

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Panorama geral e perspectivas futuras dos Índices de Sensibilidade Ambiental ao derramamento de óleo

AUTORES:

Claudia Vanessa dos Santos Corrêa¹, Fernando Mazo D’Affonseca², Fábio Augusto Gomes Vieira Reis¹, Arthur Wieczorek¹, Lucília do Carmo Giordano¹, Mara Lúcia Marques¹, Flávio Henrique Rodrigues¹, Daiana Marques Costa¹, André de Andrade Kolya¹, Vinicius Mendes Veiga¹, Sarah Félix Santos¹, Laila Milani Magalhães¹, Isadora Torres Gatto¹, Paulina Setti Riedel¹

INSTITUIÇÃO:

¹ Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE (Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro) / Centro de Geociências Aplicadas ao Petróleo (UNESPetro); ² FMD Geologia Aplicada, São Carlos (SP), Brasil

PANORAMA GERAL E PERSPECTIVAS FUTURAS DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO

Resumo

Os mapas e dados do Índice de Sensibilidade Ambiental (ESI – *Environmental Sensitivity Index*) são empregados mundialmente para a preparação de planos de contingência e respostas a derrames de petróleo em áreas costeiras e terrestres. As ferramentas de preparação e resposta a derrames de petróleo são fatores-chave para gerir de maneira sustentável os ambientes e recursos naturais. A abordagem ESI foi aplicada com sucesso em várias linhas costeiras marinhas e continentais, condutas terrestres e estradas. Originalmente, os mapas ESI eram configurados como produtos cartográficos impressos. Com a incorporação dos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), os mapas ESI ganharam uma perspectiva digital, possibilitando correlações estáticas entre parâmetros biológicos e socioeconômicos por meio de diversas operações e métodos. Nos últimos anos, as abordagens ESI e de simulação foram combinadas para desenvolver avaliações quantitativas de risco, e a Inteligência Artificial (IA) e os algoritmos de aprendizagem profunda subsidiam classificações integradas de índices de sensibilidade. Embora desafiadores, os aspectos de avaliação e vulnerabilidade, tais como abordagens sazonais e multidimensionais, devem ser considerados nos mapas ESI, bem como a integração de sistemas de monitorização, detecção, decisão e resposta. Ao incorporar sistemas dinâmicos na abordagem, os mapas ESI tornam-se um Sistema de Sensibilidade Social e Ambiental (SESS - *Social and Environmental Sensitivity System*). Considerando tais premissas, este trabalho objetiva apresentar uma revisão abrangente do desenvolvimento do conceito ESI, além de identificar, delinear e propor direções futuras (*trends*). Como resultados e conclusões, elucida-se que em um primeiro momento, os mapas de sensibilidade foram elaborados e apresentados como produtos cartográficos impressos. Mais tarde, com o advento e grande difusão dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), ganharam também uma perspectiva digital, na qual foi possível estabelecer maiores correlações entre os parâmetros físicos, biológicos e socioeconômicos, mas de maneira ainda estática. Atualmente, as abordagens e simulações foram combinadas e empregadas para desenvolver avaliações quantitativas, principalmente com relação ao risco, em linhas costeiras. A incorporação dos SIGs facilitou também a elaboração de índices integrados, onde os aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos são reunidos por meio de diferentes operações e formas de abordagem, de tal modo que a integração possibilita obter classificações de sensibilidades mais coerentes com a real complexidade dos ambientes. A visão de futuro para a abordagem digital compreende os sistemas integrados de monitoramento, detecção, decisão e resposta a derramamentos de óleo, que serão desenvolvidos para unificar todos os fatores envolvidos em um acidente e maximizar a resposta mais efetiva.

Palavras-chave: análise de vulnerabilidade a derramamento de óleo, mapeamento do Índice de Sensibilidade Ambiental (ESI), Sistema de Sensibilidade Social e Ambiental (SESS).

Abstract

The maps and data from the Environmental Sensitivity Index (ESI) are used worldwide to prepare contingency plans and responses to oil spills in coastal and terrestrial areas. Oil spill preparedness and response tools are key factors in sustainably managing environments and natural resources. The ESI approach has been successfully applied to several marine and continental coastlines, land pipelines, and roads. Originally, ESI maps were configured as printed cartographic products. Using Geographic Information Systems (GIS), ESI maps gained a digital perspective, enabling static correlations between biological and socioeconomic parameters through various operations and methods. In recent years, ESI and simulation approaches have been combined to develop quantitative risk assessments, and Artificial Intelligence (AI) and deep learning algorithms inform integrated sensitivity

index ratings. Although challenging, assessment and vulnerability aspects, such as seasonal and multidimensional approaches, must be considered in ESI maps and the integration of monitoring, detection, decision, and response systems. By incorporating dynamic systems into the approach, ESI maps become a Social and Environmental Sensitivity System (SESS). Considering these premises, this work aims to provide and present a comprehensive review of the development of the ESI concept, in addition to identifying, outlining, and proposing future directions (*trends*). As results and conclusions, it is clear that sensitivity maps were first prepared and presented as printed cartographic products. Later, with the advent and widespread dissemination of Geographic Information Systems (GIS), they also gained a digital perspective, in which it was possible to establish greater correlations between physical, biological, and socioeconomic parameters, but still in a static manner. Currently, approaches and simulations have been combined and used to develop quantitative assessments, mainly about risk, on coastal lines. The incorporation of GIS has also facilitated the development of integrated indexes, where physical, biological, and socioeconomic aspects are brought together through different operations and approaches, in such a way that integration makes it possible to obtain sensitivity classifications more consistent with the real complexity of the environments. The future vision for the digital approach includes integrated systems for monitoring, detection, decision-making, and response to oil spills, which will be developed to unify all factors involved in an accident and maximize the most effective response.

Keywords: vulnerability analysis to oil spill, Environmental Sensitivity Index (ESI) mapping, Social and Environmental Sensitivity System (SESS).

Introdução

Os ambientes costeiros são muito sensíveis e suscetíveis a ameaças naturais e antrópicas, tais como eventos de derramamentos de óleo (HARIK et al. 2017; NELSON; GRUBESIC, 2018). As ferramentas de preparação e resposta a derrames de petróleo são fatores-chave para gerir de maneira sustentável os ambientes e recursos costeiros (FRAZÃO SANTOS et al., 2013).

Nesse contexto insere-se a abordagem do Índice de Sensibilidade Ambiental (*Environmental Sensitivity Index* - ESI), iniciada no final dos anos 70 pela *RPI International, Inc.* e patrocinada pela NOAA (*National Atmospheric and Oceanic Administration*) nos Estados Unidos da América, para auxiliar na avaliação de impactos potenciais ao longo das linhas costeiras e a alocação de recursos durante e após um evento de derramamento de óleo (GUNDLACH; HAYES, 1978; GETTER et al., 1981). Desde então, mapas e dados ESI têm sido aplicados em todo o mundo para gerenciar os riscos de derramamento de óleo, fornecendo um resumo conciso dos recursos costeiros que estão em risco se ocorrer um derramamento de óleo nas proximidades (JENSEN et al., 1998; NOAA, 2019; RUSTANDI et al., 2020). Com o mapeamento da sensibilidade ambiental ao óleo, sabe-se, com a devida antecedência, quais setores dos locais atingidos e suas proximidades são os mais sensíveis e devem receber maior atenção em caso de um acidente (DIAS-BRITO et al., 2014).

Os mapas ESI originais classificam espacialmente a linha de costa em uma escala de 1 (menos sensível) a 10 (mais sensível), considerando a exposição relativa à energia das ondas e marés, a inclinação da linha de costa, o tipo de substrato (tamanho do grão, permeabilidade, trafegabilidade e mobilidade), e a produtividade e sensibilidade biológica, bem como a facilidade de limpeza e

restauração (NOOA, 2019). Tal proposta, idealizada por Gundlach e Hayes (1978), baseou-se nos fatores físicos dos ambientes que controlam o comportamento e permanência do óleo.

No Brasil, a primeira contribuição foi feita no âmbito da Petrobras, para estudos relacionados às suas instalações e atividades (ARAÚJO et al., 2001). O Ministério do Meio Ambiente do Brasil, com base nas propostas da NOAA (2002), também elaborou, em 2002, o primeiro documento oficial visando padronizar a elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Petróleo (Cartas SAO) no Brasil (BRASIL, 2002). Em 2004, essa metodologia foi reeditada com melhorias e ajustes, documento vigente até hoje.

Os mapas ESI eram anteriormente baseados em mapas de base planimétricos pré-existentes e apresentados como um conjunto de papéis coloridos impressos. Jensen et al. (1990) propõem alguns aprimoramentos em seu conceito original, combinando-se análise visual, técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica (SIG). A NOAA, bem como a Guarda Costeira dos EUA, reconheceu que as técnicas de Geoprocessamento realizadas em Sistemas de Informação Geográfica devem ser empregadas para acelerar o gerenciamento de um derramamento de óleo em um determinado local, possibilitando decisões em tempo real.

Considerando tais premissas iniciais, este trabalho visa fornecer e apresentar uma revisão abrangente do desenvolvimento do conceito ESI, além de identificar, delinear e propor direções futuras (*trends*).

Metodologia

Foi realizado um extenso levantamento bibliográfico e análise crítica e reflexiva a partir dos seguintes temas: a) Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo; b) Análise de Vulnerabilidade de áreas costeiras; e c) *Environmental Sensitivity Index (ESI) maps*.

Para tal, as principais bases de dados foram o banco de dados bibliográficos Athena (UNESP) – Acervo Geral; a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da UNESP = PARTHENON, e de outras instituições de pesquisa; a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações do Ministério da Ciência e Tecnologia; o Portal de periódicos da Capes; o *Scientific Electronic Library Online (Scielo)*; a *Science Classic*; a *Academic Search Premier*; a *Academic Search Complete*; a *GeoScienceWorld*; a Scopus e outras. Em discussões com a equipe do projeto, foram delineadas e identificados os *trends* (perspectivas futuras) da temática, considerando o material analisado.

Resultados e Discussão

a. O Desenvolvimento do Mapeamento de Sensibilidade Ambiental ao óleo e o cenário atual

Ao longo dos anos, desde a década de 1970, inúmeros mapeamentos de sensibilidade foram elaborados ao redor do mundo, contribuindo para avanços na forma de geração e representação dos mapas, na obtenção do índice, no aprimoramento da metodologia de elaboração, resultando em maior cobertura de áreas mapeadas, em vários países. São elencados alguns trabalhos, em nível internacional

e nacional, que contribuíram para o desenvolvimento do mapeamento da sensibilidade ambiental ao óleo.

Assim, considerando o material levantado e analisado, foi possível estabelecer os marcos principais e o estágio atual do Mapeamento de Sensibilidade Ambiental ao óleo (Figura 1a e 1b).

b. Síntese do estágio atual e Perspectivas Futuras

A princípio, os mapas de sensibilidade foram elaborados e apresentados como produtos cartográficos impressos. Mais tarde, com o advento e grande difusão dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), ganharam também uma perspectiva digital, na qual foi possível estabelecer maiores correlações entre os parâmetros físicos, biológicos e socioeconômicos, mas de maneira ainda estática. Atualmente, as abordagens e simulações foram combinadas e empregadas para desenvolver avaliações quantitativas, principalmente com relação ao risco, em linhas costeiras.

Com relação à forma de mapeamento da sensibilidade, os mapas, desde sua origem, abrangem três aspectos: físicos, biológicos e socioeconômicos, inicialmente representados de forma separada, sendo o meio físico a âncora para o índice de sensibilidade, enquanto as informações biológicas e socioeconômicas são apresentadas como pontos ou áreas, sem interferir na construção do respectivo índice. A incorporação dos SIGs facilitou também a elaboração de índices integrados, onde os aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos são reunidos por meio de diferentes operações e formas de abordagem (CASTANEDO et al., 2008; SANTOS; ANDRADE, 2009; DEPELLEGRIN; PEREIRA, 2016; CLEAR SEAS, 2020; FENG et al., 2021; KIM et al., 2020; RUSTANDI et al., 2020; SAMRA et al., 2018; SARDI et al., 2020). A integração possibilita obter classificações de sensibilidades mais coerentes com a real complexidade dos ambientes.

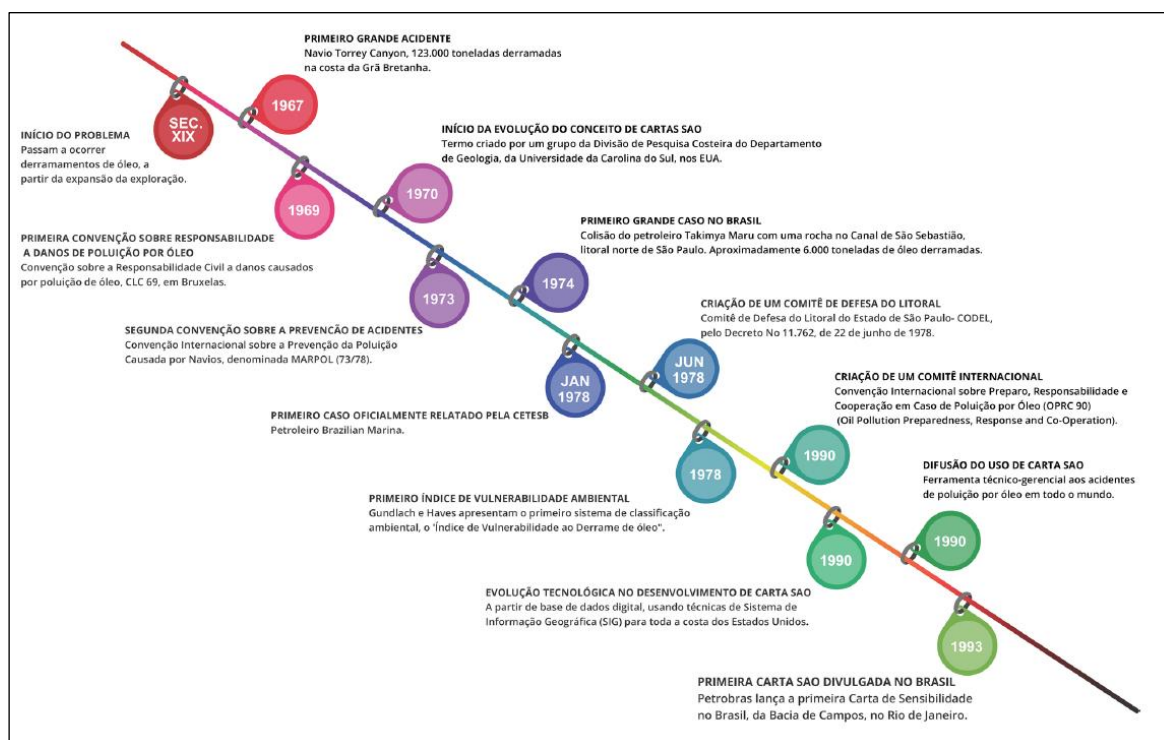


Figura 1a. Marcos principais e o estágio atual do Mapeamento de Sensibilidade Ambiental ao óleo entre o séc. XIX à 1993. Fonte: Corrêa et al. (2023).

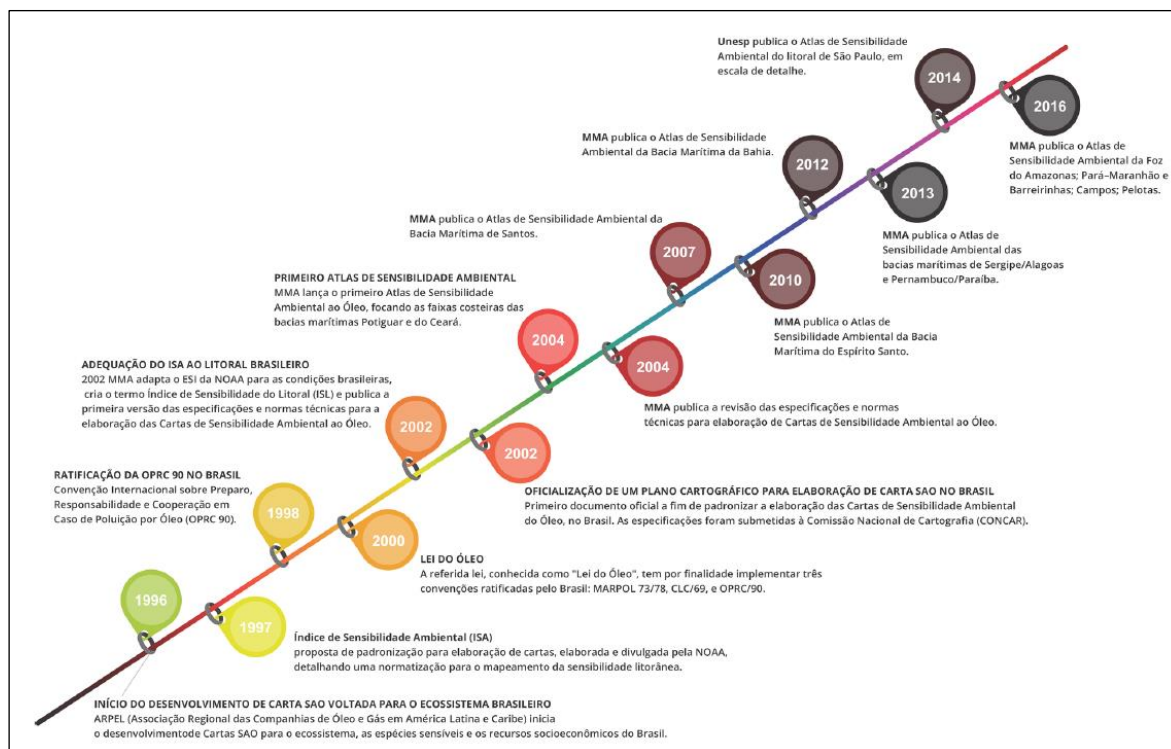


Figura 1b. Marcos principais e o estágio atual do Mapeamento de Sensibilidade Ambiental ao óleo entre 1996 à 2016. Fonte: Corrêa et al. (2023).

A visão de futuro para a abordagem digital compreende os sistemas integrados de monitoramento, detecção, decisão e resposta a derramamentos de óleo, que serão desenvolvidos para unificar todos os fatores envolvidos em um acidente e maximizar a resposta mais efetiva (Figura 2).

Figura 2. Evolução tecnológica do Mapeamento da Sensibilidade Ambiental: Evolução histórica e direções futuras. Fonte: Corrêa et al. (2023).



Conclusões

Em síntese, destacam-se cinco aspectos do Sistema SAO (Sensibilidade Ambiental ao Derramamento ao Óleo):

1) Incorporação de variações temporais às informações da sensibilidade do litoral. É importante considerar mudanças geomorfológicas sazonais;

Incorporação da variação temporal da distribuição, abundância, diversidade e aspectos do ciclo de vida (reprodução e alimentação) dos recursos biológicos;

Incorporação da variação temporal dos aspectos socioeconômicos ou de usos humanos;

2) Incorporação da sensibilidade da superfície, da coluna d'água e do fundo marinho;

3) Classificações integradas de sensibilidade, que incorporem a sensibilidade dos aspectos físicos, bióticos e socioeconômicos, utilizando algoritmos de classificação com Inteligência Artificial;

4) Aspectos relacionados à vulnerabilidade ao óleo também podem ser incorporados aos sistemas SAO, como a representação multitemporal da velocidade e direção de correntes e ventos, temperatura, salinidade e níveis de clorofila. Os SIGs atuais permitem a incorporação e a representação de tais variáveis, em escalas multitemporais;

5) A representação espacial da ampla gama de variáveis propostas no sistema SAO, com diferentes resoluções espaciais e temporais, pode constituir um grande desafio. No entanto, é preciso considerar que o avanço dos SIGs tem sido expressivo, nos últimos anos, e é possível incorporar diferentes formas de representação espacial, em sistemas unificados.

Agradecimentos

PETROBRAS (“Projeto Santos - Caracterização Ambiental da Bacia de Santos”, coordenado pela PETROBRAS/CENPES) pelo apoio científico; ANP, associada ao investimento dos recursos oriundos do Cláusulas de PD&I (Bolsa PRH - ANP/FINEP no âmbito da Seleção Pública de Bolsista de Pós-Doutorado – 2024 (1) MARCO/2024 à C.V.S.C.); Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Brasil 316574/2021-0 à F.A.G.V.R.) pelo apoio financeiro; Centro de Geociências Aplicadas ao Petróleo, UNESPetro, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE (UNESP, Rio Claro) pela disponibilização de instalações laboratoriais.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, S. I.; SILVA, G. H.; MUEHE, D. **Manual básico para a elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo no sistema Petrobras**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2001.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos. **Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo**. MMA: Brasília, 2002. 22 p. (Projeto de Gestão Integrada dos Ambientes Costeiro e Marinho).

CASTANEDO, S.; POMBO, C.; FERNANDEZ, F.; MEDINA, R.; PUENTE, A.; JUANES, J. A. Oil Spill Vulnerability Atlas for the Cantabrian Coast (Bay of Biscay, Spain). In: **20th International Oil Spill Conference**. American Petroleum Institute, 2008, p. 137-144.

CLEAR SEAS - CENTRE FOR RESPONSIBLE MARINE SHIPPING. **Assessing Sensitivity of Coastal Areas to Oil Spills, Clear Seas, Vancouver**. 2020. Disponível em: <https://clearseas.org/wp-content/uploads/2020/08/WB-SCA-Report-Sensitivity-of-Coastal-Areas-Final-EN.pdf>. Acesso em: 05 Jan. 2023.

CORRÊA, C.V.S.; DAFFONSECA, F. M.; REIS, F.A.G.V.; WIECZOREK, A.; COSTA, D.M.; GIORDANO, L.C.; RIEDEL, P.S. Histórico, Situação Atual e Perspectivas Futuras. In: RIEDEL, P.S.; COSTA, D.M.; GIORDANO, L.C.; WIECZOREK, A.; MAQUES, M.L.; REIS, F.A.G.V.; (Orgs.). **Carta SAO: sensibilidade ambiental ao óleo: conceitos, tipos e procedimentos metodológicos**. 1ed. Rio Claro: dos Autores, 2023, v. 1, p. 1-24.

DEPELLEGRIN, D.; PEREIRA, P. Assessing oil spill sensitivity in unsheltered coastal environments: A case study for Lithuanian-Russian coasts, South-eastern Baltic Sea. **Marine Pollution Bulletin**, vol. 102, n. 1, p. 44-57, 2016. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2015.12.005](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.005)

DIAS-BRITO, D.; MILANELLI, J. C.; RIEDEL, P. S.; WIECZOREK, A. **Sensibilidade do Litoral Paulista a Derramamentos de Petróleo: um Atlas em Escala de Detalhe**. Rio Claro: UNESP, 2014, 236 p.

FENG, Q.; AN, C.; CHEN, Z.; OWENS, E.; NIU, H.; WANG, Z. Assessing the coastal sensitivity to oil spills from the perspective of ecosystem services: A case study for Canada's pacific coast. **Journal of Environmental Management**, vol. 296, 113240. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.113240](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113240)

JENSEN, R.; RAMSEY, E. W.; HOLMES, J. M.; MICHEL, J. E.; SAVITSKY, B.; DAVIS, B. A. Environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spills using remote sensing and geographic information system technology. **International Journal of Geographical Information Systems**, vol. 4(2), pp. 181-201, 1990. DOI: [10.1080/02693799008941539](https://doi.org/10.1080/02693799008941539)

KIM, E.; CHO, H.; KIM, N.; KIM, E.; RYU, J.; PARK, H. Sensitive Resource and Traffic Density Risk Analysis of Marine Spill Accidents Using Automated Identification System Big Data. **Journal of Marine Science and Application**, vol. 19, n. 2, p. 173-181, 2020. DOI: [10.1007/s11804-020-00138-2](https://doi.org/10.1007/s11804-020-00138-2)

NOAA. **Environmental Sensitivity Index Guidelines**. Version 3.0. Technical Memorandum NOS OR&R 11. Seattle: Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration. Vol 13, No 3, pp 277-287, 2002.

RUSTANDI, Y.; DAMAR, A.; RAKASIWI, G.; AFANDY, A.; HAMDANI, A.; MULYANA, D. Environmental sensitivity index mapping as a prevention strategy against oil spill pollution: A case study on the coastal area of South Sumatera Province in Indonesia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 414 012019, 2020. DOI: [10.1088/1755-1315/414/1/012019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/414/1/012019)

SANTOS, C. F.; ANDRADE, F. Environmental sensitivity of the Portuguese coast in the scope of oil spill events – comparing different assessment approaches. **Journal of Coastal Research**, p. 885-889, 2009.