

Article

Vulnerabilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo em Santarém (PA)

Dayara Bastos Palheta ^{1*} , Fábio Ferreira Dourado ² , Anderson Alvarenga de Moura Meneses ³ , Suzan Waleska Pequeno Rodrigues ⁴ , Milena Marília Nogueira de Andrade ⁵ 

¹ Mestrado (Universidade Federal do Oeste do Pará), ORCID: 0000-0002-3731-7293, E-mail: dayarapalheta@gmail.com

² Mestrado (Universidade Federal do Paraná), ORCID: 0000-0003-4187-8787, E-mail: fabioo.f.dourado@gmail.com

³ Doutorado (Universidade Federal do Oeste do Pará), ORCID: 0000-0003-1461-2772, E-mail: anderson.meneses@pq.cnpq.br

⁴ Doutorado (Universidade de Brasília), ORCID: 0000-0002-3256-8544, E-mail: suzanufpa@gmail.com

⁵ Doutorado (Universidade Federal Rural da Amazônia), ORCID: 0000-0001-5799-7321, E-mail: milenamarilia.andrade@gmail.com

*Correspondence: dayarapalheta@gmail.com

ABSTRACT

Oil spills can affect the natural and anthropic environment. The objective of the present work deals with the mapping of the environmental vulnerability to oil spill, from commercial and tourist transport in Santarém city (Pará state). For this, thematic maps of: land use / occupation and vegetation cover, slope, soil, geology and flooding were used as a basis, applying analysis and modeling in (GIS), through map algebra, in hierarchical categories according to vulnerability classes for each mapped variable, with values from “1” (least vulnerable) to “5” (most vulnerable). An analysis of the environmental vulnerability map, regions of high and very high vulnerability obligatory in the urban area where floods occur. The predominance of the medium vulnerability class, corresponding to 45%, is mainly due to the interaction of the land use class with a lithological unit of sediments referring to the Alluvial Deposits and the Alter do Chão Formation. This class includes the Organized Port of Santarém with intense activities for transporting cargo and people. Thus, the results obtained serve as an auxiliary instrument for environmental planning for the region’s most vulnerable to oil spills on the edge of Santarém - PA.

Keywords: environmental vulnerability; remote sensing; river environments; oil spill; land-use.

RESUMO

Derramamentos de óleo podem impactar o ambiente natural e antrópico. O objetivo do presente trabalho trata do mapeamento da vulnerabilidade ambiental ao derramamento de óleo, provenientes dos transportes fluviais, comerciais e turísticos na orla da cidade de Santarém (estado do Pará). Para isso, foram utilizados como base mapas temáticos de: uso/ocupação do solo e cobertura vegetal, declividade, solo, geologia e de inundação, aplicando análise e modelagem em (SIG), através da álgebra de mapas, em categorias hierárquicas de acordo com classes de vulnerabilidade para cada variável mapeada, com valores de “1” (menos vulnerável) a “5” (mais vulnerável). A análise do mapa de vulnerabilidade ambiental, demonstrou regiões de alta e muito alta vulnerabilidade localizadas na área



Submissão: 11/06/2020



Aceite: 11/04/2022



Publicação: 29/04/2022



urbana onde ocorrem inundações. A predominância da classe de média vulnerabilidade, correspondente a 45% dos resultados devido principalmente à interação da classe de uso do solo com a unidade litológica de sedimentos referentes ao Depósitos Aluvionares e a Formação Alter do Chão. Nesta classe está inserido o Porto Organizado de Santarém com atividades intensas de transporte de cargas e pessoas. Assim, os resultados produzidos servem de instrumento auxiliar ao planejamento ambiental para as regiões mais vulneráveis ao derrame de óleo na orla de Santarém – PA.

Palavras - chave: vulnerabilidade ambiental; sensoriamento remoto, ambientes fluviais, derramamento de óleo; uso do solo.

1. Introdução

Os rios como meio de transporte desempenham um papel importante no desenvolvimento das atividades econômicas na região amazônica. O aumento da navegação nos rios e a construção de infraestrutura portuária ao longo de suas margens são atividades potenciais de derramamento de óleo (Cunha et al. 2021). Esta condição de risco ambiental evidencia a necessidade de compreender a sensibilidade da área, assim como os fatores que irão influenciar nas ações de contingência em caso de acidentes (Pessoal et al. 2018).

As principais cidades paraenses da mesorregião do Baixo Amazonas estão as margens do rio Amazonas. Concentram tanto a maior densidade populacional dos municípios quanto uma diversidade de infraestrutura e serviços. Portando o acesso fluvial funciona como o eixo principal de escoamento de produtos e tráfego de pessoas. As margens dos rios comportam terminais hidroviários formais e não formais com embarcações de diversos portes influenciando diretamente na dinâmica das cidades e em potenciais conflitos socioambientais (Andrade et al. 2010, Cortes et al. 2020, Cunha et al. 2021).

Dentre as importantes áreas urbanas nas margens do rio Amazonas a cidade de Santarém situada na confluência deste rio com o rio Tapajós possui um intenso fluxo de tráfego fluvial. A zona portuária da cidade é considerada uma das principais rotas hidroviárias da mesorregião do Baixo Amazonas, com a presença de diferentes tipos de embarcações (ANTAQ 2018). Levando-se em consideração a grande quantidade de pontos de atracamento de embarcações ao longo da orla de Santarém, tanto para finalidade comercial quanto para turística a cidade conta com portos públicos e privados. O Porto Organizado é um empreendimento estadual da Companhia Docas do Pará – CDP localizado na orla da cidade, e na porção mais a norte está localizado o porto de escoamento da empresa Cargill S.A. (ANTAQ 2018). Há ainda dois portos com terminais fluviais (porto Tiradentes e da Prainha) que abrigam vários empreendimentos, com atividades que vão desde a exportação de graneis sólidos e líquidos até atividades ligadas ao deslocamento intermunicipal, interestadual. Além do planejamento de três Terminais de Uso Privados (TUP) que estão projetados e previstos no Complexo Portuário de Santarém para a região leste de Santarém na área do Lago do Maicá (Cortes et al. 2020).

Como forma de prevenir, controlar e fiscalizar a poluição causada por eventuais lançamentos de óleo a Lei 9.966 de 2000 em seu art. 7 prevê a necessidade de planos de emergência individuais. O conteúdo mínimo do plano de emergência deve ser elaborado considerando procedimentos para proteção de áreas vulneráveis (BRASIL 2008). Como forma de prevenção de danos maiores, o mapa de vulnerabilidade ambiental aponta os locais de alta vulnerabilidade que necessitam de atenção prioritária (Ipieca 2012).

As avaliações de vulnerabilidade são utilizadas como um recurso de tomadas de decisão para futuras instalações de atividades econômicas, levando em conta a capacidade de suporte dos ambientes terrestres, fluviais e marinhos (Petersen 2002, Ipieca 2012, Nelson & Grubestic 2017, Azevedo et al. 2017). A ideia de vulnerável equivale ao ponto mais fraco ou mais vulnerável, ou seja, sensíveis aos ataques diretos. A vulnerabilidade é sinônimo de “susceptibilidade de um meio ao impacto negativo com relação a um determinado risco” (NOAA 1999).

A vulnerabilidade ambiental é um mecanismo muito utilizado na análise de zonas sobre influência de corpos d’água, pois disponibiliza informações sobre o comportamento dos ambientes, em relação as suas múltiplas relações com as pressões de uso e ocupação humana (Nelson & Grubestic 2017). Para tanto, em 1999/2001, o U.S. Geological Survey (USGS) realizou estudo de vulnerabilidade para identificar áreas costeiras na América do Norte com maior susceptibilidade às cheias (Hammar-Klose et al. 2003).

Alguns dos estudos em relação a vulnerabilidade no Brasil foram produzidos com diferentes enfoques por Crepani et al. (1996, 2001), Carvalho et al. (2003), Ribeiro e Campos (2007), Nascimento e Dominguez (2009), Andrade et al. (2009), Rodrigues e Souza-Filho (2012), Romero et al. (2013), Germani et al. (2015), Monteiro et al. (2020), Souza-Filho (2017), Azevedo et al. (2017). Esses autores estudaram a vulnerabilidade natural e ambiental, utilizando índices que avaliassem as condições das áreas estudadas a



partir da junção de várias informações temáticas. Dentro do ambiente amazônico, onde está inserida a área de estudos Santos et al. (2016) e Souza-Filho (2017) geraram Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo com base no índice de sensibilidade do litoral para zona costeira da Amazônia, o que auxilia no reconhecimento de ambientes similares e no comportamento destes a um derramamento de óleo. Contudo para áreas fluviais a realização desses estudos ainda são incipientes. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi realizar o mapeamento da vulnerabilidade ambiental ao derramamento de óleo na orla de Santarém-PA com o intuito de auxiliar no gerenciamento portuário da região.

Área de estudo

O município de Santarém está localizado na região norte do Brasil, porção oeste do Estado do Pará, possui área de aproximadamente 23.000 km² (IBGE 2014). A sede urbana municipal está organizada em 48 bairros. Localiza-se na margem dos rios Amazonas e Tapajós e a hidrografia principal da sede urbana corresponde as bacias dos Igarapés Irurá e Urumari (Figura 1).

Geologicamente a área de estudo está sobreposta a Formação Alter do Chão e aos Depósitos Aluvionares. A primeira é composta por uma camada espessa de arenitos intercalados com camadas rochas pelíticas e, em menor escala, de conglomerados com níveis lateríticos subordinados aos arenitos e argilitos (Caputo et al. 1971, Daemon 1975, Tancredi 1996). Os depósitos aluvionares constituem-se de sedimentos clásticos inconsolidados arenosos a argilosos, com níveis de cascalho e matéria orgânica, inconsolidados a semi-consolidados (Matsuda et al. 2010). Estão relacionados às planícies aluvionares, e planícies de inundação, podendo atingir dezenas de quilômetros de extensão e largura (Vasquez & Rosa-Costa 2008).

A geomorfologia é composta pelas unidades morfoestruturais: Planície Amazônica e o Planalto Rebaixado da Amazônia (Jorge-João et al. 2013). A primeira possui como característica áreas alagadas e inundáveis, sendo as feições mais comuns desta unidade as ilhas fluviais, igarapés, vales fluviais de foz afogadas, lagos, diques aluviais, canais e cordões de areia e várzeas (Tancredi 1996, Jorge-João et al. 2013). O Planalto Rebaixado da Amazônia (ou Planalto Tapajós-Xingu) é caracterizado por platôs e as extensas superfícies tabulares com altitudes que variam entre 120 e 170 m (Jorge-João et al. 2013).

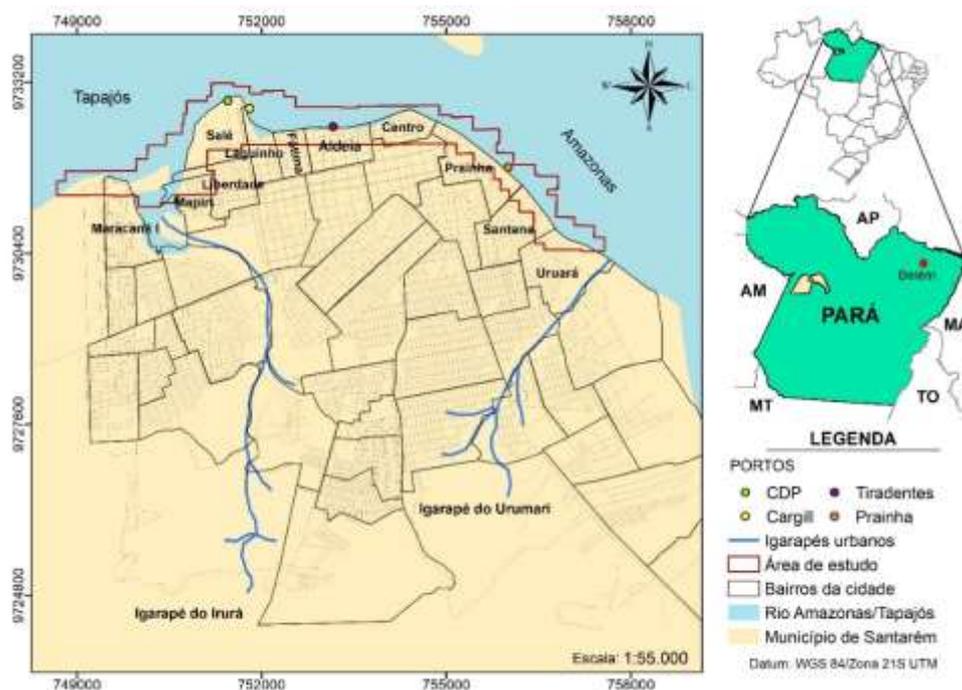


Figura 1 Mapa de localização da sede urbana de Santarém e dos portos da cidade. Em destaque o polígono compoendo a área de estudo, abrangendo 11 bairros localizados na margem da cidade (Fonte de dados IBGE 2014).



MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um mosaico de uma Ortofoto do ano de 2007 da DigitalGlobe® com resolução espacial de 1 m. Foram gerados dados de declividade a partir de imagem de modelo digital de superfície (MDS) do sensor PALSAR/FBD polarimétrico de abertura sintética de banda larga de polarização simples do satélite ALOS, cena 227-62 registrada no ano de 2011, obtida no geoportal *Earth Explorer*. Além disso foram adquiridos outros mapas temáticos de fontes secundárias da área de estudo, como: dados de solo 1:5.000.000 (EMBRAPA 2001), geologia 1:1.000.000 (Vasquez & Rosa-Costa 2008) e mapa de inundação 1:40.000 (Dourado et al. 2017). Toda a base cartográfica e confecção dos mapas foram produzidas utilizando álgebra de mapas em GIS, a partir de técnicas de geoprocessamento no ArcGis 10.3.

Mapa de uso e cobertura da terra

Para a confecção do mapa de uso e cobertura da terra foi utilizando um mosaico de ortofoto corrigido geometricamente. Com o mosaico setorizado, foi realizada inicialmente uma classificação não-supervisionada, utilizando o algoritmo *Iso Cluster*. Esta fase serviu como base para uma classificação preliminar antes de ser realizado o trabalho de campo. Após a classificação automática foi realizada uma edição manual, em função da resposta espectral semelhante de alguns alvos, ao qual resultou em 10 classes. Para a edição manual o arquivo *raster* (gerado na classificação) foi convertido para a extensão *shapefile*, para finalmente ser realizada a síntese do mapa.

Trabalho de Campo

O trabalho de campo consistiu no reconhecimento *in loco*, validação e retificação das regiões apresentadas pelo mapa de uso e cobertura da terra ao longo da orla que abriga os ambientes fluviais e áreas antropizadas, feito com o auxílio do GPS e escalas granulométricas. Em campo foram reconhecidos os tipos de atividades antrópicas presentes, tais como: atividades portuárias, comerciais, industriais, de transporte, turismo/lazer e habitação, assim como obras de contenção da margem, possíveis pontos de poluição, além das discontinuidades na vegetação.

Das 10 classes previamente estabelecidas pela classificação não-supervisionada, foram reconhecidas somente 6 classes em campo, e a partir disso foi composto o mapa final de uso e cobertura da terra.

Integração e análise de dados

Foram atribuídos valores empíricos que variaram de 1 a 5 sendo escalonados de baixo a muito alto, respectivamente, para a determinação das classes de vulnerabilidade ambiental ao derramamento de óleo. Foram considerados critérios para cada variável adotada neste trabalho (Quadro 1) (Nascimento & Dominguez 2009, Demarchi et al. 2013, Balogun et al. 2020, Udoh & Ekanem 2011, Dongdong 2015).

Quadro 1 - Variáveis e critérios adotados para análise da vulnerabilidade ambiental ao derramamento de óleo.

Variáveis	Critérios
Uso e cobertura da terra	Proteção da paisagem e biodiversidade da biota
Declividade	Variação de declividade
Solos	Maturidade pedogenética
Declividade	Variação de declividade
Geologia	Tempo geológico e fragilidade
Inundação	Riscos naturais

Fonte: Nascimento e Dominguez (2009), Germani et al. (2015).

De acordo com Nascimento e Dominguez (2009) as classes de vulnerabilidade representam condições ambientais que apontam para diferentes fragilidades ou potencialidades naturais. As classes de mais baixa vulnerabilidade ambiental apresentam menores



propensões de serem afetadas por óleo. Já as classes de alta e muita alta vulnerabilidade ambiental apresentam maior possibilidade de danos ambientais.

Para avaliar a vulnerabilidade ambiental ao derramamento de óleo na área de estudo foram construídos cinco mapas temáticos: uso e cobertura da terra, declividade, solos, geológico e mapa de inundação. Aos quais foram atribuídos graus de vulnerabilidade a cada um dos mapas (Tabela 1). As unidades de cada tema, as classes e o grau de vulnerabilidade foram adaptadas de: Crepani et al. (2001), Gomes et al. (2005), Nascimento e Dominguez (2009), Demarchi et al. (2013). Para o mapa de inundação os critérios foram definidos a partir das recorrentes inundações, na área. O mapa foi gerado para o evento de inundação gradual e indicou ao todo 14 bairros com risco de escala moderada e alta (Dourado et al. 2017). Todos esses bairros estão situados às margens dos rios em regiões com baixas altitudes e suaves declividades apresentando-se nas regiões norte e noroeste na área de estudo (Andrade & Szlafsztein 2015).

Tabela 1 Grau de vulnerabilidade das classes dos mapas temáticos.

Mapa Temático	Classes	Grau de Vulnerabilidade
Uso e cobertura da terra	Núcleo urbano	5
	Solo exposto	5
	Vegetação	1
	Planície lamosa vegetada (várzea)	4
	Praias fluviais	5
	Área antropizada	5
Declividade (%)	<2	1
	2-6	1,5
	6-20	2
	20-50	2,5
Solos	Argissolos Vermelho-Amarelo	2,2
	Distrófico	
	Gleissolo Háplico	5
Geologia	Formação Alter do Chão	3
	Depósitos Aluvionares	5
Inundação	0	1,3
	0-0.49	1,5
	0.5-09	1,7
	1	2,1

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001), Nascimento e Dominguez (2009), Demarchi et al. (2013).

Após esta etapa gerou-se o mapa de vulnerabilidade natural, a partir da correlação dos aspectos naturais de declividade, solos, geologia e inundação, conforme a Equação 1.

Foi realizada uma reclassificação, em cada um dos temas selecionados. A reclassificação consistiu em atribuir os pesos para cada unidade descrita acima e variam de 1 a 5 (baixa a muito alta) (Tabela 2).

$$VN = \frac{(Tm\ 1 + Tm\ 2 + Tm\ 3 + Tm\ 4)}{4} \quad (1)$$

Onde, a variável VN corresponde a vulnerabilidade natural, “tema 1” é o mapa geológico, “tema 2” o mapa de solos, “tema 3” o de declividade e “tema 4” o mapa de inundação.

Tabela 2 Classes de vulnerabilidade.



Classificação	Grau
Baixo	1 - 2
Baixa a Média	2 - 3
Média	3 - 4
Alta	4 - 4.8
Muito Alta	4.8 - 5

Fonte: Nascimento & Dominguez (2009).

Após processamento, o mapa de vulnerabilidade natural foi integrado com o mapa de uso e cobertura da terra, com a finalidade de gerar o mapa de vulnerabilidade ambiental ao derramamento de óleo. Obteve-se essa composição por álgebra de mapas, com a reclassificação final dos valores segundo as classes definidas, de acordo com a Equação 2.

$$VA = \frac{(Tm \ 5 + VN)}{2} \quad (2)$$

Na qual, a variável VA é a vulnerabilidade ambiental, VN o mapa de vulnerabilidade natural e "tema 5" o mapa de uso e cobertura da terra.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O mapa de uso e cobertura da terra apresentam 6 classes: núcleo urbano, solo exposto, vegetação, planície lamosa vegetada (várzea), praias fluviais e áreas antropizadas uma área total de 358 hectares (ha) (Figura 2a). As classes com maiores representatividades foram: solo exposto e área urbana, com cerca de 150 ha (42%) e 80 ha (22%), respectivamente. A classe de praias fluviais representa uma área de 49 ha, com 14% da área. Por fim, as classes com menores representatividades são: vegetação, várzea e área antropizada, com cerca de 36 ha (10%), 34 ha (9%) e 9 ha (3%), respectivamente (Tabela 3).

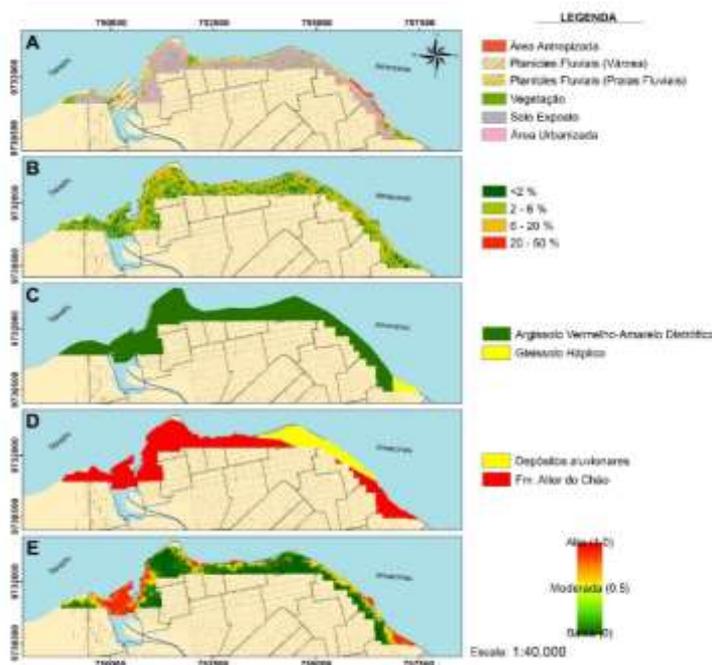


Figura 2. Mapas temáticos. (A) Uso e cobertura da terra; (B) Declividade; (C) Solo (EMBRAPA 2001); (D) Geologia (Vasquez & Rosa-Costa 2008); (E) Inundação (Dourado et al. 2017). Fonte da base de dados de fundo: IBGE 2014.

Tabela 3 Valores das áreas em ha para as classes do mapa de uso e cobertura da terra



Classes	Área (ha)	Porcentagem %
Área antropizada	9	3
Várzea	34	9
Praias fluviais	49	14
Vegetação	36	10
Solo exposto	150	42
Área urbanizada	80	22
	358	100%

Rodrigues e Souza-Filho (2012) conduziram um estudo para o ambiente amazônico e identificaram feições semelhantes às da planície lamosa vegetada (várzea) como as localizadas a oeste da área de estudo. Ainda que, considerado um ambiente mais argiloso, esta área possuiu uma camada de sedimentos de granulometria menor, com areia de granulometria fina na profundidade de 50 cm. Mesmo próximo as áreas portuárias este ambiente é classificado de baixa vulnerabilidade, devido a coesão do material e presença de vegetação, que ajudam a reter o óleo, dificultando a infiltração devido a presença das raízes das árvores (Nielson et al. 2020).

A classe praias fluviais, também identificada por Corrêa e Rodrigues (2021) ocorre em quase toda a extensão da área de estudo. Sua primeira ocorrência é a oeste com pouca intervenção antrópica, no bairro de Maracanã, a qual é utilizada como lazer e atrativo turístico. Embora sofra intervenção antrópica reconheceu-se a litologia; e planície lamosa vegetada, referente as áreas de várzea. São caracterizados por diversas nuances, que variam de áreas bem preservadas a degradadas. Identificou-se também uma transição entre sedimentos degradados das rochas preexistentes e sedimentos com granulometria de média a fina, podendo ocorrer sedimentos, ao longo da barra arenosa com granulometria fina e coloração esbranquiçada.

Na orla da cidade encontram-se porções moderada a fortemente antropizada, onde notou-se a presença constante de resíduos sólidos e intensa atividade portuária. Esta classe conta também com a presença de um muro de contenção á descrito por Andrade e Szlafsztein (2015) como uma medida estrutural para conter danos das inundações. São comuns nessas áreas, também, o lançamento de efluentes no rio (Corrêa & Rodrigues 2021). A vegetação é escassa e quando ocorre, são gramíneas e arbustos, com estado precário de preservação (Corrêa & Rodrigues 2021), ainda assim, havia presença de areia, que varia de fina a média.

As classes núcleo urbano e solo exposto se fazem presente obtiveram valores mais elevados de vulnerabilidade, um uma vez que, essas classes interagem com a unidade litológica de sedimentos recentes, caracterizando grau de vulnerabilidade muito altos. Estas áreas apresentam altos riscos ao derramamento de óleo provenientes dos pontos de atração, pois são terrenos naturalmente frágeis decorrente das ocupações desordenadas. Estas classes estão sobre a influência de áreas de proteção ambiental, áreas paisagísticas, áreas portuárias, zona comercial e patrimônio histórico

Nas regiões intensamente antropizadas não foi possível reconhecer o tipo de material constituinte do ambiente, devido a concentração de resíduos sólidos como materiais de construção; possivelmente, das extensas atividades portuárias ligadas ao transporte de mercadorias e passageiros. Há presença de balcões de armazenamento de mercadorias, contêineres, balsas e embarcações menores. Estas áreas são consideradas de alta a muita alta vulnerabilidade ambiental, pois são as regiões mais afetadas pelas atividades desenvolvidas, devido à falta de cobertura vegetal e a alta permeabilidade do solo exposto.

A classe vegetação foi melhor reconhecida a leste e a oeste. A oeste são mais densas e numerosas, típicas de ambiente de várzea. A leste são mais escassas e pouco frequente, e com ocorrência de árvores de porte pequenos e muitos arbustos, bem como gramíneas. A norte, quando ocorrem são típicas de ações antropogênicas, gramíneas e árvores de pequeno porte.

No mapa de declividade (Figura 2b) foram identificadas declividades entre 20% a 50%, sendo que nas áreas mais próximas aos ambientes estudados, predominaram as inferiores a 2%. As inclinações com baixo grau em terrenos planos ou quase planos, possibilitam escoamento superficial lento a muito lento. Este padrão ocasiona dificuldades na rede de drenagem fluvial, facilitando possível contaminação dos ambientes em casos de desastres ao derramamento de óleo. Por serem planos também são ambientes propícios a alagamentos, responsáveis por inundações periódicas em áreas de várzea, como evidenciado por Cunha et al. (2021), que conduziram um trabalho no ambiente amazônico semelhante ao da área estudada. As áreas de moderada vulnerabilidade estão situadas



nas interfaces entre o relevo de colina e planície, de baixa declividade e altitude, as quais ocorrem nos bairros: Aldeia, Centro, Caranazal, Maracanã I, Maracanã, Uruará, Área Verde, Pérola do Maicá e Uruará.

No mapa de solo (Figura 2c) os Argissolo Vermelho-amarelo distrófico são considerados mais maduros, pois possuem boa drenagem e permeabilidade. Além de se desenvolverem sobre florestas e em contato com savanas e florestas ombrófilas (Araujo et al. 1976) o que lhes confere baixa vulnerabilidade. Já os Gleissolos háplicos, são desenvolvidos sobre sedimentos de idade recente, apresentando textura argilosa, comuns em planícies de inundação vegetações de várzea (Araujo et al. 1976), o que confere alta vulnerabilidade. Entretanto, boa parte destes solos foram afetadas pela zona urbana, sendo recobertos por asfalto e/ou concreto diminuindo a permeabilidade e promovendo um maior escoamento superficial, situação que se agrava, durante os períodos de inundações.

No mapa geológico (Figura 2d) os Depósitos Aluvionares correspondem a sedimentos recentes (Holoceno) e abrangem a menor porção da área de estudos, localizados a leste da região. Esta unidade apresentou elevado grau de vulnerabilidade, constituindo-se em sedimentos inconsolidados, conferindo-lhes alta instabilidade e permeabilidade em caso de derramamento de óleo. A Formação Alter do Chão representa uma litologia intermediária, em relação ao grau de coesão dos sedimentos, uma vez que é de idade Neocretácea (Daemon & Contreiras 1971). Devido suas características e idade geológica, atribuiu-se grau da vulnerabilidade intermediário.

No mapa de inundação (Figura 2e) as áreas mais baixas são áreas mais susceptíveis às inundações. Todos esses bairros estão situados às margens dos rios em regiões com baixas altitudes e suaves declividades apresentando-se nas regiões norte e noroeste na área de estudo. Em Santarém eventos de inundação gradual já afetaram 14 bairros com risco de escala moderada e alta (Dourado et al. 2017). Uma característica da área é a variação de cota fluviométrica durante as máximas e mínimas do rio Amazonas ao longo do ano (Andrade & Szlafsztein 2015). Esses elevados níveis da cota fluviométrica influenciam no processo de dispersão do óleo (Balogun et al. 2020). Portanto as recorrentes inundações na área apontam índice de baixa a média vulnerabilidade.

No mapa de vulnerabilidade ambiental ao derramamento de óleo ocorrem graus de baixa a muito alta vulnerabilidade (Figura 3) com uma área total de 358 há (Tabela 4). No mapa identificam-se regiões com maiores representatividades nas classes média e baixa a média vulnerabilidade. Onde de vulnerabilidade muito alta (4,8 - 5) com 1% (6 ha), alta vulnerabilidade (4 - 4,8) com 15% (53 ha), média vulnerabilidade (3 - 4) com 45% (161 ha), classe baixa a média (2 - 3) com 30% (108 ha) e baixa vulnerabilidade (1 - 2) com 30% (9 ha). As áreas de muito alta vulnerabilidade estão localizadas no bairro Uruará, a leste da área. Enquanto as áreas de alta vulnerabilidade estão localizadas nos bairros Aldeia, Fátima, Laginho, Salé, Liberdade, Mapiri e Maracanã a norte e oeste da área de estudo.

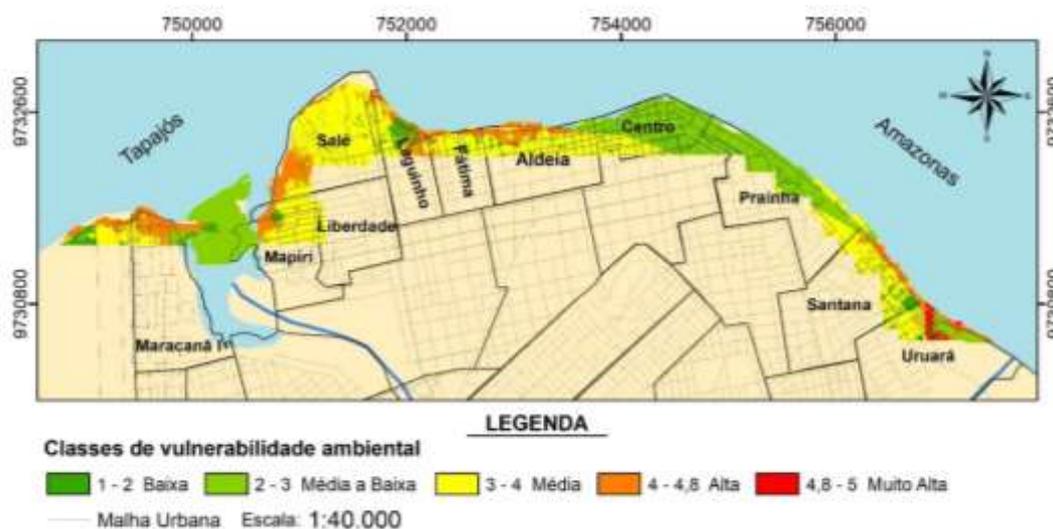


Figura 3 Mapa com as classes de vulnerabilidade e graus de pertinências. Fonte da base de dados de fundo: IBGE 2014.

Tabela 4 Valores de áreas em ha para as classes do mapa de vulnerabilidade ambiental.



Classes de vulnerabilidade	Grau	Área (ha)	Porcentagem (%)
Baixa	1 - 2	30	9
Baixa a Média	2 - 3	108	30
Média	3 - 4	161	45
Alta	4 - 4.8	53	15
Muito Alta	4.8 - 5	6	1
		358	100%

As regiões de vulnerabilidades altas e muito altas englobam principalmente os ambientes fluviais, que foram individualizadas de diferentes formas de uso e tipos de ocupações na zona fluvial dos rios Tapajós e Amazonas. Portanto esses graus mais elevados ocorrem, preferencialmente, de forma horizontal devido a maior concentração de sedimentos inconsolidados, e das baixas declividades, características de ambientes de planícies, como os estudados.

A classe de vulnerabilidade muito alta (4,8 - 5) ocorre principalmente próximas as Áreas Antropizadas e Praias Fluviais, e engloba uma área total de 30 ha, correspondendo a 9% em relação aos outros temas. Nestas classes também ocorrem as principais atividades de embarque e desembarque de mercadorias e pessoas. Um derramamento de líquidos inflamáveis em ambas as classes mapeadas dificultaria o processo de remediação (Monteiro et al 2020). A classe de alta vulnerabilidade ambiental (4 – 4.8) inclui também as regiões em que a classe Área Urbanizada se relaciona com as áreas de inundação, a geologia, de ambas as idades de sedimentação; abrangendo uma área total de 53 ha (15% da área).

A classe de média vulnerabilidade (3 - 4) e classe baixa a média (2 - 3) totalizam uma área respectivamente de 161 ha (45%), e 108 ha (30%), respectivamente, sendo as maiores representatividades na área de estudo, correspondendo as classes Área Urbana e Solo Exposto caracterizadas por classes de declividade inferiores a 2%, coincidindo com a presença de Argissolos Vermelho-amarelo distrófico. Tais regiões tiveram sua vulnerabilidade amenizada, provavelmente devido à maior maturidade deste tipo de solo, entretanto, esta região ainda se constitui em uma área de elevada vulnerabilidade a derrames de óleos, devido ao alto peso das variáveis solo exposto, áreas urbanizadas e a geologia, principalmente por conta dos depósitos aluvionares.

A classe de baixa vulnerabilidade com área de 9 ha (30%), ocorre nas áreas onde a vegetação é mais densa e nas classes de Planícies de inundação com e sem vegetação. Nas áreas mais vegetadas, caracterizadas principalmente pela vegetação de várzea, e a presença de vegetação auxilia na retenção de água no solo, diminuindo a velocidade do escoamento superficial e consequentemente as taxas de erosão, conferindo maior estabilidade ao terreno e menor infiltração de óleo na vegetação.

O mapa de vulnerabilidade ambiental ao derramamento de óleo pode ser muito útil para mitigar os danos. Esses dados também podem orientar protocolos de resposta para priorizar a proteção de áreas com vulnerabilidade elevada. Uma vez que esses mapas são um guia para protocolos de resposta priorizando áreas degradadas (Monteiro et al. 2020). Resultados semelhantes obtidos para o ambiente amazônico podem ser encontrados em Souza-Filho et al. (2009), Andrade et al. (2010), Rodrigues & Souza-Filho (2012), Souza-Filho (2017), Pessoa et al. (2018) Cunha et al. (2020) e Corrêa & Rodrigues, (2021). As seleções das classes são consideradas importantes devido à localização estratégica das áreas e a influência dos pontos de embarque e desembarque por toda a orla de Santarém, como observado por Corrêa e Rodrigues (2021), que obtiveram como resultado um mapa de índice de sensibilidade ao derramamento de na área de estudo.

CONCLUSÃO

Neste trabalho de uma maneira geral, houve uma predominância das classes média e baixa a média vulnerabilidade, englobando respectivamente 45% e 30% da área total, tais valores referem-se à fragilidade dos ambientes ao derramamento de óleo diesel dos transportes fluviais, comerciais e/ou turísticos. Embora a classe de muito alta vulnerabilidade corresponda a 1%, ainda assim, representa um grande impacto, visto que, localiza-se em uma das zonas que possui maior atividade portuária do município, e está inserida na classe de Áreas Antropizadas.



Chamando atenção para o impacto que um vazamento ou derramamento potencial ou acumulativo poderá causar nas áreas ao redor, atingindo ambientes, que muitas vezes, podem ter uma recuperação demorada ou até mesmo irreversível, associados principalmente a materiais como argila e áreas mistas (areia e lama), em que a retirada de óleo se torna demorada e que traria reações negativas a fauna e flora da região afetada.

A reclassificação dos ambientes reconhecidos em campo, para compor o mapa final (de uso e ocupação do solo e cobertura vegetal) foi de fundamentação importância, visto que facilitou no entendimento da distribuição dos ambientes pertencentes na área de estudo, bem como, da relação destes ambientes com as atividades portuárias desenvolvidas as margens da cidade, o que possibilitou uma melhor interpretação, quando confrontadas com o objetivo deste estudo.

O método de análise da vulnerabilidade ambiental empregado neste trabalho consiste em uma ferramenta eficaz para o gerenciamento do ambiente, identificando e fornecendo informações a respeito das áreas de maior vulnerabilidade, a partir da interação entre os aspectos naturais: geologia, declividade, solos e vegetação; e antrópicos (uso do solo); com o intuito prevenir e/ou mitigar possíveis danos causados pelo intenso transporte de cargas inflamáveis, comerciais e turísticas. Políticas públicas que orientem estes tipos de atividades tornam-se necessárias na prevenção de desastres ambientais desta natureza.

Referências

- Andrade MMN, Szlafsztein CF, Souza-Filho PW, Araújo AR, Gomes MK 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 (10) 1972e1980.
- Andrade, MMN, Szlafsztein CF 2015. Community participation in flood mapping in in the Amazon through interdisciplinary methods. *Natural Hazards*, 78: 1491-1500.
- Andrade MMN, Souza-Filho PWM, Szlafsztein CF 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.
- ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários). Dados quantitativos de transportes hidroviários na Amazônia. c2018.[updated 2021 Jun 29; cited 2021 Jun 29]. Available from: <https://www.gov.br/antag/pt-br>.
- Araujo JFV et al. 1976. Folha SA. 21 – Santarém: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Projeto RADAMBRASIL v. 10; Santarém, Folha SA. 21. Levantamento de recursos naturais, Rio de Janeiro. c1976 [updated 2021 Jun 29; cited 2021 Jun 29]. Available from: <https://biblioteca.ibge.gov.br/>.
- Azevedo A, Fortunato AB, Epifânio B, den Boer S, Oliveira ER, Alves FL, Jesus G, Gomes JL, Oliveira A 2017. An oil risk management system based on high-resolution hazard and vulnerability calculations. *Ocean & Coastal Management* 136: 1e18.
- Balogun AL, Yekeen ST, Pradhan B, Yusof KBW 2020. Oil spill trajectory modelling and environmental vulnerability mapping using GNOME model and GIS. *Environmental Pollution* 268 (2021) 115812.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 398, de 11 de junho de 2008. Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos, sondas terrestres, plataformas e suas instalações de apoio, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, e orienta a sua elaboração. .c2008 [updated 2021 Jun 29; cited 2021 Jun 29]. Available from: <<http://portal.antag.gov.br/wp-content/uploads/2016/12/Resolu%C3%A7%C3%A3o-CONAMA-n.-398-de-11-de-junho-de-2008.pdf>>.
- Caputo MV, Rodrigues R, Vasconcelos DNN 1971. Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas. *Petrobras/Renor*, 641:92.
- Carvalho GMBS, Souza MJN, Santos SM 2003. Análise da vulnerabilidade à erosão: Bacias dos rios Aracatiaçu e Aracatimirim (CE). *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Belo Horizonte, *Anais*, 1281-1288.
- Crepani E, Medeiros JS, Hernandez-Filho P, Florenzano TG, Duarte V, Barbosa CCF 2001. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* 103.
- Crepani E, Medeiros JS, Azevedo LG, Hernandez-Filho P, Florenzano TG, Duarte V 1996. Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 18 pp.



- Corrêa LFA, Rodrigues SWP 2021. Identificação dos índices de sensibilidade fluvial ao derramamento de óleo em ambientes do Baixo Amazonas (estudo de caso: Santarém-Pará. *Geociências* 40 (1) 157 – 167.
- Cortes JPS, Szlafsztein CF, Luvizotto GL 2020. Geomorfologia e planejamento ambiental em uma região de conflitos socioambientais na Amazônia Brasileira. *Revista Geociências (UNESP)* 39(3) 765-778.
- Cunha AC, Abreu CH, Crizanto JLP, Cunha HFA, Brito AU, Pereira NN 2021. Modeling pollutant dispersion scenarios in high vessel-traffic areas of the Lower Amazon River. *Marine Pollution Bulletin* 168:112404.
- Daemon RF 1975. Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, bacia do Amazonas. *Revista Brasileira de Geologia* 5: 58-84.
- Daemon RF, Contreiras CJA 1971. Zoneamento Palinológico da Bacia do Amazonas. Congresso Brasileiro de Geologia, 25. São Paulo, 1971, Anais. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia (3) 79-88.
- Demarchi JC, Pisani JR, Zimback CRL 2013. Análise da vulnerabilidade à erosão da sub-bacia do Ribeirão das Perobas por meio de sensoriamento remoto e geoprocessamento. *Revista Geografia e Pesquisa* 7(1) 6-37.
- Dongdong L, Bin L, Chenguang B, Minghui, M, Yan X, Chunyan Y 2015. Marine oil spill risk mapping for accidental pollution and its application in a coastal city. *Marine Pollution Bulletin* 96:220–225.
- Dourado FF, Andrade MMN, Carneiro CC 2017. Geração de mapas de riscos naturais em Santarém – PA: abordagem baseada na lógica fuzzy. *Geociências, Rio Claro* 36 (3) 579-587.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro, c2001 [updated 2021 Jun 29; cited 2021 Jun 29]. Available from: http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php
- Germani F, Figueiredo YA, Calliari S, Armanini LJ, Tagliani CR 2015. Vulnerabilidade costeira e perda de ambientes devido à elevação do nível do mar no litoral sul do Rio Grande do Sul. *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 15 (1) 121-131.
- Gomes AR, Crepani E, Carvalho VC, Medeiros JS 2005. Aplicação da metodologia ZEE para a análise da vulnerabilidade à perda de solo em ambiente semi-árido. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. *Anais*, 3519-3526.
- Hammar-Klose ES, Pendleton EA, Thieler ER, Williams SJ 2003. Coastal vulnerability Assessment of Cape Cod National seashore to sea-level rise. USGS, Menlo Park, CA.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sinopse do censo demográfico. Rio de Janeiro, c2014 [updated 2021 Jun 29; cited 2021 Jun 29]. Available from: <https://www.ibge.gov.br/>
- Ipieca (International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, International Maritime Organization, International Association of Oil & Gas Producers) Sensitivity Mapping for Oil Spill Response. Sensitivity mapping for oil spill response, London, c2012. [Updated 2021 Jun 29; cited 2021 Jun 29]. Available from: <https://www.itopf.org/fileadmin/data/Documents/Papers/JIPSensitivityMapping.pdf>
- Jorge-João XS, Teixeira SG, Fonseca DDF. Geodiversidade do estado do Pará. Programa Geologia do Brasil: Levantamento da Geodiversidade. Belém: CPRM, c2013. [Updated 2021 Jun 29; cited 2021 Jun 29]. Available from: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16736>
- Monteiro CB, Oleinik PH, Leal TF, Marques WC, Nicolodi JL, Lopes BCFL 2020. Integrated environmental vulnerability to oil spills in sensitive areas. *Environmental Pollution* 267:115238.
- Matsuda NS, Winter WR, Wanderley Filho, JR, Cacula ASM 2010. O Paleozoico da borda sul da Bacia do Amazonas, Rio Tapajós – Estado do Pará. *Boletim de Geociências da Petrobrás* 18:123–152.
- Nascimento DMC, Dominguez JML 2009. Avaliação da vulnerabilidade ambiental como instrumento de gestão costeira nos municípios de Belmonte e Canavieiras, Bahia. *Revista Brasileira de Geociências* 39(3)395-408.
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Vulnerability assessment. c1999 [Updated 2021 Jun 29; cited 2021 Jun 29]. Available from: < <http://www.osec.doc.gov/bmi/budget/04APP/04noaa.pdf> >.
- Nelson JR, Grubestic TH 2017. Oil spill modeling: Risk, spatial vulnerability, and impact assessment. *Progress in Physical Geography* 1:16.
- Nielson KG, Samuel GW, Rood SB 2020. Prospective impacts of oil spills on floodplain vegetation: Both crude oil and diluted bitumen increase foliar temperatures, senescence and abscission in three cottonwood (*Populus*) species. *PLoS ONE* 15(3): e0230630.
- Pessoa MC, Galvão AGQ, Queiroz DS, Pellegrini JD, Fragozo M, Cabral MM, Soares, ML, Sabino CM, Chaves FO, Assad LD, Vasconcelos A, Bock CS, Toste R, Faller DG, Rollnic M 2018. Costa Norte Project: Enhancing Environmental Protection Against Oil Spills in the Northern Brazilian Coast Through the Combination of Data Collection, Numerical Forecasts and Impact Assessment. Society of Petroleum Engineers SPE-190641-MS.



- Petersen J, Michel J, Zengel S, White M, Lord C, Plank C 2002. Environmental Sensitivity Index Guidelines. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 11:192.
- Ribeiro FL, Campos S 2007. Vulnerabilidade à erosão do solo da Região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(6)628–636.
- Rodrigues SWP, Souza-Filho PW 2012. Mapping of environmental sensitivity index to oil spill from Landsat TM images: "A study case on the Amazon coastal plain. *Revista Brasileira de Geofísica* 30(4)533-543.
- Romero AF, Abessa DMS, Fontes RFC, Silva GH 2013. Integrated assessment for establishing an oil environmental vulnerability map: Case study for the Santos Basin region, Brazil. *Marine Pollution Bulletin* xxx:xxx–xxx.
- Romero AF, Abessa DMS, Fontes RFC, Silva GH 2013. Integrated assessment for establishing an oil environmental vulnerability map: case study for the Santos Basin region, Brazil. *Marine Pollution Bulletin* 74(1)156-164.
- Santos VF, Mendes AC, Silveira, OFM (*in memoriam*) 2016. Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima da Foz do Amazonas. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Macapá. IEPA 160.
- Souza-Filho PW, Prost MTRC, Miranda FP, Sales MEC, Borges HV, Costa FR, Almeida EF, Nascimento Junior WR 2009. Environmental Sensitivity Index (ESI) mapping of oil spill in the Amazon Coastal Zone: the Piatam Mar Project. *Revista Brasileira de Geofísica* 27(1).
- Souza-Filho PWM 2017. Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo das Bacias Marítimas do Pará-Maranhão e Barreirinhas. Belém. EDUFPA 126.
- Tancredi ACFNS 1996. *Recursos hídricos subterrâneo de Santarém: fundamentos para uso e proteção*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará, Belém, 168 pp.
- Udoh JC, Ekanem EM 2011. GIS based risk assessment of oil spill in the coastal areas of Akwa Ibom State, Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology* 5(3)205-211.
- Vasquez ML, Rosa-Costa LT 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém c2008 [Updated 2021 Jun 29; cited 2021 Jun 29]. Available from: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16736>.