanças na extensa faixa de manguezais (Nascimento *et al.*, 2013), a delimitação geomorfológica da zona costeira amazônica (Teixeira e Souza-Filho, 2009), e a aplicação dos Índices de Sensibilidade Ambiental (ISA) (Rodrigues e Souza-Filho, 2012; Boulhosa e Souza-Filho, 2009; Souza-Filho *et al.*, 2009a; 2009b; 2009c).

O ISA apresenta particularidades para a região costeira amazônica justificadas pela existência neste bioma de relações hidrodinâmicas estuarinas complexas por conta da dimensão dos processos fluviais e marinhos da bacia do rio Amazonas (Souza-Filho *et al.*, 2009c). Além disso, as características geomorfológicas dos ambientes costeiros de clima tropical úmido dominados por macromaré possuem peculiaridades tais como: a formação de extensas áreas baixas, devido à dinâmica da planície de macromaré; fortes modificações nos limites dos ambientes sedimentares costeiros em resposta às elevadas amplitudes e correntes de maré, com variações em torno de 6 m; e as rápidas e intensas modificações geomorfológicas (Boulhosa e Souza Filho, 2009).

O mapeamento da sensibilidade ambiental para a zona costeira amazônica foi realizado em escala estratégica (de abrangência regional/bacia marítima) e tática (de escala intermediária/todo o litoral da bacia) para a bacia marítima da foz do Amazonas e para a do Pará-Maranhão (IEPA, 2016; Rodrigues e Souza-Filho, 2011a; Rodrigues e Souza-Filho, 2011b; Boulhosa e Souza-Filho, 2009; Gonçalves e Souza-Filho, 2005, Souza Filho *et al.*, 2009b). A primeira refere-se a mapeamentos do litoral amapaense e a costa oeste do Pará, enquanto que a segunda se refere ao litoral do leste do Pará e Maranhão. Os mapeamentos em escala operacional foram realizados para as principais cidades portuárias de cada estado, Macapá no Amapá, Belém e Barcarena no Pará e São Luís no Maranhão (IPEA, 2016; MMA, 2016). Previamente,

a delimitação de ambientes já havia sido proposta em escala tática por Teixeira e Souza-Filho (2009) e Novaes *et al.*, (2007) que identificaram os ambientes sensíveis de manguezais inseridos na costa de manguezais de macromaré da Amazônia dentro do Golfão Maranhense. Este litoral está sujeito a um regime de macromarés semidiurnas, com amplitudes em torno de 4 m na Baía de Guajará, em Belém, e de 7,5 m na Baía de São Marcos (DHN, 2004).

Em São Luís há um complexo portuário de importância estratégica para o estado em termos de geração de receita, movimentação de cargas e pessoas (Cutrim *et al.*, 2015). A movimentação de cargas no Porto de Itaqui permanece acima de 11 milhões de toneladas desde 2001 e em 2017 foi superior a 17 milhões de toneladas (EMAP, 2018), enquanto que o Porto Ponta da Madeira é constituído por um terminal de uso privado propriedade da VALE S.A e que em 2014 foi o maior porto em volume embarcado do Brasil (ANTAQ, 2014).

Nas zonas próximas aos complexos portuários, os derramamentos de óleo e de derivados relacionados com as atividades de transporte, procedimentos de exploração, limpeza, e estocagem são um perigo potencial para as populações e biomas (Noernberg e Lana, 2002). Os maiores acidentes que ocorreram no Complexo Itaqui-Bacanga foram registrados em setembro de 2005 com derramamentos de óleo que impactaram, na sua totalidade, cerca de 5 km de praia da Ilha de São Luís (Lobo *et al.*, 2005). Desse modo, são necessários estudos detalhados para os locais na proximidade portuária com vulnerabilidade ambiental e social alta (Andrade *et al.*, 2010). Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é mapear a sensibilidade ambiental na área portuária do Porto de Itaqui a partir do detalhamento das unidades de paisagem.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde ao setor oeste do município de São Luís, estado do Maranhão (Brasil), onde está localizado o complexo portuário com os terminais de Ponta da Madeira, da Vale, o terminal da Alumiar e os terminais de *Ferroa* da Ponta da Espera e do Cujupe, para travessia da Baía de São Marcos. Contextualmente localiza-se no Golfão Maranhense entre as Baías de São Marcos e São José (Figura 1).

A região insere-se no domínio geomorfológico dos tabuleiros costeiros sendo seccionados pelas reentrâncias formadas pelas baías e estuários (IBGE, 2011a). Os tabuleiros consistem em formas de relevo tabulares, planos e sustentados por rochas sedimentares do Grupo Barreira (Dantas *et al.*, 2013). Teixeira e Souza-Filho (2009) delimitaram os ambientes costeiros do Golfão Maranhense em quatro unidades morfológicas: planalto

costeiro, planície fluvial, planície estuarina e planície litorânea.

A planície costeira é marcada por estuários e reentrâncias com presença de vegetação de manguezal (Teixeira e Souza-Filho, 2009). As espécies correspondem a *Rhizophora mangle* e *Avicennia germinaus*, sendo esta última encontrada entre as regiões hipersalinas de nível de maré alta e nível de maré alta de sizígia (Kjerfve e Lacerda, 1993). A dinâmica costeira é marcada por características da linha de costa com extensos rios, áreas de elevadas amplitudes de maré, elevada precipitação e correntes de marés máximas superiores a 4 m/s (Rebelo-Mochel, 1997).

O clima da área de estudo é do tipo Aw de acordo com a classificação Köppen. A pluviosidade média anual é de 1896 mm, estando o período chuvoso compreendido entre janeiro e junho (Alvares *et al.*, 2014). A temperatura média anual é de 26°C (INMET, 2018). As características antrópicas são marcadas por loteamentos que se iniciaram na década de 60. Transformações industriais e portuárias significativas ocorreram na década de 80 com a instalação dos grandes projetos e escoamento de produtos da mineração (ZCEMA, 2003).

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram adquiridas duas imagens Ikonos com resolução espacial de 4 m e dimensão do mapeamento de 13 x 13 km cada uma, num período de baixa nebulosidade na região, em junho de 2007. Foi realizada uma correção geométrica a partir da aquisição de pontos de controle no terreno (*Ground Control Points* - GCPs) utilizando um Sistema de Posicionamento Global Diferencial (*Differential Global Position System* - DGPS) através de um acompanhamento cinemático em campo, no mesmo ano. O processamento dos pontos de controle do terreno foi realizado a partir de dados fornecidos pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) com um erro quadrático médio (RMS) em torno de 1 pixel (1m) (IBGE, 2011b). O sistema de referência utilizado foi a projeção Universal Transversa de Mercator e o datum horizontal WGS 84 no fuso 23. Adicionalmente, para melhor eficiência na visualização da imagem, foi aplicado um realce para o aumento do contraste por uma transformação linear.

Em seguida foi feito um mosaico com as imagens adjacentes e uma composição nos canais de cor 3R2G1B. A fotointerpretação contou com uma classificação manual das unidades de paisagem no ArcGis 9.2 nas dependências do Laboratório de Análises do Trópico Úmido. Os critérios da fotointerpretação incluíram análise de padrão, tonalidade, cor, textura, forma e tamanho (Moreira, 2001) para um mapeamento

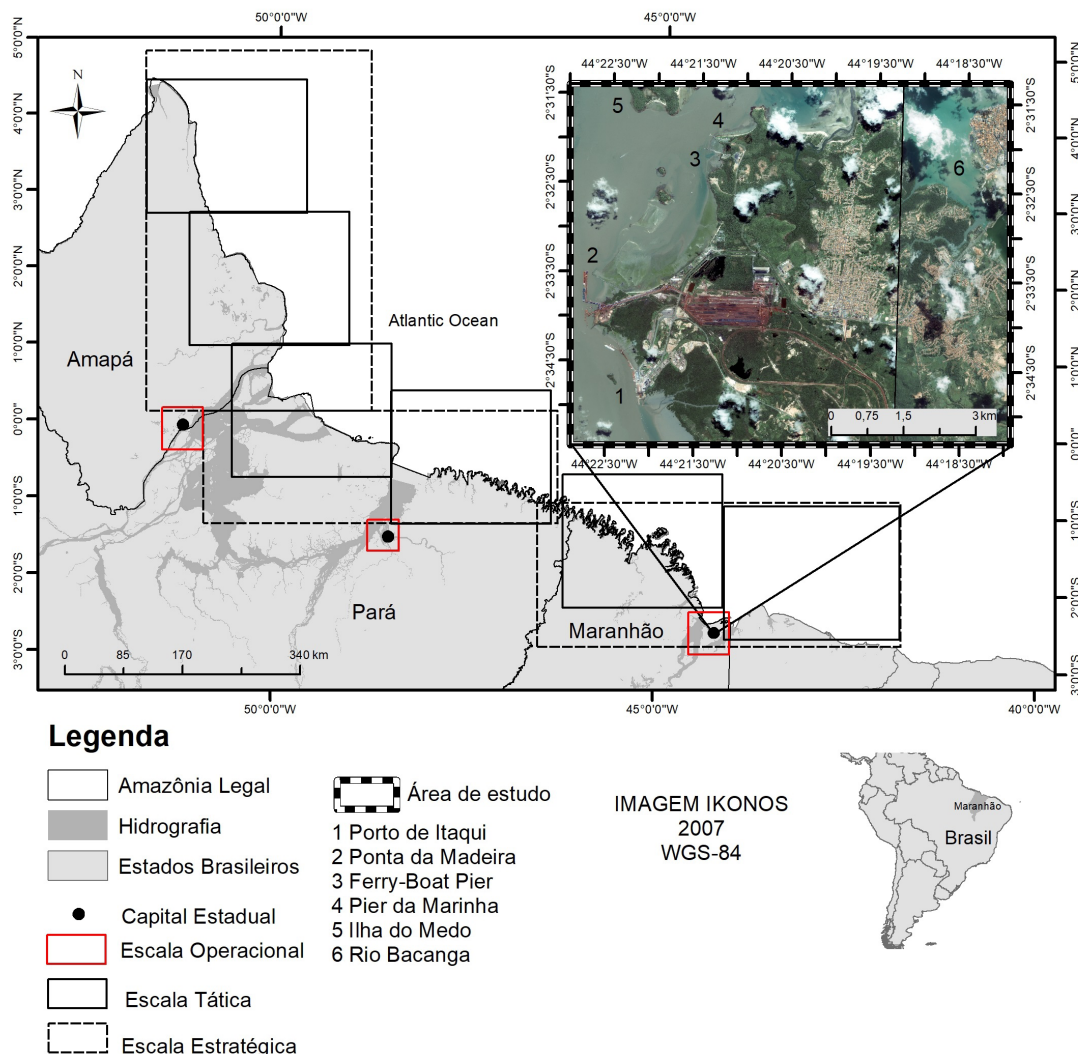


Figura 1 - Localização da área de estudo com demarcação esquemática das escalas estratégica, tática e operacional.

Figure 1 - Location map with schematic delimitation of strategic, tactical and operational scale.

preliminar. As informações visuais obtidas a partir das assinaturas espectrais permitiram a individualização e posterior reconhecimento das unidades de paisagem (Jensen *et al.*, 1993).

Estudos anteriores dos ambientes costeiros elaborados por Teixeira e Souza-Filho (2009) e Andrade *et al.*, (2010), juntamente com dados topográficos de cartas planialtimétricas na escala de 1:10.000 disponibilizadas pela Diretoria de Serviços Geográficos do governo do Maranhão foram utilizados para a delimitação das unidades de paisagem da área de estudo.

O reconhecimento da morfologia dos ambientes previamente mapeados na classificação das imagens foi realizado durante um trabalho de campo. Na ocasião foram coletados pontos de localização das unidades de paisagem através do GPS (*Global Positioning System*) modelo GARMIN e realizado um registro fotográfico.

A construção do mapa de sensibilidade ambiental baseou-se nas unidades de paisagem. Estas foram classificadas a partir do ISA que classifica os diversos tipos de segmentos litorâneos em uma escala que varia de 1 a 10, sendo o índice tanto mais alto quanto maior a sensibilidade (MMA, 2004). Este índice é baseado nos seguintes fatores: grau de exposição à energia de ondas e marés; declividade do litoral e tipo do substrato. Para a região amazônica o índice passou por adaptações de acordo com Souza-Filho *et al.*, (2009c).

Os mapas finais foram construídos com a utilização de geoprocessamento a partir da vetorização das unidades de paisagem em polígonos. Para cada polígono foi atribuído uma descrição e um valor de ISA. No final a representação cartográfica foi realizada à escala de 1:10.000.

## 4. RESULTADOS

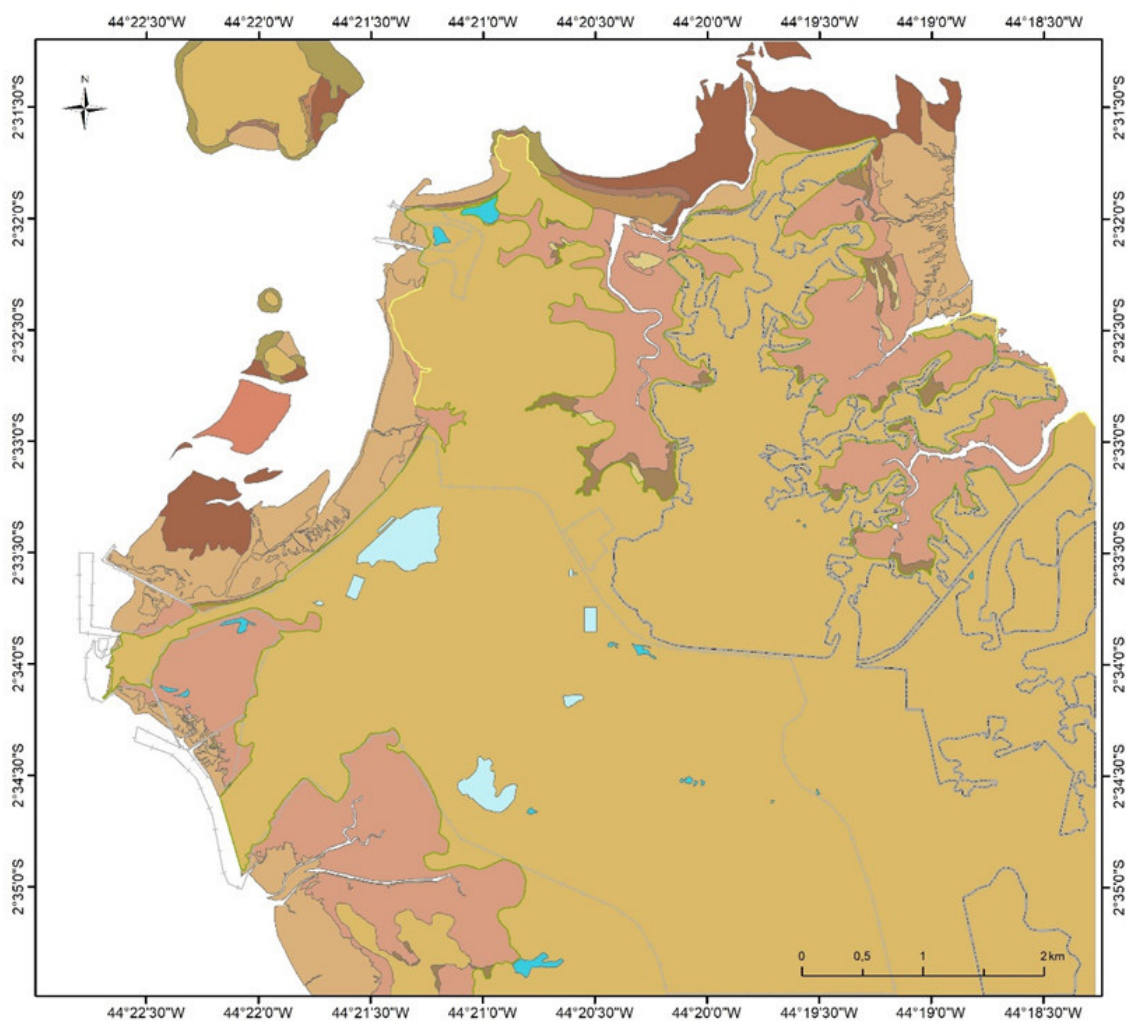
### 4.1 Reconhecimento e mapeamento das unidades de paisagem

A área de estudo apresenta fatores naturais e antrópicos que interagem para a formação da paisagem atual. Foram identificadas 17 unidades de paisagem divididas em quatro domínios: planalto costeiro, planície estuarina, planície litorânea, e sistema antropogênico (Figura 2).

#### Planalto costeiro

O planalto costeiro apresenta-se como uma superfície suavemente ondulada e fortemente dissecada, com limites abruptos. Esta unidade é recoberta por vegetação, na qual são abundantes as palmeiras e vegetação de porte arbóreo. São identificadas 4 unidades de paisagem nesse domínio: falésias, lagos intermitentes, tabuleiro costeiro e plataforma de abrasão.

A falésia divide-se numa falésia ativa e inativa. A linha de



#### Legenda

##### Planalto Costeiro

- Falésia Ativa
- Falésia Inativa
- Lago Intermitente
- Plataforma de Abrasão
- Tabuleiro Costeiro

##### Planície Litorânea

- Duna Frontal
- Duna Vegetada
- Paleoduna
- Praia

##### Planície Estuarina

- Bancos Arenosos/Lamosos
- Manguezal
- Planície Supramaré
- Planície de Maré Arenosa
- Planície de Maré Lamosa

##### Sistema Antropogênico

- Área Residencial
- Distrito Industrial
- Lago Artificial

Figura 2 - Mapa de unidades de paisagem da área de estudo.

Figure 2 - Landscape units map of the study area.

falésia ativa ocorre no contato direto do tabuleiro costeiro com a baía de São Marcos e o Rio Bacanga, estando a sua origem relacionada com a ação das ondas e das correntes de maré. Corresponde aproximadamente a cota de 5 m, com extensão de aproximadamente 3,4 km ao longo do litoral e apresenta na sua base depósitos de talude que formam as plataformas de abrasão com material rochoso laterítico. A linha de falésia inativa está em contato com os manguezais e as planícies de supramaré. São antigas falésias esculpidas pela ação das ondas e das correntes de maré, que atualmente se encontram inativas e a uma distância de cerca de 1 km do litoral.

Os lagos intermitentes situam-se entre os manguezais e a planície litorânea, e a sua característica principal é apresentar água apenas no período chuvoso. O tabuleiro costeiro é sustentado por sedimentos do Grupo Barreiras e Formação Itapecuru (CPRM, 2004). Na parte central encontram-se as áreas mais altas, com 45 m de altitude, enquanto que em direção ao estuário as cotas baixam até nos 10 m.

A plataforma de abrasão corresponde à rocha exposta em forma de lateritas erodidas do Grupo Barreiras, dispersas sobre depósitos arenosos e lamosos, que apresentam um declive inferior a 30°. Esta plataforma está frequentemente exposta a ondas de um ou mais metros de altura e/ou a fortes correntes de maré. Situam-se a norte e a noroeste, bordejando todas as ilhas.

#### *Planície Estuarina*

Esta unidade morfológica é limitada pelo planalto costeiro na porção mais próxima e é constituída pelos corpos de água e pelas unidades formadas por processos estuarinos dominados pela maré. As unidades de paisagem identificadas nesse domínio foram: bancos arenosos/lamosos, manguezal, planície de maré arenosa, planície de maré lamosa e planície de supramaré arenosa.

Os bancos arenosos/lamosos ocorrem a oeste e a norte da área e correspondem a sedimentos de fundo da baía de São Marcos com granulometria típica de areia e silte, que formam extensas planícies ou bancos na maré baixa com mega-ondulações. Esta unidade é correlacionável com a unidade descrita por Teixeira e Souza-Filho (2009).

Os manguezais ocorrem a cotas inferiores a 5 m, são a unidade de paisagem mais expressiva da planície estuarina e estão dispostos nas direções N-S, W-E e NNE-SSW. Este ambiente é caracterizado por sedimentos lamosos colonizados por uma cobertura vegetal específica em que há o predomínio de espécies de *Rhizophora sp.* e *Avicenia sp.*, com árvores de até 30 m de altura em média (Teixeira e Souza-Filho, 2009).

A planície de maré arenosa ocorre no limite norte da área e caracteriza-se pela deposição de sedimentos arenosos,

e pelo reduzido declive (menor que 3°), apresentando mega-ondulações e marcas de onda. A planície de maré lamosa apresenta largura métrica à quilométrica, está abrigada da ação das ondas e possui substrato sub-horizontal lamoso (declive inferior a 3°). Ocasionalmente essa planície é colonizada por vegetação do tipo gramínea (*Spartina sp.*). A planície de supramaré arenosa ocorre entre os manguezais e o tabuleiro costeiro. Caracteriza-se por ser uma área atingida pelo nível de maré alta de sizígia, a acumulação de sal, e por ter a sua área alagada apenas nas marés de sizígia equinociais.

#### *Planície Litorânea*

Esta unidade é limitada pela planície estuarina e pelo planalto costeiro. Os processos eólicos foram predominantes para a formação das seguintes unidades: duna, paleoduna e praia.

As dunas podem ser frontais ou vegetadas. As dunas frontais são móveis e sofrem a influência do transporte eólico. Ocorrem numa área restrita à Ilha do Medo a norte da região de Itaquí-Bacanga e apresentam formas alongadas na direção NE-SW. As dunas vegetadas possuem formas alongadas na direção NE-SW e são colonizadas por vegetação arbustiva.

As paleodunas estão localizadas entre às áreas de manguezal e de tabuleiro costeiro, e possuem orientação NNW-SSE e W-E. São recobertas por vegetação arbustiva e estão localizadas a mais de 1 km do litoral atual. As praias apresentam forma retilínea e têm uma largura de cerca de um 1 km e possuem um declive de face praial suave (3 a 5°) e amplas zonas intermarés (~500 m). Os sedimentos são arenosos finos a muito finos, bem selecionados e geralmente compactos.

#### *Sistema Antropogênico*

O sistema antropogênico corresponde às intervenções humanas no meio natural e é constituído pelas áreas industriais e residenciais. A área industrial ocupa a área sudoeste e está implantada sobre o tabuleiro costeiro, na fronteira com as áreas de manguezal. Esta área corresponde ao Complexo da Empresa Vale, a Fábrica de Butano, ao Porto de Itaquí e a área do Ferry-Boat. Nesta unidade são observados lagos artificiais. As áreas residenciais ocorrem na região central e sudeste da área e apresenta loteamentos e vias de acesso. Cada unidade de paisagem descrita possui uma identificação visual de interpretação (Figura 3).

## **4.2 Mapeamento da sensibilidade ambiental**

O mapa de sensibilidade ambiental possui unidades de paisagem de todos os domínios (Figura 4, Figura 5). As informações sobre os impactos e os métodos de limpeza

Unidade de Paisagem		Área (ha)	Descrição		Área (ha)	Descrição
Planalto Costeiro	Falésia	-	Faixa enegrecida que bodeja tabuleiro	Plataforma de abrasão	39	Coloração marrom, aspecto poroso
	Lagos Intermitentes	0,12	Coloração verde escura e marrom intercalados	Tabuleiro Costeiro	3401	Coloração marro-alaranjada, curvas de nível acima de 10m
Planície Estuarina	Bancos arenosos /lamosos	24	Coloração esverdeada esbranquiçada	Manguezal	682	Cor verde escuro e textura rugosa
	Planície de maré arenosa	222	Tonalidades de cinza claro a branco	Planície de maré lamosa	434	Coloração esverdeada e textura lisa
	Planície de supramaré arenosa	41	Coloração alaranjada, feições alongadas			
Planície Litorânea	Dunas	21	Cor branca, forma alongada uniforme, e textura lisa	Paleoduna	13	Cor branca, forma retilínea
	Praia	14	Cor branca, forma alongada e retilínea			
Sistema Antropogênico	Área Industrial	1300	Forma retilíneas, diversidade de cores	Área Residencial	1300	Forma geométrica, diversidade de cores

Figura 3 - Unidades de paisagem da área de estudo e respectivas imagens de interpretação.

Figure 3 - Landscape units of the study area and the respective images for interpretation.

para cada ISA foram descritas a partir das informações contidas em Petersen *et al.*, (2002) e MMA (2004).

Os manguezais (ISA 10D) são ambientes ricos em matéria orgânica, de baixa energia, com substrato plano, lamoso e com amplas zonas intermarés. Juntamente com a planície de maré lamosa (ISA 9A) formam um ambiente de remoção natural extremamente lento, em caso de derramamento de óleo e derivados, devido à sua baixa permeabilidade. Nos manguezais o tempo necessário para remoção se agrava devido aos baixos níveis de energia e de biodegradação pela condição anaeróbia do substrato. O óleo é transportado até a linha de maré alta e a operação de limpeza tende a introduzir o óleo nas camadas mais profundas, o que dificulta a limpeza. Os impactos na biota para esses ambientes, e os seguintes, caracterizam-se pela asfixia dos organismos bênticos.

As paleofalésias (ISA 8A) são escarpas protegidas em leitos sedimentares e formadas predominantemente

por rochas sedimentares permeáveis com um declive superior a 50°. A percolação do óleo ocorre apenas na base e caso haja presença de blocos de rocha, o material viscoso tende a permanecer no ambiente. A taxa de remoção natural é muito lenta e a limpeza é difícil, principalmente em função do acesso. Diferentemente, para a planície arenosa e os bancos arenosos/lamosos (ISA 7) a situação diante de um derramamento de óleo e derivados é de não percolação, tendendo os mesmos a serem transportados para a zona de alcance máximo da maré alta ou transportados ao longo da costa pelas correntes de maré. As atividades de limpeza tendem a transferir o óleo para camadas mais profundas através do pisoteio ou de outras ações.

As escarpas expostas com declives íngremes em areia (ISA 3 B) possuem substratos semipermeáveis e se formam ao longo dos cursos fluviais, de falésias e de praias estuarinas a partir da ação das ondas. Juntamente com as praias de granulometria fina a média (ISA 3A)

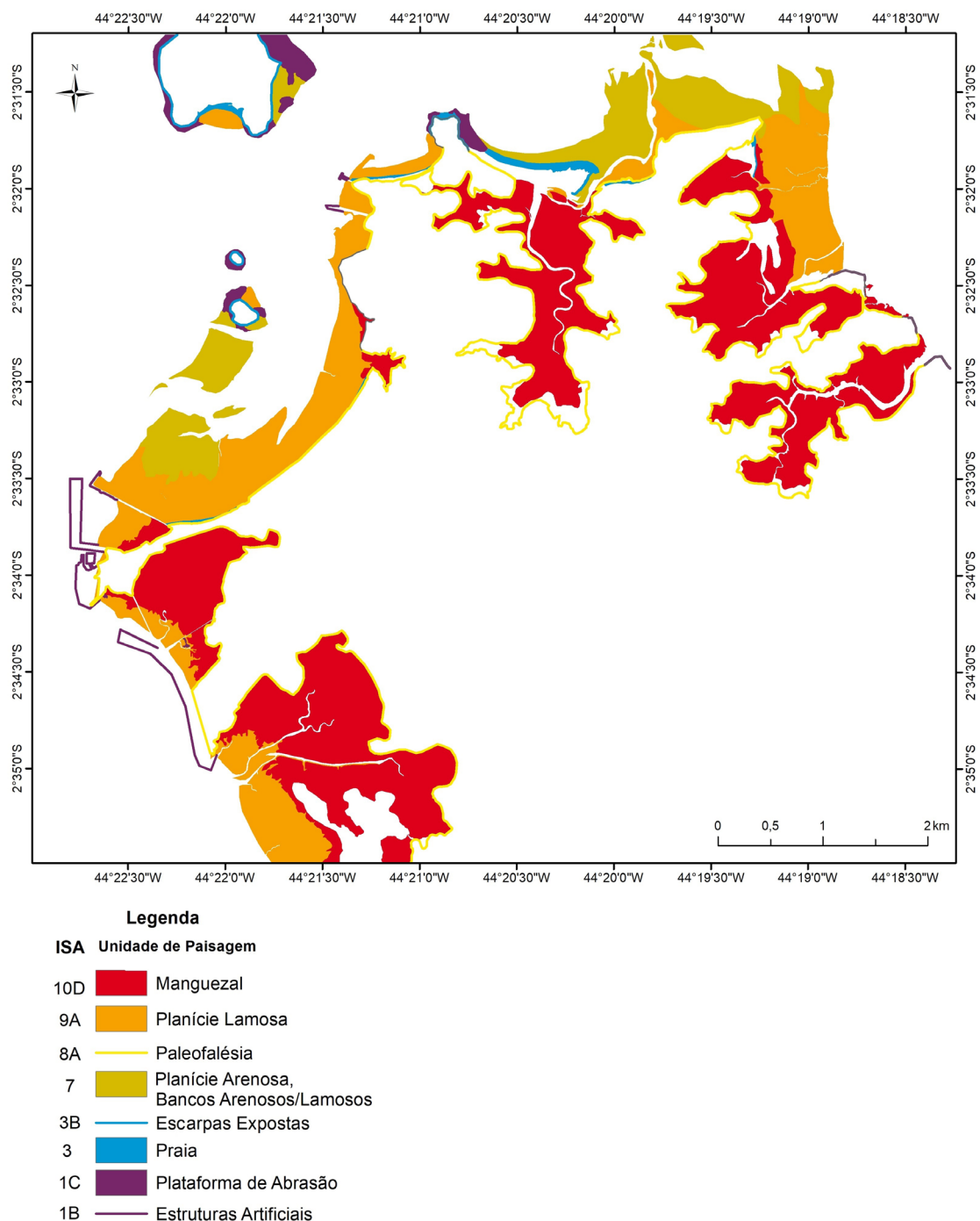


Figura 4 - Mapa de sensibilidade ambiental da área de estudo.

Figure 4 - Environmental sensitivity map of the study area.

formam um ambiente em que a penetração de óleo e derivados é pequena, inferior a 10 cm, devido à frequente ação das ondas e marés e a possibilidade de soterramento é mínima devido à lenta mobilidade da massa sedimentar. Geralmente a limpeza é necessária, sendo comumente possível o tráfego de veículos, respeitando o ciclo de marés e as eventuais restrições ambientais locais.

A plataforma de abrasão (ISA 1 C) e as estruturas artificiais (ISA 1B) possuem a superfície impermeável e

sem rugosidades, podendo apresentar uma fina cobertura de sedimentos mobilizáveis. Não há penetração de óleo e a ação de resposta ocorre com a remoção pela ação das ondas com uma altura superior a 1 m e/ou a fortes correntes de maré com tendência reflectiva. A ação de resposta tende a ser rápida e a ocorrer naturalmente. No caso de uso intensivo da faixa da maré alta para recreação ou proteção de espécies animais, a remoção de óleo é necessária.





Figura 5 - Fotografias das unidades de paisagem classificadas de acordo com o ISA (Milena Andrade e Pedro Walfir).

Figure 5 - Photos from the landscape units classified according to ESI (Milena Andrade and Pedro Walfir).

## 5. DISCUSSÃO

Os ambientes mais sensíveis a derramamento de óleo coincidem com as áreas nacionais prioritárias para a conservação da biodiversidade. Ao longo de toda a costa norte do Brasil existem quelônios, mamíferos e ainda grupos de aves que estão ameaçados de extinção (MMA, 2010). A zona costeira do Maranhão apresenta um regime de macro marés, enquanto no resto do Brasil predominam os regimes de meso e micromarés. Isso implica um litoral plano e extenso e com influência no volume de sedimentos lamosos depositados.

Essa hidrodinâmica associada com áreas planas possibilita o desenvolvimento de uma diversidade de ambientes na planície estuarina, dentre eles os deltas de maré vazante, os lagos intermitentes, os manguezais, os pântanos de água doce e salinos, e uma variedade de planícies de maré e de supramaré em função da sedimentação (Teixeira e Souza-Filho, 2009). O volume de sedimentação, as propriedades físico-químicas de regiões tropicais, e a quantidade de matéria orgânica

tem influência na formação de extensos manguezais (Hossain e Nuruddin, 2016). A composição florística na região da Baía de São Marcos varia de espécies de baixa a alta salinidade, tais como a *Rhizophora*, *Avicennia*, e a *Laguncularia*, além de uma diversidade de espécies de outros grupos (Gonçalves *et al.*, 2018).

Os estudos anteriores com sensores de média resolução espacial já apontavam para extensas áreas de manguezais nas proximidades da área portuária (Teixeira e Souza-Filho, 2009; Novaes *et al.*, 2007). Contudo, além das atividades industriais, os ambientes de maior sensibilidade ambiental são utilizados por populações locais de forma direta e indireta.

De acordo com Andrade *et al.* (2010), algumas das famílias que residem em áreas residenciais adjacentes aos manguezais possuem uma dependência quanto ao uso pesqueiro para subsistência familiar. Desse modo, as áreas de maior sensibilidade ambiental, caso venham a ser afetadas por um derramamento de óleo e derivados, possuem uma população de alta vulnerabilidade em

relação a dependência do recurso pesqueiro, baixa escolaridade e baixa renda. Além disso, o uso dos manguezais por essa população está relacionado com o desenvolvimento de atividades econômicas (Andrade et al., 2009). Ainda de acordo Andrade et al. (2010), a pesca ocorre na planície estuarina e nesta unidade a remoção do óleo seria difícil. Assim, os locais de maior prioridade de ação são as áreas de manguezais pela sua característica de sensibilidade ambiental, vulnerabilidade natural e relação com a vulnerabilidade socioeconômica. Contudo, apenas o mapeamento da sensibilidade ambiental não é suficiente. Assim, estudos de modelagem hidrodinâmica e de monitoramento dos ambientes sensíveis aos impactos tecnológicos e antropogênicos, devem dar suporte a melhores estratégias de conservação dos ambientes costeiros.

## 6. CONCLUSÕES

A metodologia de identificação das unidades de paisagem aplicada para geração do mapa de sensibilidade ambiental mostrou-se adequada. O trabalho de campo foi essencial para a verificação das unidades mapeadas. A utilização de dados de sensores remotos orbitais de alta resolução através da imagem Ikonos permitiu a produção do mapa de unidade da paisagem em detalhe, com maior rapidez, precisão e médio custo. Uma das limitações na utilização de imagens de sensores óticos é a necessidade de aquisição de imagens com uma cobertura de nuvem inferior a 25%. Assim, locais com alta nebulosidade, como a região Amazônica, dificultam a aquisição dessas imagens, principalmente no período chuvoso (Março a Junho). É importante ressaltar que devido à dinâmica da zona costeira, as imagens de alta resolução auxiliam no monitoramento de áreas com influência de sedimentação arenosa e lamosa que originam extensas planícies e bancos arenosos e lamosos.

Os produtos deste trabalho são de grande importância para decisores na hora de definir as áreas prioritárias para a conservação e para os planos e ações de resposta a derramamentos de óleo. No entanto, recomenda-se a realização de estudos do comportamento do óleo nos ambientais de maior sensibilidade ambiental para auxiliar na contenção e remoção de óleo derramado em ambientes de macromaré. Os manguezais possuem a maior sensibilidade ambiental e são áreas importantes para as populações extrativistas que usam os recursos naturais e vivem da subsistência deste ambiente de elevada importância econômica, ecológica e social.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo projeto PIATAM mar, com apoio da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), do Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico e do Projeto Rede 05 / Petromar /Petrorisco (CtPetro/FINEP/Petrobras/CNPq).

## REFERÊNCIAS

- Alvares, C.A.; Stape, J.L., Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. (2014) - Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologisch Zeitschrift*, 22(6): 711-728, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Andrade, M.M.N.de; Szlafsztein, C.F.; Souza-Filho, P.W.; Araújo, A.; Gomes, M. (2010) - A socioeconomic and natural vulnerability index for oil spills in an Amazonian harbor: A case study using GIS and remote sensing. *Journal of Environmental Management*. 91, 1972-1980. DOI :10.1016/j.jenvman.2010.04.016
- Andrade, M.M.N.de; Souza-Filho, P.W.M.; Szlafsztein, C.F. (2009) - Imagens de alta resolução para reconhecimento da susceptibilidade dos recursos sócio-econômicos à ameaça de derrame de petróleo no Complexo Portuário Itaqui-Bacanga, Maranhão, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 9: 127-133. E-ISSN: 1646-8872
- ANTAQ Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2014) - *Anuário de Transportes 2014*. <http://www.antaq.gov.br/anuario/>. Acessado em 12 de setembro de 2014.
- Araujo, S.I.; Silva, G.H.; Muehe, D.; Carvalho, M.T.M.; Menezes, P.M.L.; Alcântara, A.V.; Vargas, M.A.M.; Takahashi, L.T. (2006) - Mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo: ambientes costeiros, estuarinos e fluviais. 168p. Petrobrás, Rio de Janeiro.
- Boulhosa, M.B.M.; Souza Filho, P.W.M. (2009) - Reconhecimento e mapeamento de ambientes costeiros para geração de mapas de índice de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo, Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)*, 27: 23-37. ISSN 0102-261X
- Cardoso, G.F.; Souza, C.; Souza-Filho, P.W.M. (2014) - Using spectral analysis of Landsat-5 TM images to map coastal wetlands in the Amazon River mouth, Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, 22: 79-92. DOI: 10.1007/s11273-013-9324-4
- Cutrim, S.S.; Robles, L.T.; Pereira, N.N. (2015) - *Tópicos estratégicos portuários*. 262p., EDUFMA, São Luís, Maranhão ISBN: 978-85-7862-473-6. Disponível online <http://www.ufma.br/portalUFMA/arquivo/NMzkkp157qtQfA7.pdf>
- CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2004) - *Carta geológica do Brasil ao milionésimo- Folha SA-23.1*. Disponível em formato CD-ROM. 2004
- Dantas, M.E.; Shinzato, E.; Bandeira, I.C.N.; Souza, L.V.; Renk J.F.C. (2013) -Compartimentação Geomorfológica. In: Bandeira, I.C.N. (Org), *Geodiversidade do Estado do Maranhão*. pp. 33-62, CPRM, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.
- EMAP Empresa Maranhense de Administração Portuária (2018) - *Dados sobre operações portuárias de movimentação de carga*. Governo do Maranhão. Disponível online <http://www.portodoitaqui.ma.gov.br/porto-do-itaqui/operacoes-portuarias/movimentacao-de-carga>
- Gonçalves, A. L.; Cruz, V. M. S. da.; Campos, J. R. dos P., Souza, D. V. (2018) - Composição florística e fitossociológica do manguezal da zona portuária de São Luís, Maranhão, Brasil, *BIOFIX Scientific Journal* 3(1): 01-07 2018.

- Gonçalves, F.; Souza-Filho, P.W. (2005) - Classificação de imagens Radarsat-1 e Landsat-7 para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na zona costeira amazônica. Anais do 3º Congresso Brasileiro de PeD em Petróleo e Gás, Salvador.
- Hese, S.; Schmulilius, C. (2009) - High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11: 130–141. DOI: 10.1016/j.jag.2008.12.002
- Hossain, M.D.; Nuruddin, A.A., (2016) - Soil and Mangrove: A Review. *Journal of Environmental Science and Technology*, 9: 198-207. DOI: 10.3923/jest.2016.198.207
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2011a) - *Geomorfologia: mapa geomorfológico do estado do Maranhão*. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2011b) - *Análise dos Dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – 2001 a 2005*. Rio de Janeiro: IBGE.
- INMET Instituto Nacional de Meteorologia (2018) - *Gráficos Climatológicos*. Disponível online <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>
- IEPA Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (2016) - *Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima da Foz do Amazonas* 106p., Valdenira F. dos Santos, Amílcar C. Mendes, Odete F. M. da Silveira (in memoriam) (coordenadores), Macapá, IEPA. ISBN 978-85-87794-29-1
- Jensen, J.R.; Murday, M.; Sexton, W.J.; Green, C.J. (1993) - Coastal environment sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. *Geocarto International*, 2: 5-13. DOI: 10.1080/10106049309354404
- Kankara R.S.; S. Arockiaraj, P.K. (2016) - Environmental sensitivity mapping and risk assessment for oil spill along the Chennai Coast in India. *Marine Pollution Bulletin*, 106: 95–103. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.03.022
- Kjerfve B.; Lacerda LD. (1993) - Mangroves of Brazil. In: Lacerda LD (Ed.), *Conservation and sustainable utilization of mangrove forest in Latin America and Africa regions*. Part I - Latin America., Mangrove Ecosystem Technical Report No. 2. ITTO/ISME, Okinawa, 272 pp.
- Lobo, J.C.; Gaspar, R.B.; Neves, E.M.; Ferreira, A.T. (2005) - Risco, previsão e apoio: As políticas compensatórias empregadas face ao derrame de óleo. In: Rivas, A. A. F. (ed.), *Anais do 1º Congresso Internacional PIATAM*. Manaus, Editora da UFAM. p.308.
- Martins, P.T.deA.; Riedel, P.S.; Milanelli, J.C.C. (2013) - Environmental sensitivity map for oil spill: origin, evolution and trends. *Ciência e Natura*, 35(2): 163-175.
- MMA Ministério do Meio Ambiente (2010) - *Panorama da conservação dos ecossistemas costeiros e marinhos no Brasil*. 148p., Brasília, MMA/SBF/GBA. ISBN 978-85-7738-142-5
- MMA Ministério do Meio Ambiente (2016). *Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo das Bacias Marítimas do Pará-Maranhão e Barreirinhas*. 127p., Souza-Filho, P. W. M. (Org), Brasília, MMA, SMCQ. ISBN 978-85-63728-46-3
- MMA Ministério do Meio Ambiente (2004) - *Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo*. 107p., Ministério do Meio Ambiente, Rio de Janeiro. [http://www.mma.gov.br/estruturas/projeto/\\_arquivos/cartassao2007port.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/projeto/_arquivos/cartassao2007port.pdf)
- Moreira, M.A. (2001) - *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 250 p., INPE, São José dos Campos. ISBN: 9788572693813
- Nascimento, W.R.; Souza-Filho, P.W.M.; Proisy, C.; Lucas, R.M.; Rosenqvist, A. (2013) - Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science (Print)*, 117: 83-93. DOI: 10.1016/j.ecss.2012.10.005
- Noernberg, M.A., Lana, P., (2002) - A sensibilidade de manguezais e marismas a impacto por óleo: fato ou mito? Uma ferramenta para avaliação da vulnerabilidade de sistemas costeiros a derrames de óleo. *Geografares* 3: 109-122. DOI: 10.7147/GEO3.1120
- Novaes, R. C., Tarouco, J.E.; Rangel, M.E.; Dias, L.J.B.S. (2007) - *Análise da Sensibilidade Ambiental da parte Ocidental da Ilha do Maranhão*. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 4089-4096.
- Petersen J.; Michel J.; Zengel S.; White M.; Lord C.; Plank C. (2002) - Environmental sensitivity index guidelines. 192p., National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), NOAA Technical Memorandum NOS OReA 11, version 3.0, Seattle. [http://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ESI\\_Guidelines.pdf](http://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ESI_Guidelines.pdf)
- Rebello-Mochel F. (1997) - Mangroves on São Luís Island, Maranhão Brazil. In: Kjerfve B., Lacerda L.D. e Diop E.H.S. (Ed.), *Mangrove ecosystem studies in Latin America and Africa*; UNESCO, Paris, pp.145–154.
- Rodrigues, Suzan W.P. ; Souza-Filho, Pedro W. M. (2012) - Environmental sensitivity index mapping to oil spill from Landsat TM images: a study case in the amazon coastal plain. *Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)*, 30:1-12. DOI: 10.22564/rbgf.v30i4.240
- Rodrigues, S.W.P.; Souza-Filho, P. W. M. (2011) - Use of Multi-Sensor Data to Identify and Map Tropical Coastal Wetlands in the Amazon of Northern Brazil. *Wetlands*, 31:11–23. DOI: 10.1007
- Rodrigues, Suzan W.P.; Souza-Filho, Pedro W. M. (2011b) - Índice de sensibilidade ambiental (ISA) a partir do processamento de imagens Landsat TM para o noroeste do Pará (Curuçá - Pa, Brasil). Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.5070
- Santos, C.F., Andrade, F. (2009) - Environmental sensitivity of the Portuguese coast in the scope of oil spill events-comparing different assessment approaches. *Journal of Coastal Research*, 885–889. ISSN 0749-0258
- Souza Filho, P. W. M.; Silva, C. G.; Miranda, F.P.; Borges, H. V. (2009a) - Sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo na zona costeira e marinha amazônica: reconhecimento, princípios e aplicações. *Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)*, 29: 5-6. DOI: 10.1590/S0102-261X2009000500001
- Souza Filho, P. W. M.; Gonçalves, F.D.; Rodrigues, S.V.P.; Costa, F.R.; Miranda, F.P. (2009b) - Multi-sensor data fusion for geomorphological and environmental sensitivity index mapping in the Amazonian mangrove coast, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 56: 1592-1596. ISSN 0749-0258

- Souza-Filho, P.W.M., Prost, M.T.R.C., Miranda, F.P., Sales, M.E.C., Borges, H.V., Costa, F.R., Almeida, E.F., Nascimento Junior, W.R. (2009c) - Environmental sensitivity index (ESI) mapping of oil spill in the amazon coastal zone: the PIATAM Mar project. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27: 07-22. DOI: 10.1590/S0102-261X2009000500002
- Teixeira, S. G.; Souza Filho, P. W. M. (2009) - Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27: 69-82.
- Vethamony, P., Sudheesh, K., Babu, M.T., Jayakumar, S., Manimurali, R., Saran, A.K., Sharma, L.H., Rajan, B., Srivastava, M., 2007. Trajectory of an oil spill off Goa, eastern Arabian Sea: field observations and simulations. *Environment Pollution*. 148, 438–444. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.12.017
- ZCEMA Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão (2003) - *Produto 3: Diagnóstico do Meio Sócio-Econômico*. 90p. Governo do Maranhão. <http://www.zee.ma.gov.br/Portal/publicacoes>