



**Universidade Federal do Rio Grande – FURG**

**Instituto de Oceanografia**

Programa de Pós-Graduação em Oceanologia

# **Estudo da vulnerabilidade ambiental ao óleo do Parque Estadual de Itapuã e adjacências**

**Chayonn Marinho**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanologia como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Oceanologia.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Arigony Neto  
Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Co-Orientador: Prof. Dr. João Luiz Nicolodi  
Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Rio Grande, RS, Brasil  
Fevereiro, 2021.

*“Muitos pensam que a pesquisa científica é uma atividade puramente racional, na qual o objetivismo lógico é o único mecanismo capaz de gerar conhecimento. Como resultado, os cientistas são vistos como insensíveis e limitados, um grupo de pessoas que corrompe a beleza da Natureza ao analisá-la matematicamente. Essa generalização, como a maioria das generalizações, me parece profundamente injusta, já que ela não incorpora a motivação mais importante do cientista, o seu fascínio pela Natureza e seus mistérios.”*

## Agradecimentos

Para o desenvolvimento da presente tese algumas pessoas e laboratórios foram fundamentais, dentre eles posso citar meus orientadores prof. Dr. Jorge Arigony e prof. Dr. João Luiz Nicolodi; o time maravilhoso do Laboratório de Engenharia Costeira/LEC com a professora Dra. Natália Lemke, prof. Dr. José Scotti Fontoura, prof. Dra. Débora Machado e os técnicos Marcelo e Veridiana, que não apenas abriram as portas para mim como foram cruciais nos trabalhos de campo, troca de conhecimentos e experiências.

Agradeço também ao Laboratório de Oceanografia Geológica/LOG, ao Programa de Pós Graduação em Oceanologia/FURG e a agência de fomento CAPES pelo auxílio financeiro ao longo do processo.

Por fim, a todos amigos, colegas e profissionais que estiveram presentes de alguma forma durante essa trajetória.

## Apresentação inicial

A presente tese encontra-se estruturada em sete capítulos, com a apresentação dos resultados e discussões na forma de dois artigos científicos. No capítulo de introdução (capítulo I), foram abordados os aspectos relevantes ao tema de vulnerabilidade ambiental ao contato com o petróleo. Nesse item foi discorrido sobre o aumento da preocupação com cenários de incidentes envolvendo petróleo e seus derivados, bem como a citação de grandes eventos ocorridos no Brasil e no mundo, o estabelecimento dos conceitos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho, as metodologias comumente empregadas para este tipo de análise e a citação sobre alguns importantes trabalhos que embasaram o desenvolvimento desta tese. Como um subitem do capítulo I foi caracterizada a área de estudo, com devida descrição geográfica, meteorológica, sedimentar e geomorfológica. Os capítulos II e III abordaram a hipótese e os objetivos, respectivamente. Os materiais e métodos foram detalhados no capítulo IV, com uma apresentação geral seguida de subitens que especificaram cada etapa metodológica.

Para a obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Oceanologia, é requerido que o discente realize a submissão de pelo menos dois artigos científicos como primeiro autor em periódico com corpo indexado. Desse modo, os resultados da pesquisa desenvolvida durante o período de doutorado e a discussão dos resultados foram apresentados em forma de artigos no capítulo V. O primeiro manuscrito, de autoria de Chayonn Marinho, Jorge Arigony Neto, João Luiz Nicolodi, Natália Lemke e José Antônio Scotti Fontoura, é intitulado **“Wave regime characterization in the northern sector of Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil.”**, o qual foi publicado no periódico **“Ocean and Coastal Research”**. O segundo manuscrito, de autoria de Chayonn Marinho, João Luiz Nicolodi e Jorge Arigony Neto, intitulado **“Environmental vulnerability to oil spills in Itapuã Stake Park, Rio Grande do Sul, Brazil: an approach using two-dimensional numerical simulation”** foi submetido na revista Environmental Pollution.

Uma síntese dos resultados e discussões foi apresentada no capítulo VI como fechamento da tese. As conclusões finais estão no capítulo VII e a lista de referências bibliográficas no capítulo VIII.

## Índice

	<b>Resumo .....</b>	<b>ii</b>
	<b>Abstract .....</b>	<b>iii</b>
	<b>Lista de figuras .....</b>	<b>iv</b>
	<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>v</b>
<b>Capítulo I</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Área de estudo .....	7
<b>Capítulo II</b>	<b>Hipótese .....</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo III</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo IV</b>	<b>Materiais e métodos .....</b>	<b>13</b>
4.1	Determinação da sensibilidade .....	13
4.1.1	Imageamento por drone .....	15
4.2	Determinação da susceptibilidade .....	16
4.2.1	Módulo hidrodinâmico .....	17
4.2.2	Módulo PART .....	18
4.3	Determinação da vulnerabilidade .....	19
<b>Capítulo V</b>	<b>Artigos científicos .....</b>	<b>20</b>
Artigo 1	Wave regime characterization in the northern sector of Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil .....	20
Artigo 2	Environmental vulnerability to oil spills in Itapuã Stake Park, Rio Grande do Sul, Brazil: an approach using two-dimensional numerical simulation .....	44
<b>Capítulo VI</b>	<b>Síntese dos resultados e discussões .....</b>	<b>67</b>
<b>Capítulo VII</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>71</b>
<b>Capítulo VIII</b>	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>74</b>

## Resumo

O crescente uso das áreas costeiras para diversos fins econômicos é responsável pelo aumento da poluição por hidrocarbonetos no meio marinho. Como consequência destas atividades, acidentes na extração, transporte e armazenamento dos combustíveis podem ocorrer, ocasionando uma intensa degradação ambiental. A presente tese abordou sobre o estudo da vulnerabilidade ambiental ao óleo de praias localizadas no Parque Estadual de Itapuã (PEI), uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, através da integração de uma variável intrínseca ao meio ambiente (sensibilidade) e uma variável dinâmica determinada através de cenários de dispersão superficial de óleo diesel. Foram simulados quatro cenários de acidentes hipotéticos de 20m<sup>3</sup> óleo diesel no ano de 2018, durante seis dias de simulações em um despejo instantâneo no canal de navegação da hidrovia local próximo ao PEI. Os resultados sugerem a força do campo de intensidade e direção dos ventos locais como preponderante na dinâmica de movimentação e estrutura das manchas, tendo como fator secundário as componentes zonais e meridionais dos campos de correntes superficiais atuantes nesse processo. Com relação às praias afetadas, o estudo mostrou que todas as praias do parque estão susceptíveis ao contato com o óleo ao longo do ano simulado, sendo a praia das Pombas, praia da Onça e praia da Pedreira atingidas em todos os cenários simulados, conferindo-lhes a classificação de muito alta vulnerabilidade e definindo-as como áreas prioritárias de proteção. O uso de um modelo de derramamento de óleo torna-se uma ferramenta eficaz que deve ser utilizada para desenvolver e validar estratégias de resposta frente a acidentes envolvendo óleo e derivados. A disponibilidade de boas ferramentas, as quais podem e devem ser continuamente aperfeiçoadas, é um fator crucial para a qualidade do processo de gestão de áreas ambientalmente sensíveis, podendo as mesmas oferecerem suporte e subsídios para tomada de decisões dos órgãos competentes. Também, os resultados aqui obtidos têm potencial para contribuir à gestão territorial da região, com destaque para a Unidade de Conservação de Proteção Integral localizada na área de estudo (Parque Estadual de Itapuã), bem como no desenvolvimento e segurança desta importante rota de navegação, intensamente utilizada para a ligação do Porto de Rio Grande à capital do estado, Porto Alegre.

## Abstract

The increasing use of coastal areas for various economic purposes is responsible for the increase in pollution by hydrocarbons in the marine environment. Because of these activities, accidents in fuel extraction, transport and storage can occur, causing intense environmental degradation. This thesis addressed the study of environmental vulnerability to oil from beaches located in the Itapuã State Park (PEI), an Integral Protection Conservation Unit, through the integration of an intrinsic variable to the environment (sensitivity) and a determined dynamic variable through diesel oil surface dispersion scenarios. Four hypothetical accident scenarios of 20m<sup>3</sup> diesel oil were simulated in 2018, during six days of simulations in an instant dumping in the navigation channel of the local waterway near the PEI. The results suggest the intensity and direction of the local winds as preponderant in the dynamics of movement and structure of the spots, having as a secondary factor the zonal and meridional components of superficial currents field acting in this process. Regarding to the affected beaches, the study showed that all beaches in the park are susceptible to contact with oil throughout the simulated year, with Pombas's beach, Onça's beach and Pedreira's beach being affected in all simulated scenarios, classified them as very high vulnerability and defining them as priority areas of protection. The use of an oil spill model becomes an effective tool that should be used to develop and validate response strategies for accidents involving oil and its products. The availability of good tools, which can and must be continually improved, is a crucial factor for the quality of the management process of environmentally sensitive areas, which can offer support for decision-making by the competent bodies. Also, the results obtained here have the potential to contribute to the territorial management of the region, with emphasis on the Integral Protection Conservation Unit located in the study area (Itapuã State Park), as well as in the development and security of this important navigation route, intensively used to connect the Port of Rio Grande to the state capital, Porto Alegre.

## Lista de figuras

Figura 1.	Área de estudo do presente trabalho .....	9
Figura 2.	Praias arenosas do Parque Estadual de Itapuã .....	10
Figura 3.	Etapas metodológicas do presente estudo .....	13
Figura 4.	Metodologia de definição da sensibilidade ao contato com o óleo .....	14
Figura 5.	Recepção na chegada ao Parque Estadual de Itapuã .....	15
Figura 6.	Drone e trabalho de campo realizado .....	16
Figura 7.	Fundeio do ondógrafo na Lagoa dos Patos .....	18



## Lista de tabelas

Tabela 1.	Definição dos termos sensibilidade, susceptibilidade e vulnerabilidade adotados no presente estudo .....	3
Tabela 2.	Características físico-químicas dos óleos utilizados nas simulações .....	19
Tabela 3.	Parâmetros ajustados para o modelo de dispersão superficial do óleo .....	19
Tabela 4.	Síntese da classificação de sensibilidade, susceptibilidade e vulnerabilidade das praias do Parque Estadual de Itapuã (PEI) .....	70

## Capítulo I: Introdução

Em virtude do rápido desenvolvimento da exploração dos campos de petróleo *offshore* e seu transporte, o número de navios no mar continua a crescer, aumentando potencialmente o risco de acidentes envolvendo óleo e derivados. De acordo com a Federação Internacional de Poluição por Proprietários de Petroleiros – ITOPF, apesar do número de derramamentos por ano diminuírem consideravelmente nos últimos anos, o meio ambiente já está saturado com diversos poluentes (ITOPF, 2019).

Um derramamento de óleo *offshore* pode causar sérios problemas aos ecossistemas das zonas costeiras. Como exemplo, o derramamento de 36.000 toneladas de óleo cru causado pelo navio *Exxon Valdez* em 1989 no Alasca; a explosão da plataforma de petróleo *Deepwater Horizon* ocorrida no Golfo do México em 2010, declarada como o maior desastre ambiental dos Estados Unidos e alguns acidentes no Brasil classificados em ordem cronológica abaixo:

- Derramamento de 1,3 milhões de litros de óleo combustível na Baía de Guanabara em janeiro de 2000 após a ruptura de um duto de petróleo (Acselrad & Mello, 2002);

- O desastre nos rios do Paraná em 2000, quando cerca de 4 milhões de litros de óleo cru atingiram o rio Barigüí e o rio Iguazu no Paraná trazendo grandes impactos econômicos e ecológicos para a região. Este vazamento originou-se em um duto na Refinaria Getúlio Vargas em Araucária, Paraná (Melo *et al.*, 2003);

- As explosões ocorridas na plataforma P-36 em março de 2001, instalada no campo de Roncador, na Bacia de Campos (ANP, 2001).

- Acidente do Campo de Frade, ocorrido em novembro de 2011, decorrente de atividade de perfuração do poço 9-FR-50DP-RJS pela Chevron Brasil Upstream Frade Ltda (ANP, 2020<sup>1</sup>);

- Manchas de óleo que chegaram às praias brasileiras no dia 2 de setembro de 2019 atingindo mais de 2 mil km de litoral, sendo considerado o maior desastre ambiental brasileiro nesse âmbito (Araújo, 2020; Disner & Torres, 2020; Magris & Giarrizzo, 2020). Para esse evento recente, o IBAMA<sup>2</sup> disponibilizou documentos oficiais com estimativa a respeito da fauna e das localidades atingidas, através de mapas onde constam todos os locais atingidos juntamente com uma planilha com detalhes específicos como município, data e hora do primeiro avistamento, latitude, longitude e fauna oleada.

---

<sup>1</sup> [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br)

<sup>2</sup> <http://www.ibama.gov.br/manchasdeoleo>.

## Capítulo I. Introdução

Um incidente de vazamento de óleo pode causar basicamente dois tipos de impacto no ambiente atingido: recobrimento físico e efeito tóxico. Óleos com alta densidade são os principais responsáveis pelo recobrimento físico e óleos com baixa densidade pelo efeito tóxico. Entre os compostos responsáveis pela toxicidade do petróleo estão os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) (Barron *et al.*, 1999) e os produtos da oxidação e degradação do óleo (em óleos intemperados) (Neff, 2006). Esses HPAs são resistentes à biodegradação microbológica e, quando adsorvidos nos sedimentos, podem persistir no ambiente por muito tempo após um incidente (CETESB, 2006). O efeito tóxico do óleo pode causar uma série de problemas à saúde humana através de sua inalação, contato com a pele ou até mesmo ingestão acidental. Esse contato do homem com o petróleo é mais intenso dentro das refinarias, terminais e navios, mas pode acontecer também durante as operações de limpeza das áreas atingidas. Justamente nesse ponto é válido citar o acidente de 2019 nas praias do nordeste brasileiro, onde a comunidade local na tentativa de ajudar na limpeza dos ambientes realizou ações sem a mínima coordenação com o governo e sem equipamento de segurança individual.

No Brasil, o acidente ocorrido na Baía de Guanabara em 2000 representou um marco para o estabelecimento da Lei 9966/00, Lei do Óleo, a qual estruturou a política ambiental sobre a preservação e controle de incidentes com óleo e derivados. Esta lei estabelece quais são os órgãos e suas competências na execução das ações e os instrumentos correlatos necessários para tal. Derrames de petróleo têm apresentado uma ameaça importante para a qualidade ambiental das regiões costeiras em todo o mundo, de maneira que para atenuar ou mesmo evitar danos ao meio ambiente, métodos efetivos de mapeamento, monitoramento e modelagem numérica da dispersão superficial do poluente podem e devem ser desenvolvidos. Assim, dentro desse contexto enquadra-se o estudo da vulnerabilidade ambiental ao óleo de áreas potencialmente em risco.

É frequente o uso dos termos sensibilidade, suscetibilidade e vulnerabilidade vinculados aos seus diferentes significados ou conceitos. Isso dificulta a compreensão do tema e traz a necessidade de se apresentar as definições adotadas no presente trabalho.

De forma genérica, vulnerabilidade pode ser considerada como a probabilidade que uma comunidade, estrutura, serviços ou área geográfica tem de ser danificada ou perturbada pelo impacto de um determinado perigo (Tobin & Montz, 1997). Para Williams & Kaputska (2000), a vulnerabilidade ambiental pode ser compreendida como o potencial que um sistema possui para modular suas respostas frente a fatores estressores ao longo do tempo e do espaço, a partir de suas características ecossistêmicas. Ainda, de acordo com Bradley & Smith (2004), a vulnerabilidade apresenta múltiplos elementos em sua definição, mas de modo simples representa a probabilidade de futuras condições mudarem para uma direção negativa.

## Capítulo I. Introdução

Metzger *et al.* (2006) e Schroter *et al.* (2004) relacionaram o conceito de vulnerabilidade ao grau de susceptibilidade de um sistema aos efeitos negativos provenientes de mudanças globais. Para os autores citados acima, a susceptibilidade está relacionada ao grau de exposição dos ecossistemas à essas mudanças, à sensibilidade (medida de impacto ambientais potenciais resultantes da exposição) e à capacidade de resposta da sociedade em adotar ações de ajuste às mudanças. Na mesma linha dos autores citados acima, seguem Turner *et al.* (2003) e Kasperson *et al.* (2005). Para os referidos autores, a vulnerabilidade identifica duas partes básicas de problemática: a perturbação-estresse e o sistema sócio-ecológico integrado. Sendo assim, o termo passou a ser definido a partir de três componentes básicos: exposição, sensibilidade e resiliência. Nesse modelo, a exposição é composta pelas características que definem as ações humanas às quais a vulnerabilidade ambiental responde, devido às perturbações e impactos gerados. O grau de dano à exposição é determinado pela sensibilidade e a resiliência do sistema é o conjunto de respostas naturais e humanas aos impactos, no sentido de restabelecimento ao estado anterior (ou próximo deste) de equilíbrio dinâmico do ambiente.

De acordo com Adger (2006), as definições de vulnerabilidade, usualmente, atrelam esse conceito a um ou mais dos seguintes fatores: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa ou de resposta do sistema. O estudo desses fatores permite a avaliação da maior ou menor vulnerabilidade de um sistema a determinadas questões ambientais. A exposição significa o grau, duração ou extensão em que o sistema está em contato com perturbações. A sensibilidade está relacionada à extensão ou ao grau em que um sistema pode absorver as pressões sem sofrer alterações no longo prazo. A capacidade adaptativa é a habilidade do sistema de se ajustar a um dano ocorrido, fazer uso de recursos ou oportunidades ou responder a mudanças ambientais que venham a ocorrer.

Para o presente trabalho utilizou-se as definições expostas na tabela 1.

Tabela 1. Definição dos termos sensibilidade, susceptibilidade e vulnerabilidade adotados no presente estudo.

<b>Sensibilidade</b>	Relacionada ao nível de resposta de um ambiente a um determinado tensor antrópico, no caso, derramamento de óleo. Depende das características intrínsecas ao meio.
<b>Susceptibilidade</b>	Intensidade ou probabilidade de um determinado ambiente sofrer impacto. Trata somente das condições físicas do meio.
<b>Vulnerabilidade</b>	Combinação entre a sensibilidade (intrínseca) com a susceptibilidade (chance de ocorrência).

No que diz respeito à definição da sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo, o Brasil apresenta um cenário positivo, uma vez que é reconhecida uma metodologia oficial para mapeamento dessas áreas sensíveis que foi proposta pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA,

## *Capítulo I. Introdução*

2007). Essa metodologia classifica os diversos contornos de costa de acordo com o tipo de substrato, declividade do litoral e exposição às forçantes de ondas e marés, sendo enquadrada em um índice, o Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL), o qual varia de 1 a 10 numa escala crescente de sensibilidade. Todo o litoral brasileiro foi mapeado considerando tal metodologia, em um esforço governamental que teve seu início em 2002 e que foi concluído em 2016.

Uma das questões mais relevantes desse processo é o fato de a metodologia considerar apenas características geomorfológicas na definição da sensibilidade costeira, o que acaba por gerar uma visão parcial e, em alguns casos, equivocada da sensibilidade ambiental, já que a variável biológica é totalmente desconsiderada na composição do índice. Para o presente estudo, a sensibilidade ao contato com óleo foi determinada através da metodologia desenvolvida por Marinho & Nicolodi (2019). Nesse estudo, os autores desenvolveram uma metodologia específica que integrou variáveis geomorfológicas e biológicas no desenvolvimento de um Índice Integrado de Sensibilidade do Litoral (IISL). Os resultados indicaram alteração nos valores de sensibilidade em 85% dos trechos de costa analisados.

Dentro dessa metodologia específica, uma das variáveis medidas é a declividade da face de praia, usualmente estimada a partir de um método pontual e estático com o uso de aparelho utilizado para medir o ângulo entre um plano inclinado e um plano horizontal, o clinômetro. A utilização desse tipo de metodologia não permite aquisição de dados ao longo da extensão toda da praia devido ao esforço de campo e tempo necessário para a cobertura espacial. Assim, como forma de amenizar erros associados a esse método, no presente estudo foi desenvolvida uma técnica de campo com o uso de imagens adquiridas por drone. A utilização dessa metodologia permite cobertura completa da praia e cálculo de declividade média da face de praia, o que otimiza o tempo de trabalho e aumenta a resolução dos dados de entrada para o modelo proposto pelos autores.

Com relação à susceptibilidade ao contato com óleo, o Brasil não apresenta uma metodologia específica para sua determinação. Para este fim, são amplamente utilizados os modelos matemáticos de dispersão de partículas, capazes de simular a trajetória de um derramamento hipotético a partir de uma base hidrodinâmica local já estabelecida. Diversos são os modelos que abordam esse tema, podendo os mesmos serem probabilísticos e/ou determinísticos, de acordo com os objetivos. Alguns foram desenvolvidos para auxiliar na elaboração de planos de contingência, sendo usados para a previsão dos processos ocorridos na mancha de óleo; outros, para avaliar o impacto causado no meio aquático. Dentre os principais modelos podemos citar:

## Capítulo I. Introdução

- ADIOS 2 (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*) e o GNOME (*General NOAA Operational Modeling Environment*).
- OILMAP (*Oil Spill Model Assessment Package*) e SIMAP (*Integrated Oil Spill Impact Model System*) desenvolvidos nos Estados Unidos pela ASA (Applied Science Associates).
- OSCAR (Oil Spill Contingency and Response) desenvolvido pela Fundação de Pesquisa Científica e Industrial do Instituto de Tecnologia da Noruega (SINTEF).
- ECOS (Easy Coupling Oil System) desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande, sendo patentado sob registro (BR 51 2013 000131-5 INPI).
- SISBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) desenvolvido pela COPPE/UFRJ.
- DELFT3D desenvolvido pela empresa Deltares da Holanda.

Diversos trabalhos podem ser citados a respeito desse tema. Hospital *et al.* (2015) simularam um derrame de óleo em três dimensões na costa sudoeste do Canadá a fim de avaliar a efetividade de um plano de contingência estabelecido na região. Tal plano se deu por conta da proposta de expansão de um terminal, o que acarretaria aumento no tráfego de navios. Para esse trabalho foram utilizados os modelos SWAN para simulação de ondas e SPILLCALC para a dispersão do poluente. Também, Guandalini *et al.* (2017) desenvolveram um estudo para avaliar a dinâmica de dispersão do hidrocarboneto e seu consequente impacto ambiental no mar Adriático. Esse estudo contou com a modelagem da dispersão do óleo no software HyperSuite (módulo HYPER3D) em eventos de baixa e alta intensidade de despejo. Ainda, Alves *et al.* (2015) modelaram 104 cenários de derramamento de óleo em 11 localidades distintas no leste do mar Mediterrâneo, através do modelo MEDSLIK, com o intuito de entender o movimento da mancha de óleo e seu espalhamento.

No Brasil pode ser destacado o trabalho de Lemos *et al.* (2009) onde os autores modelaram, através do software OSCAR, diferentes cenários de derramamentos de óleo em blocos de petróleo em áreas adjacentes ao Recife de Abrolhos, a fim de verificar o efeito da maré no espalhamento do óleo sobre a plataforma leste brasileira. Também, Stringari *et al.* (2013) avaliaram a influência de variáveis físicas atuantes em um derramamento hipotético ao longo da plataforma sul do Brasil através do modelo ECOS (Easy Coupling Oil System) desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande – FURG, o qual foi acoplado ao modelo hidrodinâmico tridimensional TELEMAC3D. Recentemente outro trabalho com a utilização do TELEMAC3D foi publicado. Monteiro *et al.* (2020) propuseram uma abordagem integrada de vulnerabilidade a qual permitiu a representação de diferentes níveis de prejuízos potenciais causados pela interação entre o petróleo e o meio ambiente.

No que pese a respeito da vulnerabilidade ao contato com óleo, o Brasil também não apresenta uma metodologia oficial para sua determinação e mapeamento. A respeito desse tema o trabalho de Romero *et al.* (2013) pode ser citado. Os autores desenvolveram índices de

## *Capítulo I. Introdução*

vulnerabilidade ambiental ao óleo através da combinação de informações sobre a sensibilidade da região e modelagem numérica de óleo derramado, no modelo SIMAP, na Bacia de Santos.

Uma vez compreendidos os conceitos utilizados nessa pesquisa e uma breve descrição dos modelos utilizados ao longo do mundo, nota-se que, no Brasil, os termos sensibilidade e susceptibilidade, na maioria dos casos, são desenvolvidos e aplicados de maneiras separadas, tal fato leva a uma compreensão unilateral do sistema com a falta de integração dos dados. Esse é justamente o ponto em que a presente tese visa contribuir: na compreensão, estudo e modelagem de um sistema integrado que permita, também, o entendimento dos fatores de maneira isolada.

No caso específico deste trabalho, parte-se da premissa que a área de estudo, além de representar uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, localiza-se muito próximo ao canal de navegação da hidrovia local, onde o elevado fluxo de embarcações e a baixa hidrodinâmica local podem ser fatores cruciais e determinantes em caso de acidente envolvendo óleo e seus derivados. Espera-se que a pesquisa aporte subsídios para o desenvolvimento teórico e de ferramentas que auxiliem no processo de conservação e proteção de áreas ambientalmente protegidas expostas a possíveis incidentes.

Assim, tendo em vista o exposto acima, o presente trabalho tem por objetivo o estudo da vulnerabilidade ao óleo do Parque Estadual de Itapuã e suas áreas adjacentes. Para tal foi necessário o conhecimento das características biológicas e geomorfológicas da região e a simulação numérica de um derramamento de óleo hipotético na região norte da Lagoa dos Patos através do software Delft3D.

## Capítulo I. Introdução

### 1.1 Área de estudo

A Lagoa dos Patos situa-se entre 30° e 32° de latitude sul, no estado do Rio Grande do Sul, sendo a maior laguna do Brasil, a qual possui cerca de 240 km de comprimento e 40 km de largura média. Apesar de sua grande extensão é um corpo hídrico raso, com profundidade média de 6 metros, sendo conectada com o oceano Atlântico através de um canal na cidade do Rio Grande (Toldo *et al.*, 2006). A orientação de seu eixo longitudinal é NE-SW, alinhado com a direção predominante dos ventos da região, tal fato corrobora para a importância do efeito do vento como forçante da sua circulação. A importância relativa do vento como forçante da circulação aumenta à medida que diminui a amplitude de maré (Smith 1978, Lee *et al.* 1990, Millet *et al.* 1991, Wong 1991, Lu & Wong 1994), efeito típico de lagoas que possuem apenas uma ligação com o oceano (Kjerfve 1986, Kjerfve & Magill 1989).

A circulação atmosférica na região é determinada por dois tipos de sistemas de alta pressão: anticiclone sobre o Oceano Atlântico, que atua como fonte de massas de ar quente e úmido transportadas pelo vento nordeste; anticiclone de origem polar, que geralmente se desloca para o norte transportando massas de ar frio e seco (Möller Jr. 1996). A alternância entre esses sistemas determina um regime de ventos para a costa sul do Brasil, com predominância de ventos do quadrante NE nos meses de primavera e verão e de ventos de quadrante W e SW nos meses de inverno. Tal fato é corroborado no trabalho de Casagrande *et al.* (2018), onde os dados de vento entre os anos de 2003 e 2014 mostraram uma predominância de ventos do quadrante E-NE em 49% dos dados e quadrante W-SW em 24% dos dados.

Localizado no encontro das águas do Lago Guaíba e do norte da Lagoa dos Patos encontra-se o Parque Estadual de Itapuã (PEI) (Figura 1). Sua área protege remanescentes dos ecossistemas naturais de toda a região, o que lhe confere grande importância ecológica, científica e social. Devido à presença de morros graníticos e planícies arenosas, o PEI apresenta uma grande variedade de ambientes e paisagens como praias, lagoas, dunas, banhados, campos, costões e afloramentos rochosos, onde crescem variadas formações vegetais, incluindo remanescentes de Mata Atlântica e fauna igualmente rica (IRGANG, 2003). Especificamente sobre as praias, o parque integra oito praias arenosas, sendo 7 orientadas para o Lago Guaíba e uma para a Lagoa dos Patos, são elas: praia das Pombas, da Onça, da Pedreira, do Araçá, do Sítio, prainha, praia do Tigre e praia de Fora (Figura 2) (Nicolodi & Toldo Jr, 2002).

Especificamente sobre a sedimentologia e morfodinâmica das praias arenosas do parque, quatro praias foram classificadas no trabalho de Marinho & Nicolodi (2019) de acordo com sua granulometria, exposição às forçantes hidrodinâmicas, dimensões e declividade da face de praia.



## *Capítulo I. Introdução*

A praia das Pombas possui extensão aproximada de 800m e largura de 15m, composta por areia de granulometria grossa, moderada declividade (7°) e classificada como um ambiente de baixa energia, estando abrigada dos ventos fortes de quadrante sudoeste. A praia da Pedreira, cuja extensão aproximada é de 600 metros e largura de 25 metros, é constituída por areia média, moderada declividade (7°) e classificada como um ambiente protegido, de baixa energia. Com acesso somente através de trilha guiada encontra-se a praia do Tigre, a qual possui aproximadamente 300 metros de extensão e 20 metros de largura, é composta por areia grossa, baixa declividade da face de praia (4°) e classificada como de moderada energia, pois está abrigada dos ventos de quadrante norte/nordeste, mas completamente exposta aos ventos de quadrante sul/sudeste, frequentes em certas épocas do ano. Por fim, a última e mais extensa praia do parque, com aproximadamente 17 km de extensão e 25m de largura, a praia de Fora apresentou em sua constituição areia fina, baixa declividade (4°) e classificada como um ambiente exposto, de alta energia, com uma pista de vento que pode chegar a até 200 km para ventos de quadrante sul, gerando ondas suficientemente energéticas para alterar seu perfil (Nicolodi & Toldo Jr, 2002).

A escolha dessa região para o presente estudo provém de sua localização muito próxima ao canal de navegação da hidrovia Lagoa dos Patos (trecho navegável de 258Km) e hidrovia Guaíba (trecho navegável de 56Km), além de suas características ecológicas estarem preservadas na forma de uma Unidade de Conservação de Proteção Integral. Dentre as principais cargas transportadas por essas hidrovias estão os fertilizantes e adubos, combustíveis, óleos minerais, produtos químicos, grãos (principalmente soja e trigo), celulose e carvão mineral (SUPRG, 2020).

A hidrovia Lagoa dos Patos - Guaíba possui atualmente um elevado trânsito de navios comerciais com calado de até 5,18m que trafegam por suas águas desde a capital do estado, Porto Alegre, até a ligação com o oceano Atlântico no canal da cidade do Rio Grande, no extremo sul do estado. Ainda, à montante do Lago Guaíba está instalada a refinaria Alberto Pasqualini (Refap), no município de Canoas. Dentre seus principais produtos refinados estão o óleo diesel e o óleo combustível. Além disso, essa empresa atua no transporte e no armazenamento de petróleo e derivados, biocombustíveis e gás natural por meio da subsidiária Transpetro (Terminal Niterói - Canoas).

Com o exposto acima, a região do PEI e suas áreas adjacentes tornam-se vulneráveis ao contato com petróleo e seus derivados em caso de acidente envolvendo os navios que utilizam esse trecho para navegação. Soma-se a isso a localização do canal de navegação da hidrovia Guaíba-Lagoa dos Patos, tornando obrigatória a passagem dos navios por essa região. Tais características trazem a necessidade de maior atenção para os riscos de acidentes, preparo para possíveis operações de contenção e limpeza e estudos condizentes com o tema em questão, já que são inexistentes trabalhos com esse enfoque.

## Capítulo I. Introdução

Somado ao fato da sua localização, a extrema importância do Parque como uma Unidade de Conservação não pode ser deixada de lado. Sua localização na zona costeira contribui para o grande desafio e dificuldade no manejo de suas áreas, sofrendo tanto com a pressão antrópica oriunda da parte continental, com a intensa urbanização, atividades portuárias, exploração industrial e grande apelo turístico, quanto aos riscos de poluição e contaminação de suas águas. Tal pressão antrópica já teve papel importante no ano de 1991 com o fechamento do Parque devido a degradação geral de seus ecossistemas com o intenso uso, turismo, queimadas e criações de gado. Apenas no ano de 2002 ocorreu a reabertura do parque, com devidas restrições quanto ao número de visitantes, atividades permitidas e estudos científicos (Nicolodi & Toldo, 2003).

Sua área protege remanescentes dos ecossistemas naturais de toda a região, o que lhe confere grande importância ecológica, científica e social. Devido à presença de morros graníticos e planícies arenosas, o PEI apresenta uma grande variedade de ambientes e paisagens como praias, lagoas, dunas, banhados, campos, costões e afloramentos rochosos, onde crescem variadas formações vegetais, incluindo remanescentes de Mata Atlântica e fauna igualmente rica (IRGANG, 2003).

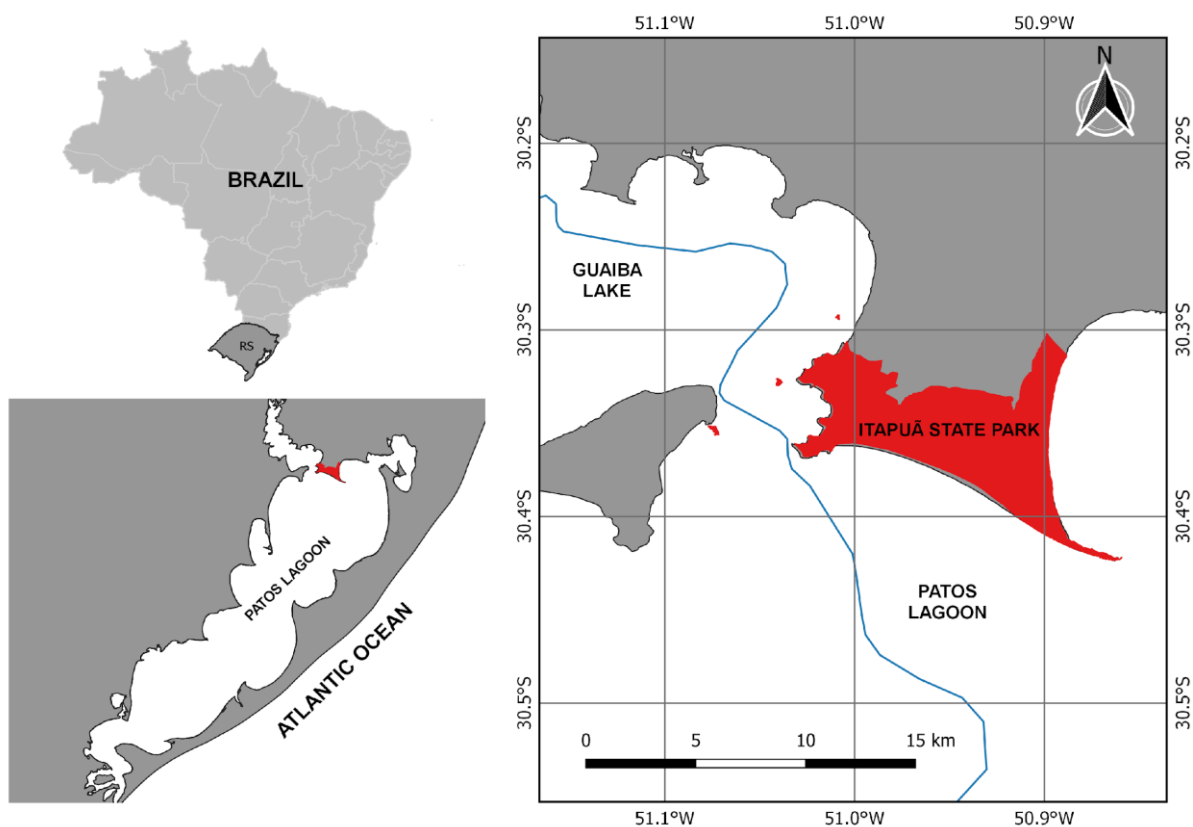


Figura 1: Área de estudo do presente trabalho. Em azul o canal de navegação da hidrovía local.

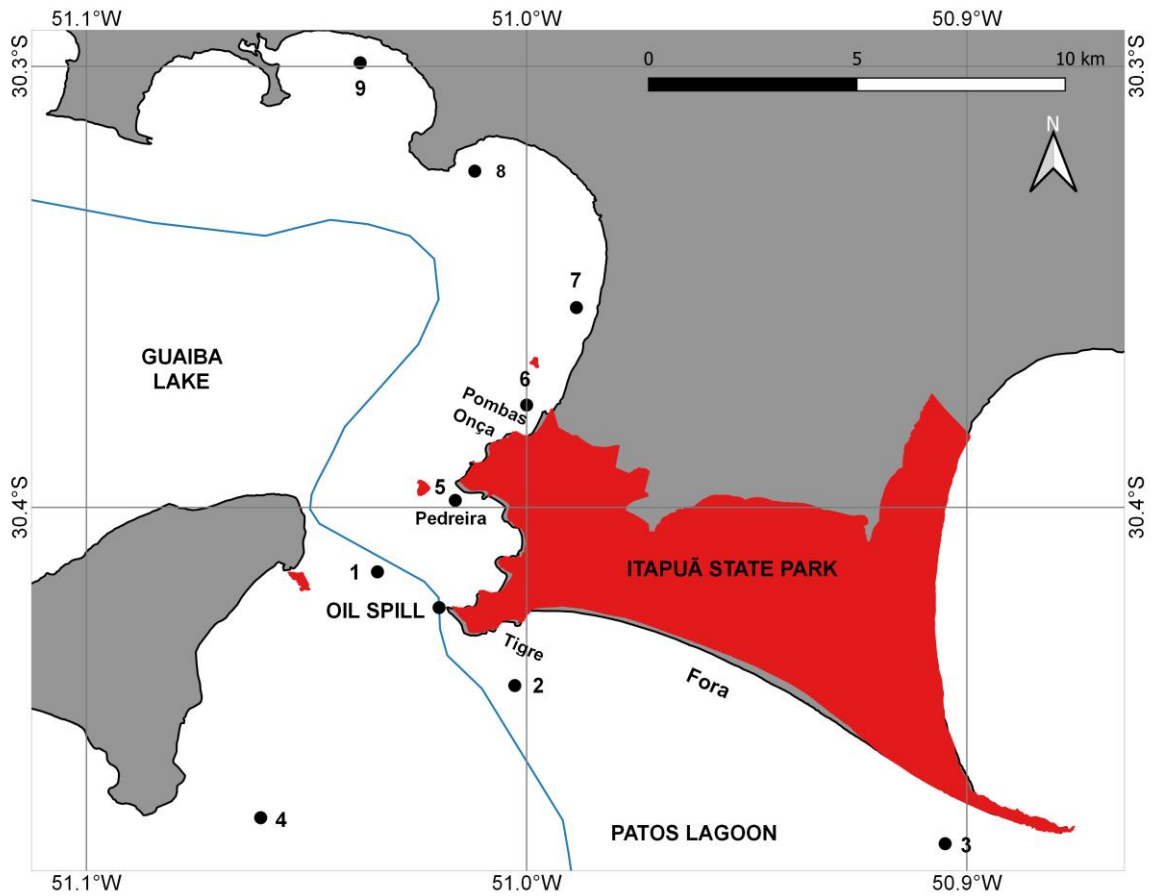


Figura 2: Praias arenosas do Parque Estadual de Itapua, Viamão, RS.

## Capítulo II: Hipótese

Por ser um ambiente com características hidrodinâmicas definidas pela ondulação, a qual acompanha os padrões de intensidade e direção dos ventos predominantes na região, espera-se que a vulnerabilidade ambiental ao óleo dos ambientes seja determinada majoritariamente pelo padrão de ondas. Portanto, a análise de tais variáveis é crucial para a gestão de acidentes com óleo nessa região.

## Capítulo III: Objetivos

### 3.1 Objetivo geral

Estudar a vulnerabilidade ambiental ao derramamento de óleo do Parque Estadual de Itapuã e suas adjacências.

### 3.2 Objetivos específicos

- Refinar a resolução dos dados de entrada para o novo modelo de sensibilidade ao contato com o óleo.
- Caracterizar o clima de ondas do setor norte da Lagoa dos Patos através de modelagem numérica.
- Traçar a dispersão superficial de um derramamento de óleo hipotético.
- Definir a vulnerabilidade ambiental ao óleo da região de estudo.

## Capítulo IV: Materiais e métodos

Para o desenvolvimento do presente estudo três etapas metodológicas distintas foram utilizadas: determinação da sensibilidade ambiental ao contato com o óleo (etapa 1); determinação de sua susceptibilidade através da dispersão hipotética de uma pluma de óleo derramado, identificando as possíveis áreas contaminadas (etapa 2); determinação da vulnerabilidade ambiental (etapa 3). A figura 3 aponta as etapas metodológicas bem como os dados de entrada necessários para seus desenvolvimentos.

É válido lembrar que o modelo proposto será devidamente detalhado nos itens que seguem, com descrição de toda metodologia e passos utilizados.

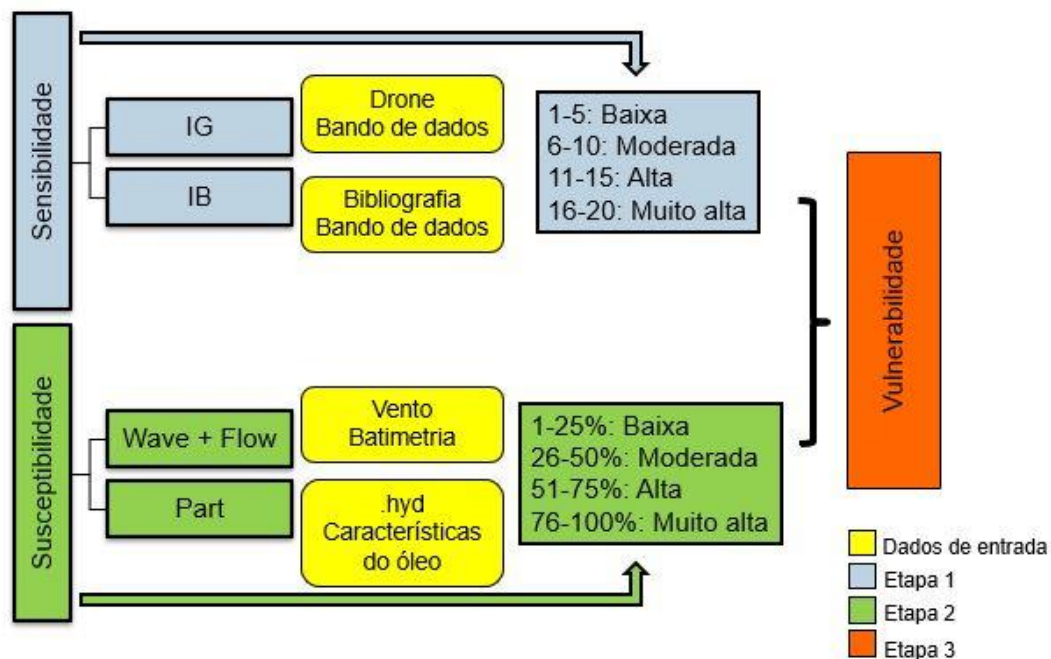


Figura 3: Etapas metodológicas do presente estudo. Etapa 1: definição da sensibilidade; Etapa 2: definição da susceptibilidade; Etapa 3: definição da vulnerabilidade. IG= Índice Geomorfológico; IB= Índice Biológico; wave+flow= modelagem hidrodinâmica; part=modelagem da dispersão do óleo; hyd= extensão da modelagem hidrodinâmica utilizada como entrada para o módulo de dispersão de partículas.

### 4.1 Determinação da sensibilidade

A definição da sensibilidade foi dada através do método proposto por Marinho & Nicolodi (2019). Tal método classificou os diferentes contornos de costa integrando dados geomorfológicos e biológicos que foram reunidos no Índice Geomorfológico de Sensibilidade (IG) e no Índice Biológico de Sensibilidade (IB), respectivamente, dando origem a um Índice Integrado de Sensibilidade do Litoral (IISL).

Esse método proposto foi baseado e adaptado da metodologia oficial brasileira para classificação da sensibilidade ao contato com o óleo no Brasil, a qual está especificada em “Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo”, documento elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente em conjunto com IBAMA, ANP e Petrobrás (MMA, 2007) e que teve sua confecção adotada a partir da NOAA, “National Oceanic and Atmospheric Administration”. De acordo com essa metodologia, a sensibilidade costeira é classificada através do Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL), um índice de base geomorfológica que mede, basicamente, a capacidade de limpeza do ambiente em função das variáveis que o classifica: grau de exposição às forçantes ondas e marés (hidrodinâmica), declividade do litoral e tipo de substrato, o qual varia de 1 a 10 em uma escala crescente de sensibilidade. De uma maneira geral, os costões rochosos são classificados em sensibilidade 1 a 2, as praias arenosas em sensibilidade 3 a 6, e planícies de maré arenosa ou lamosa e margens vegetadas classificadas entre 7 e 10, de acordo com características específicas (Marinho & Nicolodi, 2019).

Para a classificação do IG os autores utilizaram as variáveis “tipo de substrato”, “exposição às forçantes hidrodinâmicas” e “declividade do litoral”. Especificamente para a variável “declividade do litoral” uma metodologia de campo foi desenvolvida no presente estudo com o uso de imagens adquiridas por drone. A utilização desta metodologia qualifica o processo de aquisição de dados, o que melhorou a resolução dos mesmos e tempo de esforço em campo.

No que diz respeito ao IB, o método do referido artigo foi baseado no trabalho proposto por Ihaksi *et al* (2011) tendo como variáveis a presença/ausência de “espécie sensível”, “espécie com localização prevista”, “espécie endêmica/extinção”, “espécie dependente da costa”. A figura 4 sintetiza a metodologia descrita nesse item.

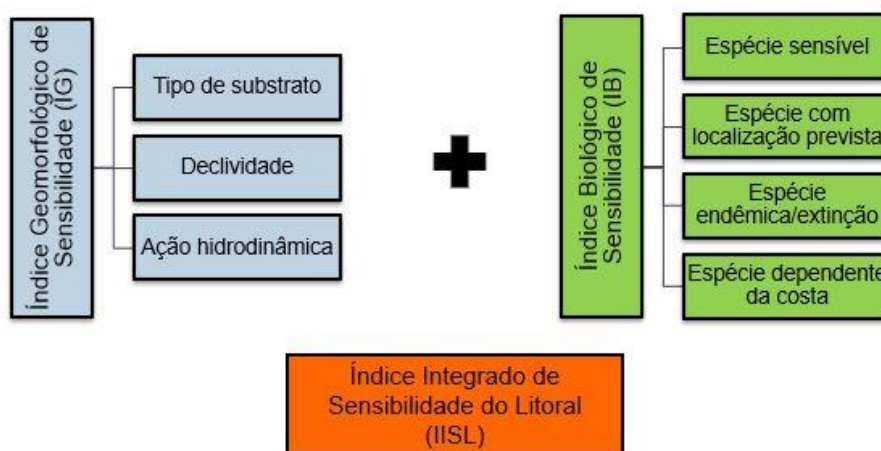


Figura 4: Metodologia de definição da sensibilidade ao contato com o óleo.

Fonte: Adaptado de Marinho & Nicolodi (2019).

#### 4.1.1 Imageamento por drone

O trabalho de campo ocorreu nos dias 21 e 22 de agosto de 2018, com a equipe sendo recebida pela diretora do Parque, como mostra a figura 5.

Para que o acesso fosse permitido e a pesquisa realizada, alguns protocolos foram realizados. Foi necessário o devido preenchimento de um modelo de projeto de pesquisa, solicitação de autorização de pesquisa, termo de compromisso de cada pesquisador e modelo de relatório de pesquisa, os quais foram encaminhados para a Divisão de Unidades de Conservação da Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado do Rio Grande do Sul. Dessa maneira, foi expedida a autorização de pesquisa no dia 20 de fevereiro de 2018, número de cadastro 613, com prazo de um ano.

Para a aquisição das imagens foi utilizado o drone DJI Phantom 4 (Figura 6), sendo realizados três voos nas praias do Parque Estadual de Itapuã (PEI): praia das Pombas, praia da Pedreira e praia da Onça. A metodologia empregada permite o planejamento e construção dos planos de voo previamente ao trabalho de campo pela plataforma DroneDeploy<sup>3</sup>. Através do processamento e pós-processamento das imagens no software PhotoScan e a utilização de ferramentas de geoprocessamento foi determinada a declividade da face de praia das praias do PEI, além das medições de suas larguras e extensões. Como já mencionado anteriormente, a grande vantagem desse método em relação à metodologia comumente utilizada (clinômetro) é a capacidade de cobertura de grandes áreas de maneira rápida e precisa e com pequeno esforço de campo.



Figura 5: Recepção na chegada ao Parque Estadual de Itapuã.

<sup>3</sup> <https://www.dronedeploy.com/>





Figura 6: Drone e trabalho de campo realizado.

#### 4.2 Determinação da susceptibilidade

Para a determinação da susceptibilidade ou chance/probabilidade de toque do óleo na costa foi utilizada a modelagem numérica da dispersão de pluma de óleo através do software Delft3D, desenvolvido em Delft, na Holanda, pela empresa Deltares e em cooperação com a Universidade Tecnológica de Delft.

O Delft3D possui ferramentas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, que auxiliam na implementação do modelo para determinada região e permitem a visualização dos parâmetros de entrada e saída do modelo. O módulo de ondas pode, ainda, ser acoplado com outros módulos, como por exemplo, com o módulo hidrodinâmico (gerando correntes induzidas por ondas) e com o módulo morfodinâmico (incluindo transporte de sedimentos provocado pelas ondas).

No presente estudo foram utilizados os módulos WAVE e FLOW de maneira acoplada para geração da base hidrodinâmica local, a qual serve como dado de entrada para as simulações do derramamento de óleo no módulo PART. Uma vez validado o modelo hidrodinâmico, foram inseridas as características físico-químicas do óleo em questão e realizados os cenários hipotéticos do derramamento.

#### 4.2.1 Módulo hidrodinâmico

A partir do desenvolvimento da base hidrodinâmica local foi elaborado o artigo intitulado “*Wave regime characterization in the northern sector of Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil.*”<sup>4</sup>. Tal artigo apresentou a predição de ondas para o setor norte da Lagoa dos Patos utilizando dados horários de reanálise do satélite ERA-Interim de intensidade e direção dos ventos do ano de 2018 como entrada para forçar o modelo hidrodinâmico, juntamente com a batimetria local. Para calibração e validação desse modelo na região de estudo foram utilizados parâmetros de onda (altura significativa de onda, período de pico e direção de propagação) adquiridos *in situ* por um ondógrafo direcional fundeado próximo ao porto de São Lourenço do Sul<sup>5</sup> (Figura 7). O conteúdo completo desse artigo está no capítulo V.

Devido aos baixos valores de intensidade de corrente superficial na região de estudo, foram utilizados no presente trabalho os dados de corrente superficial induzida por ondas e ventos obtidos por Nicolodi *et al.* (2010). Este trabalho mediu as correntes no Lago Guaíba, as quais apresentam uma média de velocidade de 0,1m/s, alcançando velocidades máximas de 0,15m/s. Nesse mesmo sentido, Nicolodi *et al.* (2013) apontam as correntes superficiais induzidas por ondas do quadrante E e SE e correntes induzidas pelo vento como principais forçantes na ressuspensão de sedimentos no Lago Guaíba. Tal fato explica a granulometria arenosa encontrada nas praias do presente estudo, estando os sedimentos lamosos localizados apenas na isóbata abaixo dos 3 metros de profundidade e no canal de navegação.

Outros autores como Bhowmik & Stall (1978) e Burrows & Hedges (1985) também demonstraram que correntes horizontais em lagos rasos influenciariam na altura de ondas apenas com velocidades acima de 0,5m/s. Dessa maneira, baseado na literatura e nos valores modelados de correntes induzidas por ondas e ventos pôde-se desprezar o efeito das correntes horizontais na influência da ondulação para a região de estudo.

---

<sup>4</sup> Artigo publicado na revista Ocean and Coastal Research.

<sup>5</sup> Ondógrafo fundeado via projeto “Rede Ondas”. <https://redeondas.furg.br/pt/dados/lagoa-dos-patos-rs>.



Figura 7: Fundeio do ondógrafo na Lagoa dos Patos.

#### 4.2.2 Módulo PART

O módulo PART do software Delft3D simula o transporte e processos de qualidade da água através do conhecimento de métodos traçadores de partículas em duas ou três dimensões com a utilização de dados provenientes dos módulos hidrodinâmicos discutidos nos itens acima. Nesse módulo do software cada partícula está sujeita ao deslocamento randômico, sendo a distância do deslocamento dependente do local do despejo e especificações técnicas do software como *time step* das simulações. Também, a posição de cada partícula individualmente pode ser influenciada pelos processos de advecção (transporte pelo fluxo hidrodinâmico), difusão/dispersão (componente randômico) e sedimentação/erosão. Especificamente sobre a massa da partícula, a mesma pode ser influenciada pelas taxas de decaimento e evaporação da substância (Deltares, 2020).

Assim sendo, partindo de uma base hidrodinâmica local estabelecida e validada para a região, foram gerados os cenários de dispersão superficial de um derramamento hipotético no canal de navegação frente ao Parque Estadual de Itapuã. Para tal simulação, foram identificados quatro cenários extremos de altura significativa de onda ao longo da série temporal hidrodinâmica modelada para o ano de 2018. Os quatro cenários com valores extremos de altura significativa de onda ( $H_s$ ) e, conseqüentemente, maiores valores de intensidade dos ventos, foram identificados nos meses de fevereiro, maio, agosto e novembro. Para a análise das séries temporais da dispersão do óleo, sete pontos de controle ao longo da região de estudo foram estabelecidos. Para cada cenário foi realizada uma simulação com óleo diesel marítimo (Marine Gasoil - MGO)

Tabela 2. Características físico-químicas do óleos utilizado nas simulações.

Diesel
Oil spill volume (m <sup>3</sup> ): 20
Density: 896kg/m <sup>3</sup>
Kinematic viscosity: 11mm <sup>2</sup> /S
Maximum water content: 0.3

Tabela 3. Parâmetros ajustados para o modelo de dispersão superficial do óleo.

Wind data	Time step	Evaporation per day	Simulation	Minimum thickness	Emulsification parameter
6hours	20 minutes	0.05	5 days	0.0003m	2*10 <sup>-6</sup>

### 4.3 Determinação da vulnerabilidade

Uma vez determinado o comportamento superficial da pluma de dispersão, foi desenvolvida uma metodologia específica para a determinação da vulnerabilidade ambiental ao contato com óleo da área de estudo. Essa segunda etapa do desenvolvimento da tese gerou o artigo intitulado “*Environmental vulnerability to oil spills in Itapuã Stake Park, Rio Grande do Sul, Brazil: an approach using two-dimensional numerical simulation*” que pode ser lido no capítulo V.

Após a definição da sensibilidade ambiental ao óleo das praias do Parque Estadual de Itapuã, segundo metodologia descrita acima, quatro níveis de sensibilidade puderam ser estabelecidos de acordo com seus índices, são eles:

- Baixa sensibilidade: valores de IISL entre 1 e 5.
- Moderada sensibilidade: valores de IISL entre 6 e 10.
- Alta sensibilidade: valores de IISL entre 11 e 15.
- Muito alta sensibilidade: valores de IISL entre 16 e 20.

Mediante determinação e observação dos cenários de dispersão da pluma de óleo diesel, ficou determinado a ausência ou a presença de poluente nas praias do Parque Estadual de Itapuã sob diferentes padrões de ventos e condições hidrodinâmicas locais. Praias que apresentaram contato com o óleo diesel foram classificadas como susceptíveis, independente da concentração de óleo observada e do tempo necessário para tal contato. Os diferentes níveis de susceptibilidade foram determinados através da frequência de ocorrência mediante os quatro cenários estabelecidos, como segue abaixo:

- Baixa susceptibilidade: praias atingidas em apenas 25% dos cenários estabelecidos.
- Moderada susceptibilidade: praias atingidas em 50% dos cenários estabelecidos.
- Alta susceptibilidade: praias atingidas em 75% dos cenários estabelecidos.
- Muito alta susceptibilidade: praias atingidas em 100% dos cenários estabelecidos.

Tendo em vista a adoção de cenários mais conservadores com relação aos efeitos causados em suposta contaminação com óleo diesel, a classificação da vulnerabilidade das praias foi realizada tendo como critério o maior nível de sensibilidade/susceptibilidade encontrado.

## Capítulo V: Artigos científicos

### **Wave regime characterization in the northern sector of Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil**

Chayonn Marinho<sup>1</sup>, Jorge Arigony Neto<sup>1,2</sup>, João Luiz Nicolodi<sup>1</sup>, Natalia Lemke<sup>3</sup>, José Antonio Scotti Fontoura<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande - Instituto de Oceanografia (Av. Itália, Km. 8, s/n.º, Bairro Carreiros, Rio Grande- Caixa Postal: 474 - 96.201-900 - RS - Brazil).

<sup>2</sup> Macquarie University - Department of Environmental Sciences - Level 4 - 12 Wally's Walk North Ryde - Sydney - Australia)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande - Instituto de Matemática, Estatística e Física - Campus Carreiros - Av. Itália km8 Bairro Carreiros - 96201-900 - Rio Grande - RS -Brazil.

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande - Laboratório de Engenharia Costeira - Av. Itália, s/n – km - Campus Carreiros – Rio Grande - 96203-900 - RS - Brazil.

#### ABSTRACT

This paper presents wave prediction results for the northern sector of Patos Lagoon through numerical modeling using Delft3D software. ERA-Interim satellite reanalysis data of wind intensity and direction were used as inputs to force the hydrodynamic model. For SWAN calibration and validation in the study region wave parameters were used. These parameters were acquired in situ by a directional waverider buoy. Statistical data showed the good performance of the model, albeit with a tendency to overestimate significant wave height and underestimate peak period and propagation direction. Once validated, wave parameters for five points at different depths were obtained during the four seasons of the year between 2017 and 2018. In general, it was observed that the largest ripples come from the S and SSW directions and occurred during spring at the deepest point under wind conditions exceeding  $10 \text{ m s}^{-1}$ . Ripples up to 0.30 m account for 77.9 % at the shallowest point and 65.7 % at the deepest point. Thus, the study area was classified as low energy and characterized by small, high-frequency, short-period ripples that are strongly influenced and determined by the local depth because larger ripples are always observed in the deepest locations, giving the lagoon a characteristic of depth-limited ripples. The results obtained here have the potential to contribute to territorial management of the region, with emphasis on the Integral Protection Conservation Unit located in the study area (Itapuã State Park) and on the development and safety of the important, heavily used navigation route that connects Rio Grande Port to the state capital, Porto Alegre.

Keywords: Wave modeling; SWAN; wave regime in Patos Lagoon.

## INTRODUCTION

Wave climate knowledge of a certain region is critical to understanding local hydrodynamics, sediment transportation, and coastal morphology. This fact becomes important for building a strategic vision against scenarios of global warming, sea-level rise and coastal erosion (Nicolodi & Pettermann, 2011). Specifically, in Patos Lagoon, orientation changes of its margins concerning to wind patterns are accompanied by erosion or deposition processes (Villwock, 1972), developing bays in erosional profiles and sandspits in depositional situations.

Based on wave models and global ocean/atmosphere reanalysis, many efforts have been made in recent decades to generate a consistent dataset to define wave climate. Currently, several global reanalyses have appeared in the literature, each with better spatial resolutions and improved process approximation methods than previous reanalyses (Rodríguez *et al.*, 2018).

A considerable portion of the energy transferred from the atmosphere to oceans, lakes, and lagoons is carried in waves (Paes-Leme *et al.*, 2008), and wind-generated waves are considered the dominant force in coastal hydrodynamics and morphodynamics (Rocha *et al.*, 2012). According to Machado (2013), the wave climate characterization of a region is determined through the statistical pattern of descriptive parameters, such as significant wave height, peak period and propagation direction. Another factor that directly contributes to this characterization is the climate, location of atmospheric systems and prevailing wind regime.

In Brazil, although there is knowledge about the current subject, the systematic monitoring of variables such as waves and tides is still very recent (Rodríguez *et al.*, 2018). There are few data on wave measurements, especially in the form of longer and more reliable time series. Wave measurement can be obtained by three methods: visual estimates, in situ techniques and remotely operating sensors. Visual estimates have been widely used until recently, especially in small projects, and the data have been validated by several researchers (Jardine, 1979; Bryant, 1979; Guedes Soares, 1986; Plant & Griggs, 1992). In situ instruments are used to acquire time series of three-dimensional independent wave parameters and should be placed on the surface, such as a directional waverider buoy, or fixed below the surface, such as an acoustic Doppler current profiler (ADCP) (Holthuijsen, 2007). Remote sensing measurements, or the use of altimeter radar onboard satellites, are widely used in ocean bathymetry, topography, and wave measurement. Specifically, in the case of waves, altimeter radars measure the height of the satellite relative to the sea surface, so the radar emits a pulse that first reflects the wave's crest and then its pit. The difference between pulse emission and pulse reception is used to calculate the wavelength. Although the resolution and accuracy of this type of method are lower than those of in situ instruments, it has the advantage of greater area coverage and is used in global model validation processes (Sánchez *et al.*, 2018).

Through the advancement of computing, numerical models have been widely improved and used throughout the world. Attention must be given to the need for high-resolution data that will be provided to the model and a set of physical parameters to be calibrated for each study region. One of the most widely used models in determining wave patterns around the world is the SWAN (Simulating Waves Nearshore) model, which has the great advantage of its versatility because it can be applied to large open coastal areas or confined areas such as bays and estuaries. Numerous researchers have used SWAN for wave modeling in sheltered environments, such as the Black Sea (Akpınar *et al.*, 2012; Rusu, 2016; Rusu *et al.*, 2014; Van Vleeder & Akpınar, 2015), Spanish coast (Pallares *et al.*, 2014) and Brazil (Nicolodi *et al.*, 2013).

In Brazil, some articles using the SWAN model can be cited. Matos *et al.* (2017) presents results from the application of the numeric model SWAN with comparative analysis among measures from modeling and obtained at a field campaign, done between 2010 and 2012, on the northern coast of Rio Grande do Norte (Northeast of Brazil). The statistical results of the model validation showed a tendency to overestimate wave height and underestimate peak period. Regarding the direction of propagation of the waves, very distinct results were observed between the modeled and measured data. Cassiano *et al.* (2012) performed a ten-year wave simulation to obtain the typical wave climate in Santos beach using SWAN. Wave data were collected in the middle of the Santos Bay with an ADCP for six months. These data were used to understanding the wave climate and validated wave modeling. Guimarães *et al.* (2015) studied the extreme wave runup during storm events in Tramandaí Beach, Rio Grande do Sul, Brazil, using numerical simulation, combining the Wave Watch III, SWAN and SWASH models, to achieve accurate and computationally feasible simulation of waves at a different time and spatial scales, from the formation process at deep water up to the total energy dissipation in the swash zone. It was discovered that the empirical models lead to the systematic overestimation of the runup results.

Specifically, in Patos Lagoon, some studies such as those of Lemke (2015), Lemke *et al.* (2017), and Lemke *et al.* (2018) can be cited. Despite some recent studies published in Patos Lagoon, according to Fontoura *et al.* (2015), until 2015, there were no records of detailed studies on the wave regime in Patos Lagoon, and studies in this area are scarce. Also, no work has been performed in the northern sector of the lagoon. Due to the large size of Patos Lagoon, being the largest coastal lagoon in Brazil and heavily used navigation route that connects Rio Grande Port to the state capital, Porto Alegre, it is important to validate a local hydrodynamic model.

Lemke (2015) conducted a detailed study of the wind regime in Patos Lagoon through linear correlations between the European and North American reanalysis models (i.e., ECMWF and NCEP / NCAR) at different lagoon points and measurement stations. Thus, it was concluded that there is no significant spatial variation in the intensity and direction of the lagoon wind fields



between the four analyzed points of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) model due to the excellent linear correlations. However, some variation when comparing the results between models may be expected due to the distance between the analysis sites. This study indicated that the models are valid for the study location.

A calibrated and validated wave model, where it is possible to understand the wind patterns acting on the coastal dynamics and to make new data available for the study region, is likely to improve navigation safety, beach safety, and coastal erosion, addressing part of the challenges of coastal management. Thus, the objective of the present study is to determine the wave regime in the northern sector of Patos Lagoon using the SWAN numerical model.

## MATERIAL AND METHODS

### Study Area

Patos Lagoon is located between 30°S and 32°S, in the state of Rio Grande do Sul, and is the largest coastal lagoon in Brazil, measuring approximately 240 km long and 40 km wide on average. Despite its great extent, it is a shallow water body, with an average depth of 6 meters, connected to the Atlantic Ocean through a channel in the city of Rio Grande (Toldo *et al.*, 2006). The orientation of its longitudinal axis is NE-SW, aligned with the prevailing wind direction of the region, which corroborates the importance of the wind effect as a force for its circulation. The relative importance of wind as a driving force increases as the tidal range decreases (Smith, 1978; Lee *et al.*, 1990; Millet *et al.*, 1991; Wong, 1991; Lu & Wong, 1994), a typical effect of lagoons that have only one connection with the ocean (Kjerfve, 1986; Kjerfve & Magill, 1989).

Delaney (1965) geomorphologically divided Patos Lagoon into 3 regions: the estuarine region, situated between the lagoon mouth and Ponta da Feitoria; the central region, representing the area between Ponta da Feitoria and the entrance of Casamento Lagoon; and the upper region, including Casamento Lagoon and Guaíba Lake. The study area of the present study covers the northern area of Patos Lagoon, as shown in Figure 1.

The atmospheric circulation in the region is determined by two types of high-pressure systems (Möller Jr, 1996). The first is an anticyclone over the Atlantic Ocean, which is located at approximately 30°S. This center acts as a source of hot and humid air masses carried by the northeast wind. Anticyclones of polar origin, which generally move north carrying cold and dry air masses, are the other type of system. The passage of these frontal systems is more frequent during winter, having an average period of 6 days (Stech & Lorenzetti, 1992); in summer, the average period is 11 days (Möller Jr, 1996). The prevailing wind regime in the region is northeast, associated with an anticyclone over the Atlantic Ocean. In winter, however, the increased frequency of frontal system passage causes an increase in the frequency of south-quadrant winds (Möller Jr,

1996). The average northeast and southwest wind speeds for the region are between 3 and 5 m s<sup>-1</sup> (Herz, 1977; Long, 1989). The northeast wind, acting on the central region of the lagoon, generates southward water transport, which causes a depression in the lagoon body level in the northern part (Itapuã) and an elevation in the southern part (Feitoria). In contrast, Patos Lagoon waters' response to the southeast wind action is opposite to that found under the northeast wind action, with an accumulation of water in Itapuã and depletion in Feitoria (Castelão & Moller, 2003).

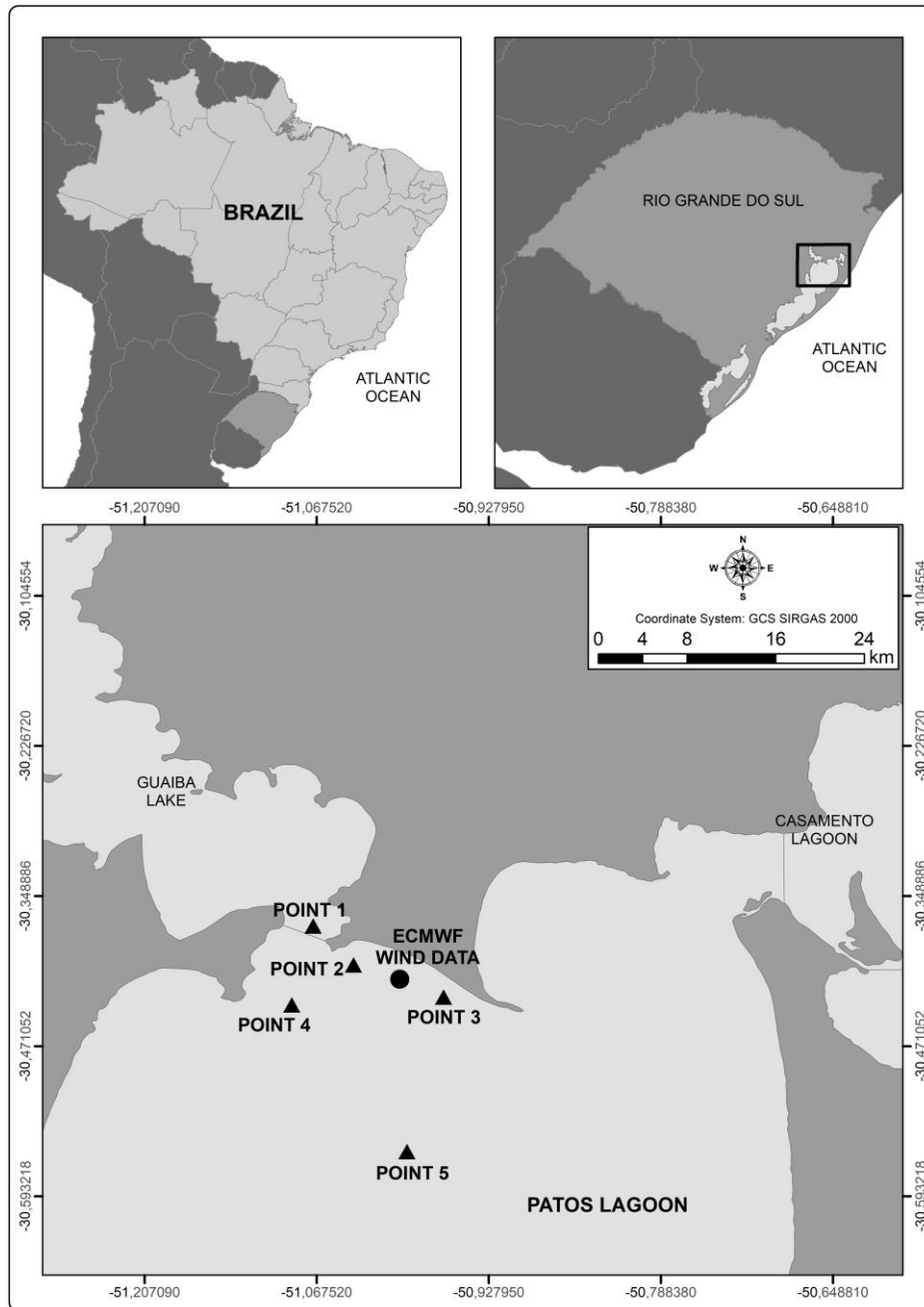


Figure 1: Study area, located in Patos Lagoon (Brazil). Points 1-5 fixed in the model at different depths for the time series extraction. Localization of the time series of wind intensity and direction used in the simulation.

## Bathymetric and wind data

The bathymetric data of Patos Lagoon were acquired through nautical charts available on the website of the Directorate of Hydrography and Navigation (DHN), which were digitized by the Coastal Engineering Laboratory of the Federal University of Rio Grande (FURG). Pre-existing data from Nicolodi (2002) and the project “Sedimentation of the Guaíba Complex” were also used.

For the wave model to be developed, data on the wind regime and bathymetry of the study region must be previously known and defined. Such factors are used as input data for SWAN, where wave generation is induced by winds and the local bathymetry.

For calibration and validation of the wave model, a time series of winds from the Rio Grande Pilot Station was used from August 16 to December 31, 2018, which is read every hour, with 16 sectors for wind direction. Because the acquisition of wind intensity values is made at 25 m altitude, it was necessary to reduce them to 10 m according to Equation 1 (Coastal Engineering Manual – Part II).

$$u_z = u_{z_{obs}} \left( \frac{z}{z_{obs}} \right)^{1/7} \quad (\text{Equation 1})$$

where

$u_z$  is the wind speed at new height  $z$  and

$u_{z_{obs}}$  is the wind speed recorded at the observed height.

For the numerical simulation in the study region, a time series of wind intensity and direction obtained from ECMWF/ERA-Interim reanalysis data was used. This choice took into account the absence of weather stations near the study region. ERA-Interim is the latest global atmospheric reanalysis produced by ECMWF, launched in 2009. It has several improvements compared to its predecessors, with a spatial resolution of 0.25 ° and hourly temporal resolution. For the development of this work, data for the zonal and southern wind components, at a height of ten meters, were extracted from the coordinate points 51°W and 30.25°S, beginning in December 2017 and for the whole year 2018. It was necessary to calculate the magnitude and direction of winds, a method performed in the SisBAHIA software. To characterize the 2017/2018 wind regime, a wind rose was constructed for the time series.

## Numerical modeling

This section describes the methodological steps employed in the present study. The methodology includes the acquisition of bathymetry and wind intensity and direction data, as well as the wave parameters ( $H_s$ ,  $T_p$ , and  $D_p$ ) measured in situ by a directional waverider buoy moored in the central region of Patos Lagoon. The wave computational modeling used the following input

variables: local bathymetry and wind time series. After calibrating and validating the model, the wave regime in the northern sector of Patos Lagoon for 2017/2018 was characterized by numerical simulation in the Delft3D software. For the time series extraction of wave parameters, such as significant wave height ( $H_s$ ), peak period ( $T_p$ ) and propagation direction ( $D_p$ ), five points at different depths and locations were fixed in the model, with points 1 (UTM 22S 493248.34 mE, 6639860.0 mN), 2 (UTM 22S 496394.16 mE, 6636348.0 mN), 3 (UTM 22S 503393.00 mE, 6633446.0 mN), 4 (UTM 22S 491750.41 mE, 6633217.0 mN), 5 (UTM 22S 500565.53 mE, 6619501.5 mN) at depths of 3.7 m, 5.7 m, 5 m, 7 m and 7.5 m, respectively, as shown in Figure 1.

#### In situ wave measurements

Wave data were acquired through the directional waverider buoy (model DWR-G), designed by the Dutch company Datawell, moored at a distance of approximately 14km from the coast of São Lourenço do Sul, on the west bank of Patos Lagoon, at coordinates of  $31^{\circ}29'S$  and  $51^{\circ}55'W$  (Figure 2) and local depth of 6 m. The waverider buoy in the present study belongs to the Federal University of Rio Grande (FURG) and was acquired via the project “Rede Ondas”. Its technical characteristics include a diameter of 0.7 m, the presence of a GPS-based wave sensor, which measures wave height, period and direction, as well as water temperature. This equipment was installed on August 15<sup>th</sup>, 2018, recording and transmitting data to the FURG station at the São Lourenço do Sul Campus with a frequency of 30 minutes. The visualization of the collected data can be performed in real-time with the *W@ves21 Software*, also developed by the company Datawell.

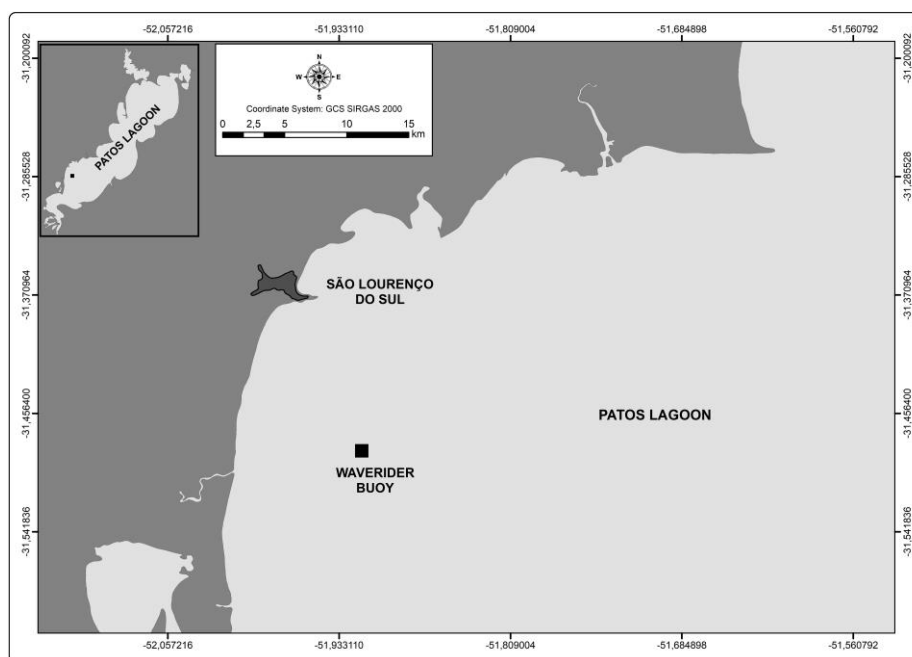


Figure 2: Directional waverider buoy moored in Patos Lagoon.

## Wave model

To simulate wave generation and propagation in Patos Lagoon, the SWAN model was used. This model was developed by the Delft Technological University in the Netherlands. It is a third-generation model used in shallow coastal regions that has physical parameters such as refraction, shoaling, wind-wave generation, whitecapped wave breaking, and bottom friction. For the application and calibration of the wave model, the steps below were followed:

- making a rectangular grid with a spatial resolution of 500 meters which was determined through a procedure called Grid Independent Test (Shin, 2013). This test is performed to eliminate/reduce the influence of the number of grids/grid size on the computational results;
- insertion and interpolation of bathymetric data extracted by scanning available nautical charts and compiling pre-existing data;
- wave simulation in the lagoon performed with all contours closed;
- activation of depth-induced breaking, bottom friction, whitecapping, and refraction processes;
- wind shear coefficient ( $C_D$ ) determined by Wu (1982) parameterization (Equation 2);
- Collins bottom friction coefficient 0.030 and whitecapping with Komen formulation (Komen *et al.*, 1984).

$$C_D = (0.80 + 0.065 W_{10}) \times 10^{-3} \text{ (Equation 2)}$$

## Wave model validation for Patos Lagoon

Through hourly wind intensity and direction data, wave generation was simulated using the SWAN model. In the numerical grid used, the point with the same coordinates as the buoy was selected to record significant wave height values, peak period, and propagation direction generated through the modeling, making it possible to perform statistical analysis between modeled wave parameters and wave parameters recorded by the waverider buoy. Both time series of simulated and measured wave parameters were analyzed based on statistical calculations available in the literature (Melo *et al.*, 2008; Lalbeharry, 2001; Aguiar, 2014), evaluating the parameters described below.

- Average measured data ( $\bar{o}$ ).
- Averaged modeled data ( $\bar{m}$ ).
- Bias (V): determines the average deviation between the results compared; if positive, it tends to overestimate the measurements, and if negative, it understates them.
- Root mean square error (RMSE): indicates the magnitude of the error of the modeled values in relation to the measured values; thus, it is used to evaluate the accuracy of the results.

- Scattering Index (SI): indicates the percentage error of the system as a function of the mean values, representing confidence in the data set.
- Symmetric Slope (SS): a result of a regression analysis where it is considered that neither of the two data sets (observed and modeled) is perfect but contribute equally to the error. In an ideal situation  $SS = 1$ ; if the SS value is different from the ideal situation, the model will be underestimating ( $SS < 1$ ) or overestimating ( $SS > 1$ ).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Wind and wave observations

During the period used to perform wave model validation, the highest wind occurrences came from the ENE (15.4 %) and NE (12 %), followed by winds from the E (9.7 %), S (8.7 %) and SSE (8.6 %), as shown in Figure 3. Regarding the intensities, the occurrences were as follows: winds from 6 to 9  $m s^{-1}$  with 40.7 % of the cases, winds from 3 to 6  $m s^{-1}$  with 28.8 % of the records, winds from 9 to 12  $m s^{-1}$  with 18.3 %, up to 3  $m s^{-1}$  with 7 %, winds from 12 to 15  $m s^{-1}$  with 4.4% and winds from 15 to 18  $m s^{-1}$  with 0.7 %. There were no winds above 18  $m s^{-1}$  during this period.

Overall, the highest wind frequency occurred in the ENE direction, with winds ranging from 6 to 9  $m s^{-1}$  accounting for 6.7 % of cases. The highest intensity winds come from the north quadrant, mainly from the ENE and NE directions.

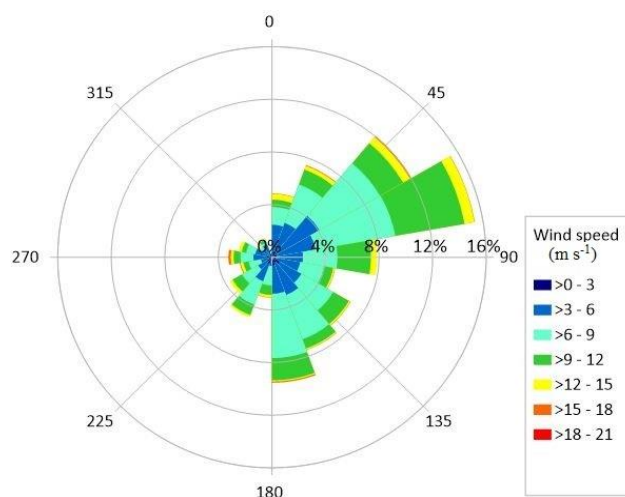


Figure 3: Wind speed and direction, from August 16th to December 31<sup>st</sup> 2018, measured at the Rio Grande Pilot Station.

Through data acquired by the waverider buoy moored in Patos Lagoon, it was possible to construct the wave rose for significant wave height ( $H_s$ ) and peak period ( $T_p$ ) according to the wave propagation directions. The present study used just one validation point like other similar studies. Sorensen *et al.* (2004) developed a model and simulated for the North Sea, parts of the Norwegian

Sea, and the Baltic Sea. The results are validated from wave rider buoy and found that the model is better in prediction than which does not use fine mesh. Nicolodi *et al.* (2013) studied the dynamic and resuspension by waves and sedimentation pattern definition in low energy environments, Guaíba Lake (Brazil) using one validation point. The wave model was validated through a correlation of the data obtained with the data measured by an FSI3D waverider buoy moored near Jangadeiros Club, in the southern area of Porto Alegre (UTM 22S 474233 and 6667179). The results were considered within expectations, and the correlation obtained was comparable to those of most of the studies consulted in the literature and deemed satisfactory.

According to Figure 4, waves from the ENE with  $H_s$  values between 0.3 and 0.6 m and  $H_s$  values up to 0.3 m occur most frequently from August to December 2018, totaling 12 % and 10.2 % of cases, respectively. Regarding to all directions of propagation, waves up to 0.3 m occur in 43.7 % of cases, followed by waves between 0.3 and 0.6 m with 36.6 % of cases, waves between 0.6 m and 0.9 m with 17.4 %, waves between 0.9 and 1.2 m with 1.9 % and waves greater than 1.2 m were only 0.40 % of the entire period.

Regarding the peak period, the highest frequency was found in ENE waves with periods between 3 s and 4 s, with 13.7 % of the cases, and periods between 2 s and 3 s with 11.2 %. Overall, peak periods between 3 s and 4 s were the most frequent, with 41 % of cases, followed by periods between 2 s and 3 s with 37.9 %, periods between 1 s and 2 s with 12.7 % of cases, periods between 4 s and 5 s with 8.3 %, and periods between 5 s and 6 s with 0.2 % of cases. No waves with periods of less than 1 s were observed.

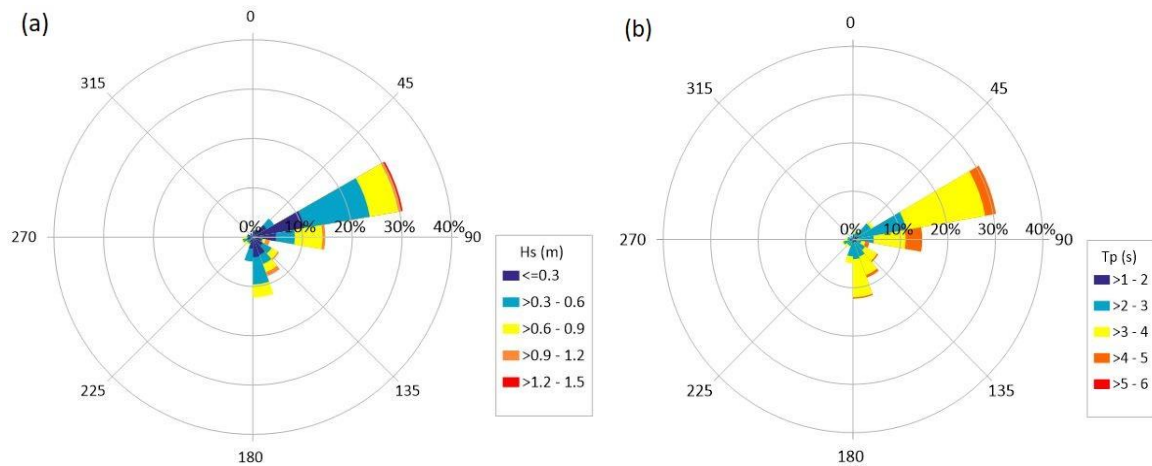


Figure 4: Significant wave height ( $H_s$ ) (a) and peak period ( $T_p$ ) (b) according to their propagation direction.

## Model validation

For validation of the wave model, a time series of winds from the Rio Grande Pilot Station was used from August 16 to December 31, 2018, which is read every hour. In general, it is observed that the model reproduces the parameters measured very well. Nevertheless, statistical analyses between the buoy data and the simulated data show a tendency to overestimate the significant wave height and underestimate the peak period and the wave direction of propagation; such characteristics can be observed in Figures 5 and 6.

This trend can be explained by some factors such as the lack of detailed bathymetry data, the use of wind data from the atmospheric model, small *in situ* wave data time series, buoy dimensions, and model-specific settings. This trend was also observed previously in Lin *et al.* (2002) and Moeini & Shahidi (2009), in which the authors applied SWAN in the Chesapeake Bay. Another study also points to this trend in the model, as observed in Rusu *et al.* (2014). In this article, the authors observed a tendency to underestimate wave height, peak period, and wave propagation direction. The improved Janssen parameterization for the energy transfer from the wind to the waves appears to work better in this study.

Padilla-Hernández & Monbaliu (2001) compared three different formulations, which are in the SWAN model, for the dissipation of wave energy in shallow locations where wavelength growth is limited by depth. For the Collins formulation, in the SWAN model, the use of a friction bottom coefficient of 0.030 improved the data scattering index (SI), reaching its best values. Hasselman & Collins (1968) proposed the value of 0.015 for the same coefficient; However, for the present study, this value worsened the SI, therefore the value suggested by Padilla-Hernández & Monbaliu (2001) was used. Statistical analyses with the two friction coefficients can be observed and compared in Table 1 and Table 2. It is observed that the use of a lower coefficient of friction is responsible for worsening the confidence in the modeled data (SI), increasing the error associated with the process (RMSE), and decreasing data correlation (SS).

As shown in the data, the mean values of significant wave height ( $H_s$ ), peak period ( $T_p$ ), and propagation direction ( $D_p$ ) were 0.44 m, 2.59 s and  $107^\circ$  for the model and 0.41 m, 3.03 s and  $121^\circ$  for the waverider buoy measurements, respectively. The SI value was close to 30%, indicating confidence in the numerical simulation. The results indicated an associated mean error (RMSE) of 0.15 m for  $H_s$ , 0.76 s for  $T_p$  and  $27.40^\circ$  for  $D_p$ , as observed in Table 1. This fact contributed to increased confidence in the data set and decreased error associated with the process.

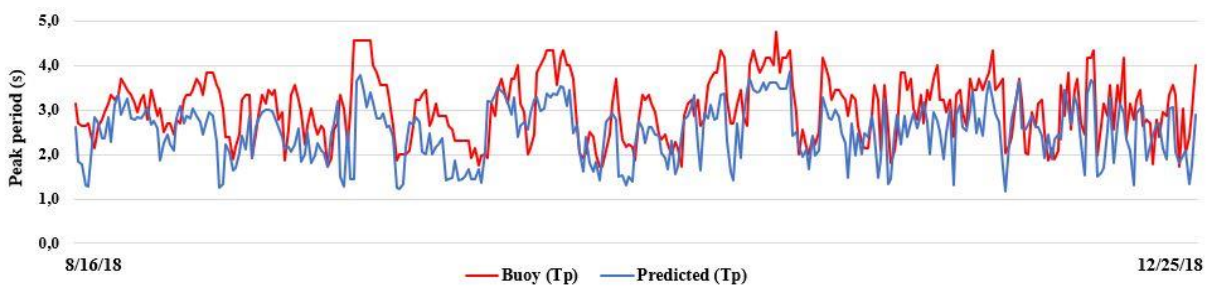
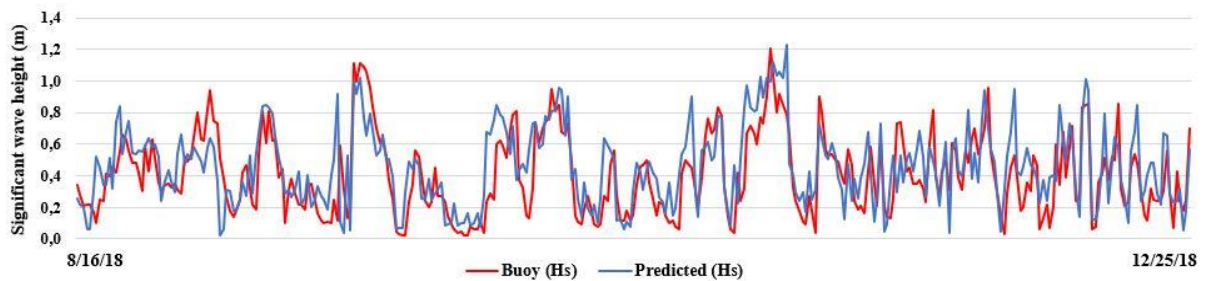


Table 1. Results of statistical analysis for the coefficient of friction of 0.030.

Parameters	Hs(m)	Tp(s)	Dp(°)
Model mean ( $\bar{m}$ )	0.44	2.59	107.00
Buoy mean ( $\bar{o}$ )	0.41	3.03	121.00
V	0.03	- 0.44	-14.00
RMSE	0.15	0.76	27.40
SI	0.28	0.25	0.30
SS	1.09	0.84	0.99

Table 2. Results of statistical analysis for the coefficient of friction 0.015.

Parameters	Hs(m)	Tp(s)	Dp(°)
Model mean ( $\bar{m}$ )	0.48	2.38	98.40
Buoy mean ( $\bar{o}$ )	0.41	3.03	121.00
V	0.07	- 0.65	-22.60
RMSE	0.22	0.82	45.25
SI	0.56	0.28	0.47
SS	1.16	0.79	0.98



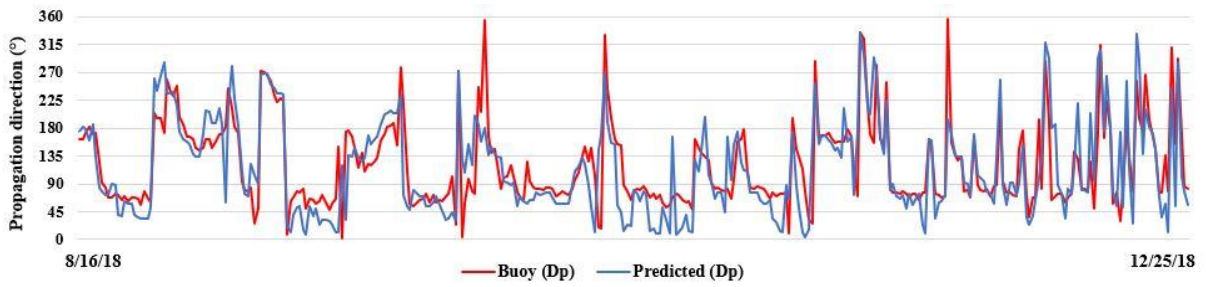


Figure 5: Measured time series (buoy) (red) and modeled time series (blue). a) Significant wave height. b) Peak period. c) Propagation direction.

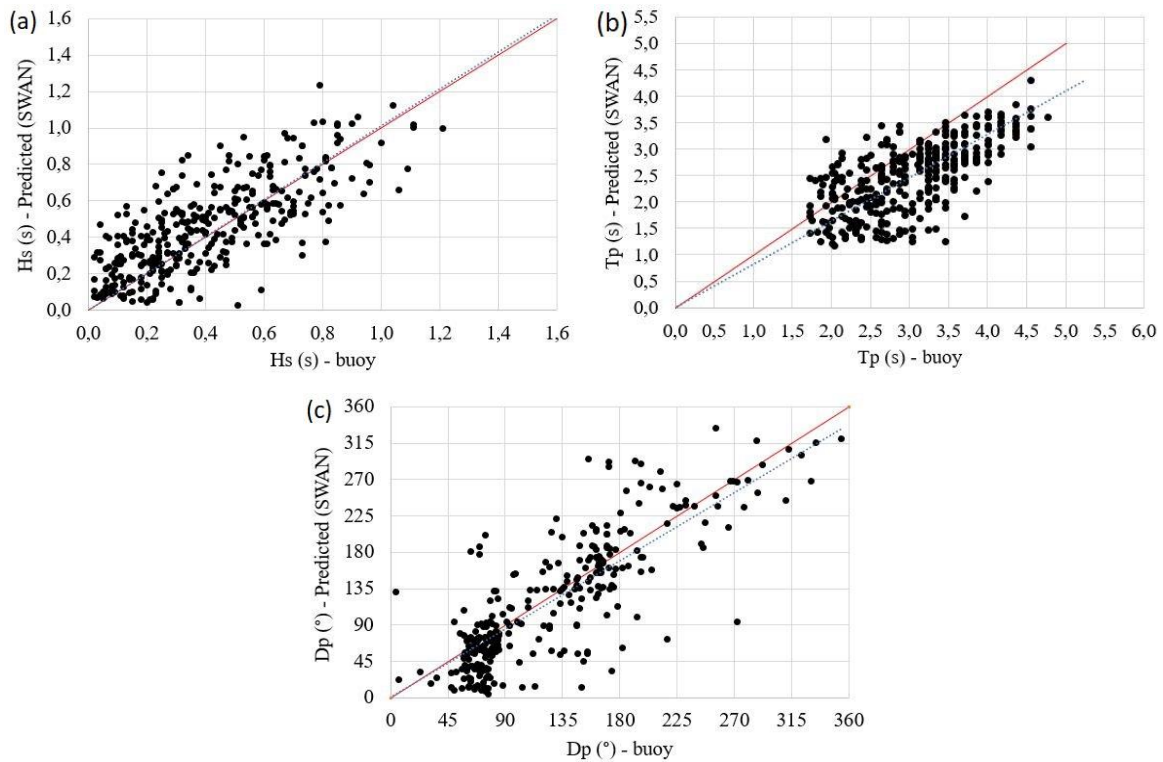


Figure 6. Scatter plots for significant wave height (a), peak period (b), and propagation direction (c). Blue line: Symmetric slope (SS). Red line: Drawn at 45° for reference.

With the calibrated and validated model, according to the results of the statistical calculations presented in Table 1, a numerical simulation was performed for the northern sector of Patos Lagoon.

#### Wave modeling in the northern sector of Patos Lagoon

According to data from ECMWF and after wind magnitude and direction calculations were performed, the annual average wind intensity of  $3.8 \text{ m s}^{-1}$  was determined. Two peaks of higher wind intensity (above  $10 \text{ m s}^{-1}$ ) are observed, reaching their maximum value of  $10.2 \text{ m s}^{-1}$  from the WNW direction on August 8<sup>th</sup>, 2018, and  $10.1 \text{ m s}^{-1}$  in the SSW direction on November 24<sup>th</sup>, 2018.

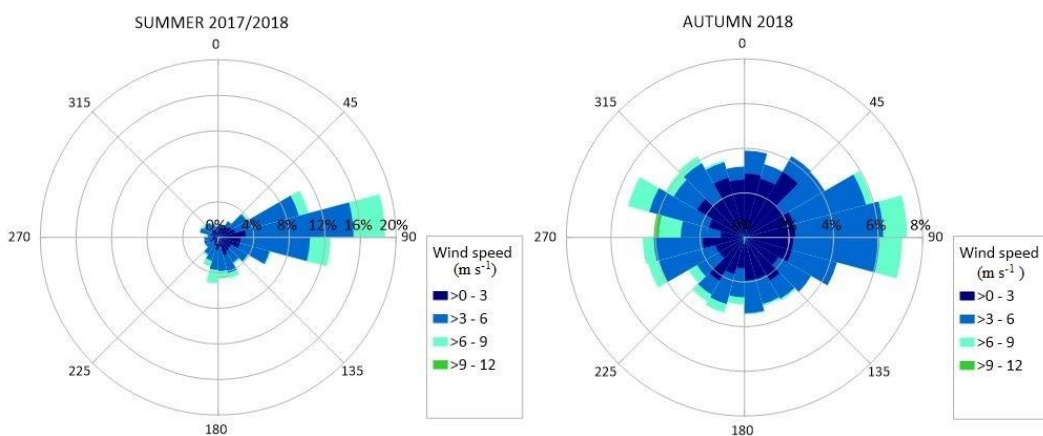
Although these two events recorded magnitudes well above the annual average, they were short events.

Regarding the frequency distribution according to wind intensity classes, winds between 3-6  $\text{m s}^{-1}$  were the most frequent, with 54.17 %, followed by winds between 0-3  $\text{m s}^{-1}$  with 28.75 %, winds between 6-9  $\text{m s}^{-1}$  with 16.53 %, and winds between 9-12  $\text{m s}^{-1}$  with only 0.56 %. The highest occurrences are associated with winds with velocities of 3-6  $\text{m s}^{-1}$  in the E direction with 10 %, ENE with 9.68 %, S with 5.97 %, ESE with 5.65 % and, SSE with 5.32 % of the total.

In Nicolodi *et al.* (2011), when analyzing the wind data at Salgado Filho airport in Porto Alegre, SE and E winds were found to be the most frequent, with 29 % and 22 %, respectively. In the present work, E winds with 30.08 % of the records, S winds with 13.8 %, and SE winds with 12.14 % were observed. This small difference in patterns can be explained by the distance between the analyzed points and data acquisition because, in those authors' work, the data came from the Aeronautics Command Meteorology Network from 1996 whereas, in the present study, the data come from reanalysis data.

Regarding the seasons, the average wind speed in summer was 3.9  $\text{m s}^{-1}$ , autumn 3.3  $\text{m s}^{-1}$ , winter 3.9  $\text{m s}^{-1}$ , and spring 4.2  $\text{m s}^{-1}$ . From this information, it can be noted that summer, winter, and spring presented average wind intensity values above the annual average. Regarding the frequency of occurrence of each wind class, when compared with the annual frequency distribution, the only autumn did not show the same pattern of a high occurrence of winds from 3-6  $\text{m s}^{-1}$ . For this season, the highest occurrence was from 0-3  $\text{m s}^{-1}$ .

According to wind direction, all seasons of the year recorded E direction as the most frequent, with summer registering 25.5 %, autumn 11 %, winter 14.8 %, and spring 17 %. The wind roses for the seasons are shown in Figure 7.



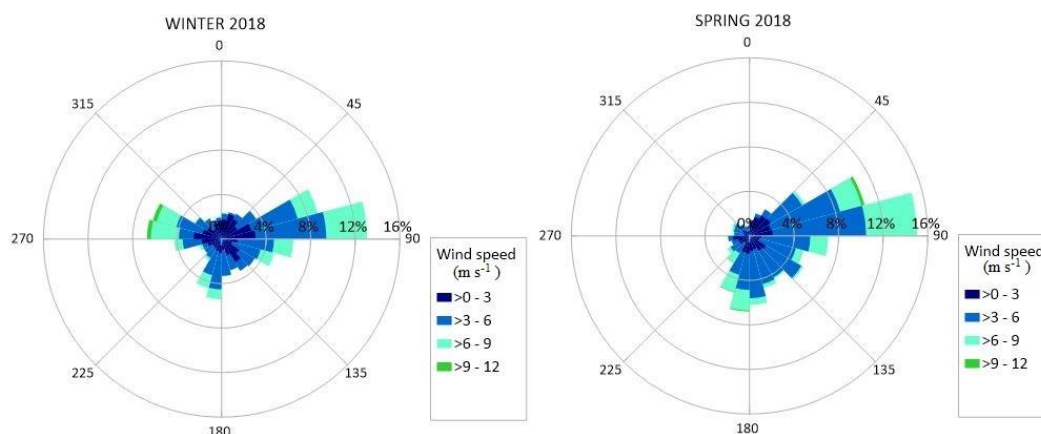


Figure 7: Wind speed and direction for seasons of the year, between the time period of December 21<sup>st</sup>, 2017, and December 21<sup>st</sup>, 2018.

Through the generation and propagation of waves in the study area of the present study, simulated in SWAN from the time series of wind intensity and direction data acquired with the ECMWF reanalysis model, which were discussed in the previous section, we obtained the wave parameters for five points set out in section 2. Below are the results and discussion of the wave parameters according to the four seasons of the year.

### Summer

Toldo *et al.* (2006) acquired significant height and peak period values for specific points in Patos Lagoon in different seasons of the year. At the point nearest to the study region, these values were approximately 0.4 m and 2.3 s, respectively, in summer. With the modeling performed in the present study, significant height and peak period values for the five points in summer can be observed in Table 3, as well as the mean between the points. The highest value modeled for the points occurred on February 11<sup>th</sup>, 2018, at 17h, with the following values: 0.77 m and 2.9 s for point 1; 0.91 m and 3.3 s for point 2; 0.87 m and 3.2 s for point 3; 0.92 m and 3.3 s for point 4 and 0.91 m and 3.3 s for point 5. On that same day, the maximum value of wind intensity was  $9.4 \text{ m s}^{-1}$  at 16h. According to Nicolodi *et al.* (2011), the waves follow the patterns of intensity and direction of winds, reaching maximum values approximately 1 and 2h after the peak velocities.

Concerning the direction of wave propagation, for points 1 and 2, the highest frequency is associated with ESE waves, followed by E waves and S waves. For points 3 and 4, the most frequent waves are from the E, followed by ESE and S. Nevertheless, for point 5, the most frequent waves are from the E, followed by ENE and ESE. Additionally, it was observed that as the local depth increases, the frequency of lower heights and shorter periods decreases, increasing the frequency of larger waves.

Table 3. Depths of points with their significant heights (Hs) and peak periods (Tp) during the 2017/18 austral summer.

Points	Depth (m)	Hs (m)	Tp (s)
1	3.7	0.35	2.1
2	5.0	0.40	2.2
3	5.7	0.40	2.2
4	7.0	0.43	2.3
5	7.5	0.45	2.4
Mean	5.8	0.40	2.2

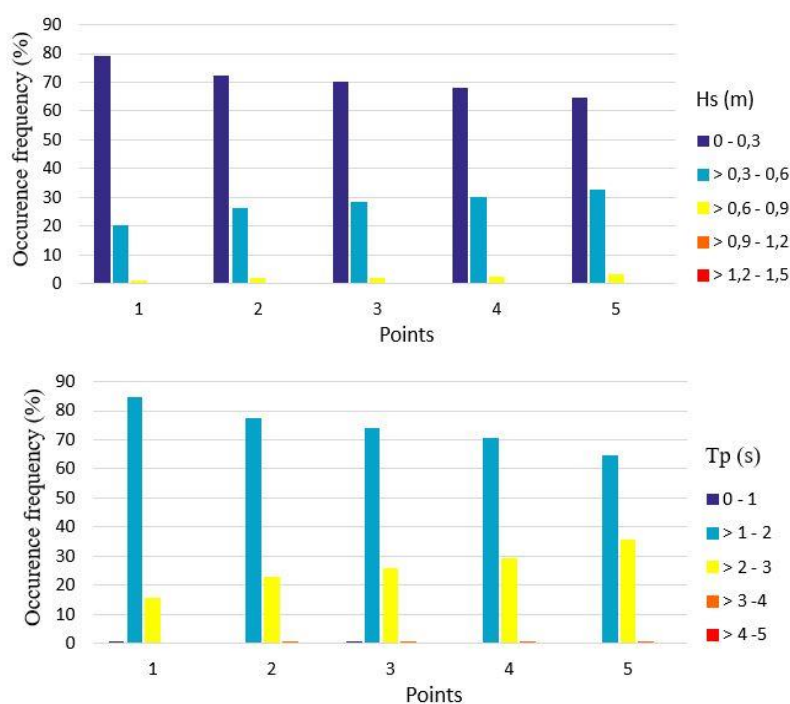


Figure 8: Significant wave height (Hs) and peak period (Tp) occurrence frequency for the 2017/18 austral summer.

### Autumn

The significant height and peak period modeling values, as well as the average between the five modeled points, for this season can be seen in Table 4. For this season, Toldo *et al.* (2006) obtained significant height and peak period values of 0.5 m and 2.7 s, respectively. The highest waves found in autumn were 0.61 m and 2.6 s for point 1, 0.78 m and 3.0 s for point 2, 0.83 m and 3.2 s for point 3, 0.75 m and 2.9 s for point 4 and 0.87 m and 3.2 s for point 5. All these records took place on May 19<sup>th</sup>, 2018, at 18 h. On that same day, the wind had a progressive increase in

intensity, reaching its peak at 17 h with an intensity of  $9 \text{ m s}^{-1}$ , representing a value well above the average for this time of the year and reflected by the observed wave peaks.

Regarding the direction of propagation, for point 1, the highest frequencies are associated with ESE waves, followed by SE and SSE waves. For point 2, the highest frequency is in the ESE direction, followed by the E and WSW directions. At point 3, waves are more frequent in the E direction, followed by the ESE and SSW directions. In point 4, the waves more frequently come from the E, ESE and SSW. Finally, at point 5, the most frequent waves also come from the E, followed by the ENE and ESE.

Table 4. Depths of points with their significant heights (Hs) and peak periods (Tp) for the 2018 austral autumn.

Points	Depth (m)	Hs (m)	Tp (s)
1	3.7	0.32	2.0
2	5.0	0.36	2.1
3	5.7	0.38	2.2
4	7.0	0.38	2.2
5	7.5	0.41	2.3
Mean	5.8	0.37	2.2

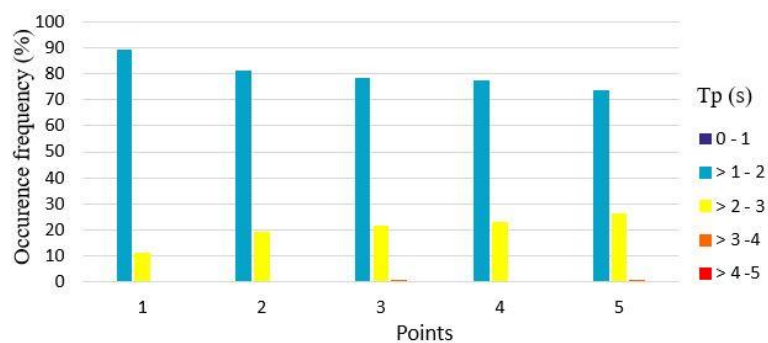
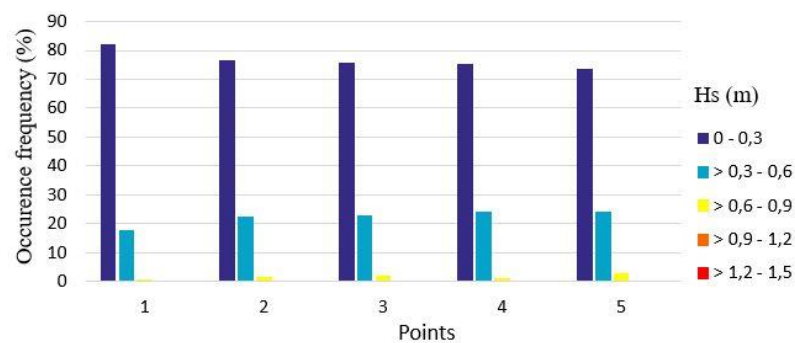


Figure 9: Significant wave height (Hs) and peak period (Tp) occurrence frequency for the 2018 austral autumn.

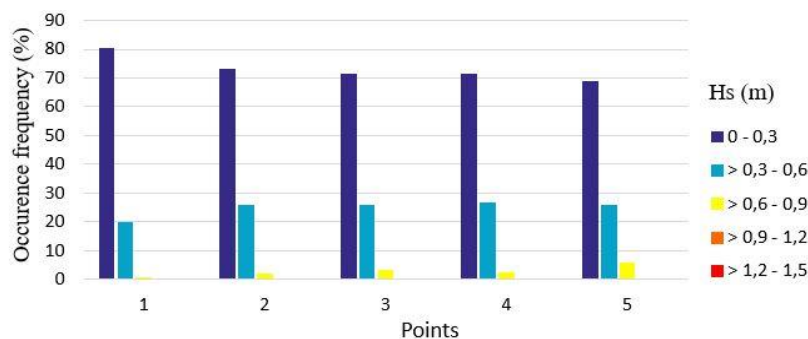
Winter

For the winter period, the largest waves identified for each modeled point were as follows: 0.67 m and 2.7 s for point 1; 0.81 m and 3.1 s for point 2; 0.83 m and 3.2 s for point 3; 0.80 m and 3.1 s for point 4 and 0.90 m and 3.2 s for point 5. These highest waves were recorded on August 19<sup>th</sup>, 2018, at 18h for points 1, 2, 3 and 4, where the winds reached 8.5 m s<sup>-1</sup> at 17h of the same day. For point 5, the highest wave recorded was on August 9<sup>th</sup>, 2018, at 17h, with winds reaching 10.2 m s<sup>-1</sup> at 16h on the same day, which were the highest wind intensities for the winter. For this same season, Toldo *et al.* (2006) obtained a significant height value of 0.5 m and a peak period of 2.8 s. The average wave parameters analyzed can be seen in Table 5.

Regarding the direction of wave propagation, for point 1, the highest wave frequencies are associated with E waves, followed by SE, ESE, and WNW waves. For point 2, the highest frequency was E, followed by ESE and W. This same pattern was verified for points 3 and 4. Finally, for point 5, the highest frequency is for waves from the ENE, followed by the E and W.

Table 5. Depths of points with their significant heights (Hs) and peak periods (Tp) for the 2018 austral winter.

Points	Depth (m)	Hs (m)	Tp (s)
1	3.7	0.34	2.0
2	5.0	0.40	2.2
3	5.7	0.42	2.3
4	7.0	0.42	2.3
5	7.5	0.47	2.4
Mean	5.8	0.41	2.2



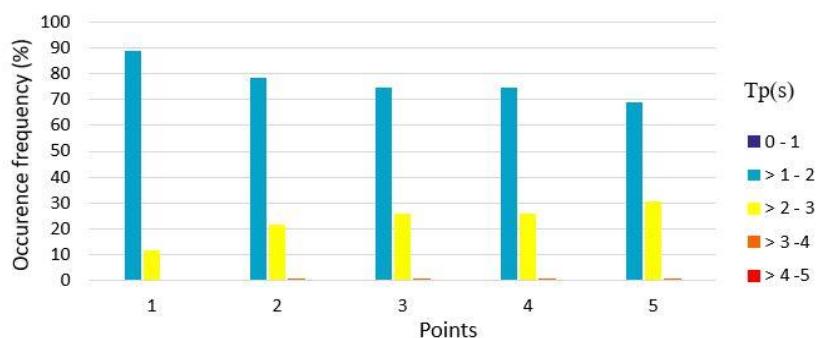


Figure 10: Significant wave height (Hs) and peak period (Tp) occurrence frequency for the 2018 austral winter.

### Spring

During this season, the highest significant heights and peak periods modeled for the five points were 0.76 m and 2.9 s at point 1, 0.94 m and 3.3 s at point 2, 0.96 m and 3.4 s at point 3, 0.93 m and 3.3 s at point 4 and 1.0 m and 3.4 s at point 5. All these records were observed on November 24, 2018, at 5 pm. On that same day, at 4 pm, the highest wind intensity for these stations was recorded, with winds approximately  $10.1 \text{ m s}^{-1}$  blowing from the SSW direction. For spring, Toldo *et al.* (2006) obtained a significant height value of 0.50 m and a peak period of 2.8 s. The significant height and peak period values for the 5 points analyzed are shown in Table 6, as are the mean between them.

Regarding the direction of wave propagation, for point 1, the highest frequencies are associated with waves from the S, followed by the ESE and SSE. In point 2, the highest frequencies are E, ESE and S waves. For point 3, the highest frequencies of waves are from the E, S and ESE. The same pattern found in point 2 is also observed at point 4. Finally, at point 5, the highest frequency is associated with the E direction, followed by the ENE and S directions.

Table 6. Depths of points with their significant heights (Hs) and peak periods (Tp) for the 2018 austral spring.

Points	Depth (m)	Mean Hs (m)	Mean Tp (s)
1	3.7	0.40	2.2
2	5.0	0.45	2.3
3	5.7	0.45	2.3
4	7.0	0.48	2.4
5	7.5	0.50	2.5
Mean	5.8	0.46	2.3



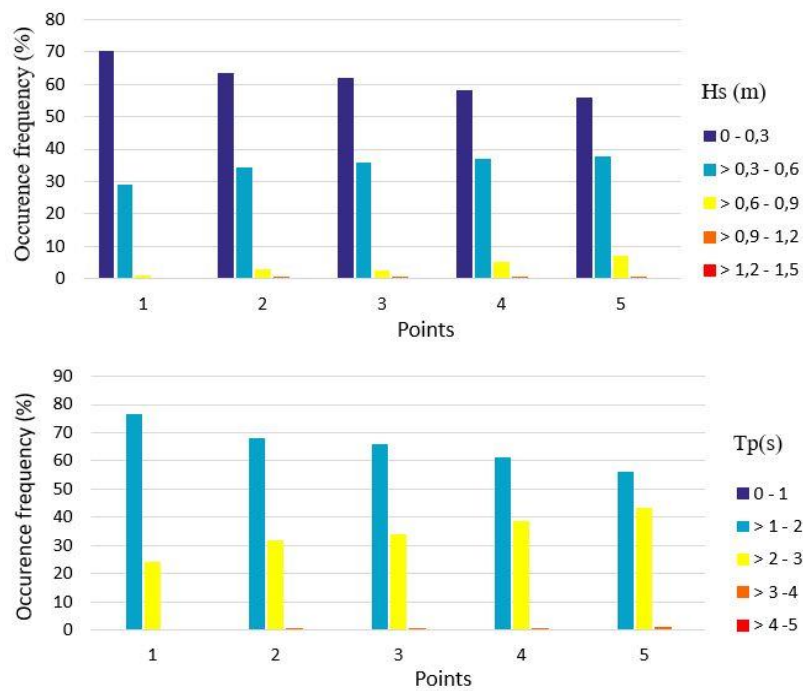


Figure 11: Significant wave height (Hs) and peak period (Tp) occurrence frequency in the 2018 austral spring.

### Wave regime

According to the data presented in this study, the results are very close to those found by Toldo *et al.* (2006), even knowing that the points analyzed are not in the same position and depth. The work cited does not present the local depth of each station used for the prediction of the wave parameters, so these small result discrepancies can be explained by this fact. Moreover, in the study discussed above, the authors did not use waves with heights smaller than 0.10m to calculate the significant height and peak period. Another important factor is the difference in the acquisition of wind data, where the cited reference used measuring stations with anemometers, whereas the present study used reanalysis data. Furthermore, there are also differences in the year chosen for modeling because the work described above used the year 1988 and the present study analyzed 2018. Also, according to the validation statistics of the model used in this work, the peak period is underestimated, and differences found between the two studies can be explained.

There is a direct relationship between the increase in local depth with significant wave height and peak period, a fact found in Lemke (2015) in Patos Lagoon. Nicolodi *et al.* (2011) consider bathymetry to be a fundamental factor for the whole system because it defines wave patterns.

The results showed that waves with heights up to 0.30 m represent 77.9 % of the data at point 1, 71.3 % at point 2, 69.7 % at point 3, 68.2 % at point 4 and 65.7 % at point 5. Such a feature was also identified in the work of Lemke *et al.* (2017), making explicit the increase in larger waves

with increasing depth. Seibt *et al.* (2013), measuring waves on Lake Überlingen at a depth of 2 m, found that 93 % of waves were less than 0.15 m. The characteristics of this lake imply a smaller wind fetch than Patos Lagoon, thus reducing wave height. Nicolodi *et al.* (2013), using the SWAN model on Lake Guaíba, resulted in maximum wave height of 0.55 m under S and SE winds at speeds greater than  $7 \text{ m s}^{-1}$ . This small modeled wave height reflects the shallow bathymetry of the study site, with significant height values up to 0.15 m and peak periods below 3 s. Simão (2016) performed wave modeling near São Lourenço do Sul, in the central part of Patos Lagoon, at a depth of 3 m, based on a 30-year time series of wind intensity and direction data (from 1982 to 2012), and obtained a significant height and peak period of 0.40 m and 2.5 s, respectively. These values are very close to those found in the present study for point 1, whose depth is 3.7 m. Although point 1 is located in a deeper region, it is a more sheltered place from the N and NE winds and is located very close to the coast, having a smaller wind fetch than the study of Simão (2016); this fact may explain the highest significant height and peak period found in the work cited. Also, Lemke *et al.* (2015) modeled waves in the same region of São Lourenço do Sul at a depth of 6 m and found, as a result, a significant height of 0.57 m and a peak period of 3.3 s. The higher values are explained by the greater local depth. In point 3 of the present study, where the depth is 5.7 m,  $H_s$  and  $T_p$  were smaller than those in the other study; this result can be explained by the small wind fetch from the N and NE directions, whereas the wind fetch is approximately 70 km for wind from the S and over 150 km for wind from the SSW.

In general, the significant height ( $H_s$ ) and peak period ( $T_p$ ) values for time series were 0.36 m and 2.1 s for point 1; 0.40 m and 2.2 s for point 2; 0.42 m and 2.3 s for point 3; 0.43 m and 2.3 s for point 4; 0.46 m and 2.4 s for point 5, respectively. Regarding the maximum-modeled height, during the annual time series, the highest values were 1.0 m and 3.4 s in spring at the deepest point. The highest wave heights modeled for this period come from the S and SSW directions. Thus, it is found that the wave regime for this region in 2018 corresponds to conditions of a low-energy environment, where the maximum significant height is on the order of 1m, with peak periods in all cases below 4 s.

Concerning the direction of propagation, for point 1, the ESE waves predominate, followed by the E and S waves. At point 2, the same pattern of the predominance of ESE waves followed by E waves is observed; however, SE waves appear more often than the S waves observed at point 1. At points 3, 4 and 5, the highest predominance is of E waves, followed by ESE waves at points 3 and 4 and ENE waves at point 5. South waves at point 3, ENE waves at point 4 and ESE waves at point 5 are also observed, with lower frequencies.

Observing the variations in the model result between the seasons, little difference in significant wave height ( $H_s$ ), peak period ( $T_p$ ) and direction of propagation ( $D_p$ ) was observed. As

wave generation in the study area is strictly dependent on local wind patterns, the highest average of  $H_s$  and  $T_p$ , among the 5 modeled points, was found in the spring. Such a pattern was already expected given the previous knowledge of the wind patterns for that season. When analyzing the time series of the wind intensity data, the highest value found was  $10.1 \text{ m s}^{-1}$  blowing from the SSW direction. Associated with this value, the highest height of the modeled wave, of 1m from the S direction, was observed. Significant differences between summer and winter were not observed, this fact can be explained by the location of the study region being, in a way, sheltered from the N and NE quadrant winds. Thus, the wave mostly comes from the E quadrant.

## CONCLUSIONS

This article describes the implementation of forced wave prediction by bathymetry and wind in the northern sector of Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. From wave numerical modeling with wind reanalysis data, it was possible to characterize the wave regime of the northern sector of Patos Lagoon for the year 2018. Generally, waves follow the patterns of intensity and direction of prevailing winds, reaching their maximum values between 1 and 2h after peak wind intensity. Thus, the study region was defined as low energy, with significant small-height waves (between 0.36 m and 0.46 m) with high frequencies and short peak periods (between 2.1 s and 2.4 s); the morphology and small mean depth limit the growth of wind-forced waves. The largest observed waves (1.0 m and 3.4 s) from the S and SSW directions are related to winds with intensities of  $10 \text{ m s}^{-1}$  from the S direction. The morphology of the shallow lagoon, the orientation of its main axis, and the wind pattern are largely responsible for these characteristics.

Comparative analyses between the wave parameters measured by the wave buoy and the data obtained through numerical simulation showed good SWAN performance; thus, some factors related to the characteristics defined in the model and the data acquisition mode were crucial for the presented results. Concerning to model calibration, the choice of mean wind intensity data and use of a higher background friction coefficient responded very well to expectations to improve the statistical parameters by bringing the model results and the measured data closer together. The model tended to overestimate wave height and underestimate peak period and wave propagation direction. In the model, the average wave height, mean peak period and mean propagation direction were 0.44 m, 2.59 s, and  $107^\circ$ , respectively, while the buoy data presented values of 0.41 m, 3.03 s, and  $121^\circ$ , respectively. Thus, it could be concluded that the model can be applied in Patos Lagoon, offering meaningful results.

Some experiments can also be performed to improve model validation, such as the use of more refined numerical mesh, which, however, requires greater computational capacity and

modeling time; the acquisition of larger and longer time series for wave parameters to increase the statistical samples; and the use of wind intensity and direction data acquired through automatic stations near the study region to better understand the representativeness of the reanalysis data for Patos Lagoon. In addition, the present study did not include lagoon level variations and Lake Guaíba flow in the experiment, factors that may be considered in further studies.

Numerical models are a powerful tool for wave regime calculation, helping to overcome prediction difficulties due to the random nature of the processes. The present study contributed to the availability of data concerning wave regimes in a specific sector of the lagoon, where there are few works developed for this purpose, collaborating with the research and publishing useful information for navigation and coastal engineering, as well as for studies on lagoon dynamics.

The development of this work generates useful information that can contribute to the management of the Conservation Unit adjacent to the study area, Itapuã State Park, and the Brazil-Uruguay waterway recovery project, an action that has been discussed within the local government and would help to balance the region's transport matrix. In the technical viability study of this proposal, the main navigable stretches studied are Patos Lagoon and Guaíba Lake, which were the object of this article.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors of this paper are grateful to Deltares for the license to use Delt3D software, the Rio Grande Maritime Pilots and European Centre for Medium-Range Weather Forecasts for providing meteorological and reanalysis data, both crucial for the development of the work, and project “*Ondas Network - Shallow Water Wave Monitoring Network*”. This study was funded by the Brazilian Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) through the PhD scholarship to C. Marinho. J. Arigony-Neto acknowledges the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) research grant number 205732/2018-6.

## **Environmental vulnerability to oil spills in Itapuã Stake Park, Rio Grande do Sul, Brazil: an approach using two-dimensional numerical simulation**

Chayonn Marinho<sup>1</sup>, João Luiz Nicolodi<sup>2</sup>, Jorge Arigony Neto<sup>3</sup>

<sup>1</sup>\* Programa de Pós-Graduação em Oceanologia, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande. Av. Itália, Km 8, CEP 96203-900, Rio Grande, RS, Brasil ([chayonn@hotmail.com](mailto:chayonn@hotmail.com)).

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Gerenciamento Costeiro, Instituto de Oceanologia, Universidade Federal do Rio Grande. Av. Itália, Km 8, CEP 96203-900, Rio Grande, RS, Brasil ([joaoluiznicolodi@gmail.com](mailto:joaoluiznicolodi@gmail.com)).

<sup>3</sup> Programa de Pós-Graduação em Oceanologia, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande. Av. Itália, Km 8, CEP 96203-900, Rio Grande, RS, Brasil ([jorgearigony@furg.br](mailto:jorgearigony@furg.br)).

\* Corresponding author.

### **Abstract**

The growing use of coastal areas for different economic purposes is responsible for increasing pollution by hydrocarbons in marine environments. As a consequence of these activities, accidents during fuel extraction, transport, and storage can occur, causing intense environmental degradation. Numerical modeling of the trajectory of oil stains becomes an important tool with low operational costs, providing powerful support to the government agencies in charge of risk management associated with possible oil accidents, by helping to generate scenarios and strategies for containment and cleaning of affected environments. In this sense, the aim of this study is to estimate environmental vulnerability to oil at beaches located in the Itapuã State Park (PEI), a Protection Conservation Unit. For that, an approach was used based on the integration of: (1) an intrinsic variable to the environment (sensitivity); (2) a dynamic variable determined through diesel oil surface dispersion scenarios. Four hypothetical accident scenarios with 20 m<sup>3</sup> of diesel oil were simulated in 2018, during six days of simulations with instant dumping in the navigation channel of the local waterway near the PEI. The results suggest the forcing of the field of intensity and direction of the local winds as preponderant for the dynamics of movement and structure of the spots, with the zonal and meridional components of the fields of superficial currents acting in this process as a secondary factor. The study showed that all beaches in the park are susceptible to contact with oil throughout the simulated year, with Pombas Beach, Pedreira Beach, and Onça Beach being affected in all simulated scenarios, which classifies them as very high vulnerability and defines them as priority protection areas.

**Keywords.** Oil spill; numerical simulations of oil dispersion; environmental vulnerability.

## 1. Introduction

Oil spills have been a serious problem that can cause adverse effects on marine ecosystems and are considered the most critical form of marine pollution, with a high incidence of risks to coastal ecosystems in many regions of the planet (Singkran, 2013). Furthermore, there is great difficulty in handling accidents occurring outside the continental shelf due to the distance from the coast, where trained professionals, structures, and equipment necessary for contingency actions are located (Alves *et al.*, 2015). Moreover, the great influence of climatic variables and oceanographic conditions on the movement of oil spills, biodegradation of the spilled oil, and the crucial effects of these meteoceanographic variables have already been confirmed in data from the Gulf of Mexico, the Baltic Sea, and the Western Mediterranean Sea (Cucco *et al.*, 2012; Soomere *et al.*, 2014; Prince, 2015). Statistical analyses of oil spill trajectory in these locations allowed the identification of areas where the impact of the spilled oil would be more significant, pointing to a non-predictability of the spill movement in extreme climatic conditions (Griffa *et al.*, 2004; Ciappa and Costabile, 2014). In addition, a case study carried out in the Baltic Sea revealed the release of oil from shipwrecks, mapping the risk from a shipwreck near Sweden. This study has developed a model that can be used to assess the risk of oil spills in the marine environment worldwide (Amir-Heidari *et al.*, 2019).

A study by Alves *et al.* (2015) presented the result of 104 scenarios for simulating a hypothetical spill in 11 different locations on the coast of Cyprus, Egypt, Israel, Lebanon, Syria, and Turkey. The main goal of this work was to understand the movement of the oil spill and its spread in regions outside the continental shelf, where exploratory activity and drilling are widely carried out. The article answered three main questions: how quickly will the spilled oil reach the Mediterranean Sea coast under pre-established oceanographic and meteorological conditions? In which direction will the spilled oil be dispersed before reaching the coast and how long will it remain at sea? What would be the best mitigation technique to prevent large amounts of oil from reaching the shore? The authors concluded that the oil spill would spread and reach the coast of Cyprus in a period of 4 and 7 days for summer conditions and 8 to 14 days in winter, impacting the study region in up to 20 days if the containment measures are not effective. Regarding the trajectory of the spill, it was concluded that it is mainly controlled by wind and currents, which would justify the use of chemical dispersants a few hours after a large accident.

Furthermore, Alves *et al.* (2015) pointed to the variation in coastal susceptibility as a function of morphology and the degree of exposure to hydrodynamic forcing. The presence of tourism and environmentally sensitive areas suggests great attention and effort in the damage

mitigation process, taking into account the high susceptibility to contact with oil from the Mediterranean Sea coast.

Similar to other parts of the world, many countries located in the East Asian seas are highly concerned about the problems caused by accidents involving oil and its derivatives. In Thailand, for example, spills were observed along the main shipping routes and in the vicinity of major rivers mouths in Bangkok's bay (Ivanov and Zatyagalova, 2008). As a result, the Thai government established a National Committee for the Prevention and Elimination of Oil (NOPEC), which included several government agencies. Despite the government's efforts, the management and mitigation of oil accidents are still insufficient due to a number of reasons: the lack of information in vulnerable areas concerning resources and the magnitude of the risks, for accurate prediction of the spill impacts; the lack of integration of biological variables in the development of environmental sensitivity indices in the region, which only emphasizes physical resources; and the lack of adequate collaboration between NOPEC and private sector entities, and local communities, to prevent and monitor oil spills (Singkran, 2013).

Officially identified on August 30, 2019 in Brazil, an oil spill reached 4,334 km of the coastline in the northeastern and southeastern states of the country, being considered the largest crude oil spill in the history of Brazil and one of the most extensive recorded in the world (Pena *et al.*, 2020). The spill was thought to have originated from a ship in transit along the Brazilian coast. This accident of enormous geographical extension generated serious environmental and social damages, impacting the subsistence conditions of countless population groups that depend on fishing and tourism in these regions. The analysis of this disaster indicated, among other factors, a risk to public health, with cases of signs/symptoms of acute intoxication due to exposure to oil (Carmo and Teixeira, 2020).

In this context, numerous studies have focused on analyzing areas vulnerable to oil spills and their impacts on marine pollution. Operational tools have also been widely developed to classify coastlines in the context of managing these accidents. Among these tools, the coastal and offshore sensitivity and vulnerability maps in many countries can be highlighted (Danchuk and Willson, 2010; Fattal *et al.*, 2010; Ihaksi *et al.*, 2011; Romero *et al.*, 2013; Marinho and Nicolodi, 2019; Monteiro *et al.*, 2020).

Regarding vulnerability to oil contact in Brazil, an official methodology for determination and mapping is not yet established. However, some works have been developed with different approaches and methodologies to advance and develop tools that can be useful in the coastal management process and contingency plans.

Romero *et al.* (2013) developed indices of environmental vulnerability to oil through the combination of information on the sensitivity of the region and numerical modeling of spilled oil, in

the SIMAP model, in the Santos Basin. Recently, Monteiro *et al.* (2020) estimated the vulnerability to oil in environmentally sensitive areas in Southern Brazil by integrating the data related to probability of oil reaching the coast, the concentration of the oil layer on the surface, and properties intrinsic to the environment where the hypothetical simulation was performed. Studies have shown that circulation patterns have a strong influence on the probability of oil coverage, and consequently, on the vulnerability of the studied regions.

Within a context of environmental vulnerability to contact with oil, attention is paid to the definition of the concepts that comprise it. According to Adger (2006), the definitions of vulnerability usually link this concept to one or more of the following factors: exposure, sensitivity, and adaptive or responsive capacity of the system. The study of these factors allows the assessment of a greater or lesser vulnerability of a system to certain environmental issues. For the present work, the concept of exposure is related to the chance/probability of an oil spill reaching the coast, while the concept of sensitivity is intrinsic to the environment, being described by its geomorphological and biological characteristics. The definition of sensitivity proposed by Buckley (1982) is the measure that expresses the ease with which an environment is affected when it receives some intervention, being the environment's response to given stress and its severity. These classifications by Adger (2000) and Buckley (1982) were adopted conceptually in the present work.

In this context, this article addresses this issue by estimating the environmental vulnerability to contact with oil in the region of Itapuã State Park, Rio Grande do Sul, Brazil. This adopted approach for that starts from understanding the behavior of oil based on the development of a specific methodology for determining local vulnerability under two distinct fronts: (1) intrinsic characteristics determined by geomorphological and biological factors in the study region, associated with levels of sensitivity and (2) modeling of the surface dispersion of the oil, and probability of oil reaching the coast. This procedure represented the susceptibility of the analyzed areas.

The relevance of this study starts from the premise that the work area represents a protection conservation unit and is located very close to the navigation channel of the local waterway, where the high flow of vessels and the low hydrodynamics can be crucial factors and determinants in the event of an accident involving oil and its derivatives. The analysis is based on the understanding of the oil spill's displacement pattern guided by the hydrodynamic variables of the region, and the determination of which factors would be preponderant in this process. Thus, this work presented the result of the simulation of a hypothetical diesel oil spill established in four different scenarios throughout 2018. The choice of the type of oil to be spilled is based on the premise that the study region does not transport crude oil for refining, being, until now, shielded from possible contamination with this type of oil.



## 2. Materials and methods

For the development of this work, the terms sensitivity, susceptibility, and vulnerability were established and defined according to the proposed objective, which can be observed below.

- Sensitivity: Measure that expresses how easily an environment is affected when it receives some intervention. It is the environment's response to a given stress and its severity.
- Susceptibility: Probability of a given environment to be impacted. It deals only with the physical conditions of the environment. Performed through oil dispersion scenarios.
- Vulnerability: Combination of sensitivity (intrinsic) with susceptibility (chance of occurrence).

Once these concepts were established, three distinct methodological steps were used to achieve the objectives of this research: determination of environmental sensitivity to contact with oil (step 1); determination of its susceptibility through the hypothetical dispersion of a plume of spilled oil, identifying the possible contaminated areas (step 2); and determination of environmental vulnerability (step 3). Figure 1 shows the methodological steps as well as the necessary input data for its developments. The proposed model will be duly detailed in the items that follow, with a meticulous description of the entire methodology and steps used.

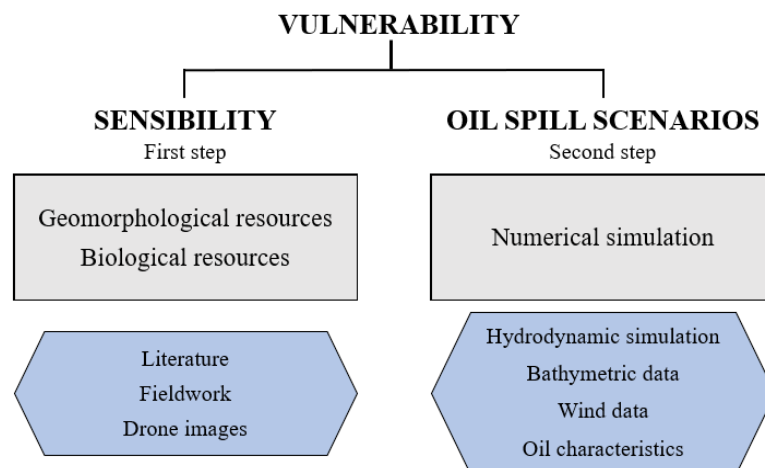


Figure 1. Methodological steps of the present work.

## 2.1 Study area

The Itapuã State Park is located at the meeting point of the waters of Lake Guaíba with the northern sector of Patos Lagoon (Figure 2). The Patos Lagoon is located between 30 ° and 32 ° south latitude, in the state of Rio Grande do Sul, being the largest lagoon in Brazil. Despite its great extension, it is a shallow water body, with an average depth of 6 meters (Toldo *et al.*, 2006). The orientation of its longitudinal axis is NE-SW, aligned with the predominant direction of the region's winds, this fact corroborates the importance of the wind effects as a force on its circulation. The relative importance of the wind as a force for circulation increases as the tidal amplitude decreases (Smith, 1978; Lee *et al.*, 1990; Millet *et al.*, 1991; Wong, 1991; Lu and Wong, 1994), a typical effect of lagoons that are connected only to the ocean (Kjerfve, 1986, Kjerfve and Magill, 1989).

The choice of this region for the present study comes from its location very close to the navigation channel of Patos Lagoon waterway, which has 258 kilometers of navigable channel, and the Guaíba waterway, whose navigable channel is 56 kilometers. Associated with this characteristic, its ecological relevance stands out, since this area constitutes the last sample of the original ecosystems of the metropolitan region of Porto Alegre, constituting a protection conservation unit (Nicolodi and Toldo, 2003). The Patos Lagoon - Guaíba waterway currently has a high traffic of commercial vessels that travel through its waters, mainly transporting fertilizers, fuels, mineral oils, chemicals, grains, cellulose, and mineral coal (SUPRG, 2020).

With the above, the region of the Itapuã State Park and its adjacent areas become vulnerable to contact with oil and its derivatives in the event of an accident involving the ships that use this channel for navigation. Furthermore, this is the location of the navigation channel on the Guaíba - Patos Lagoon waterway, making it mandatory for ships to pass through this region. Such characteristics bring the need for greater attention to the risks of accidents, preparation for possible containment and cleaning operations, and studies consistent with the theme in question, since there are no works with this focus.

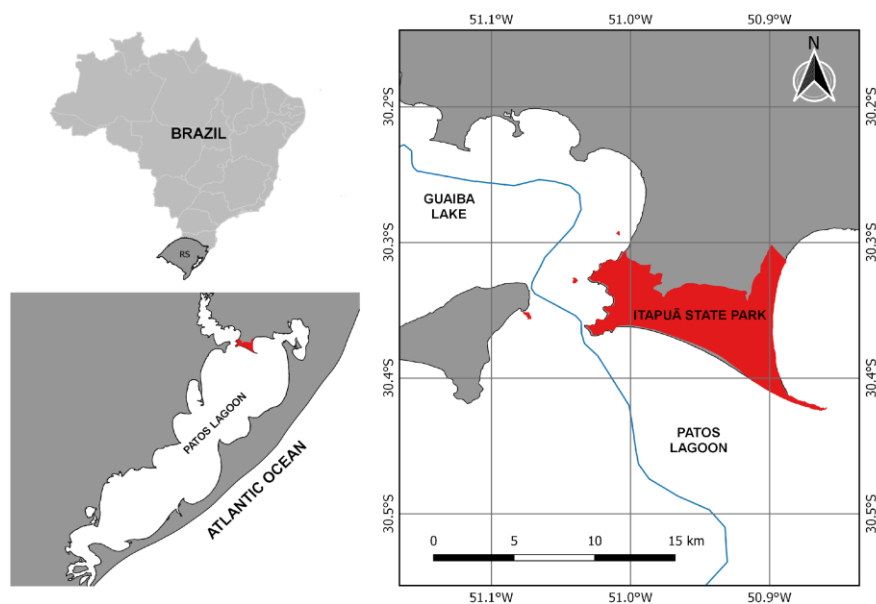


Figure 2. Study area of the present work. Highlighted in red is the area of Itapuã State Park and the blue continuous line is the navigation channel of the local waterway.

## 2.2 Sensitivity to oil (Step 1)

Sensitivity was defined using the method proposed by Marinho and Nicolodi (2019). This method classified the different coastline contours integrating geomorphological and biological data that were gathered in the Geomorphological Sensitivity Index (IG) and Biological Sensitivity Index (IB), respectively. This methodology classifies the different coast contours according to the system's intrinsic characteristics on an increasing sensitivity scale, which varies from 0 to 20.

For the classification of the IG, the authors used the variables "type of substrate", "exposure to hydrodynamic forcing" and "slope of the coast". Specifically for this last variable, a field methodology was developed in the present study with the use of images acquired by drones. The use of this tool was responsible for qualifying the data acquisition process, which improved their resolution and reduced the field work required.

In the method proposed by Marinho and Nicolodi (2019), the variable "slope of the coast" is determined using a point method, where only a fixed point is determined for its measurement, which does not allow the coverage of the entire length of the beach. As a way to qualify the process of obtaining slope data, the drone imaging procedure was adopted. To test and compare the results between these two methodologies, a flyover to capture images was carried out on three beaches, with the average slope of the beach face determined using the ArcGis slope tool. For this procedure, it was necessary to construct orthomosaics, which can be seen in Figure 4.

Regarding biological classification, the authors used the variables "species sensitive to oil contact", "species that have conservation value", "species dependent on the coast" and "species

with predicted location”. Also, critically endangered species, endangered species, and endemic species are included in the index, because, due to their peculiarities, a single oil spill can have a devastating effect on the entire community.

### 2.2.1 Drone imaging

The fieldwork took place on August 21 and 22, 2018. For access to be allowed and the research carried out, some protocols were carried out with the Division of Conservation Units of the Rio Grande State Secretariat for the Environment and Sustainable Development. Additionally, the research authorization was issued under registration number 613 and valid for one year.

Three flights were carried out over the beaches of the Itapuã State Park (PEI): Pombas Beach, Pedreira Beach, and Onça Beach (Figure 3). The methodology employed allows the planning and construction of flight plans before the fieldwork by the DroneDeploy platform. Through the processing and post-processing of the images in the PhotoScan software and the use of geoprocessing tools, the beach face slopes of the PEI beaches were determined, in addition to the measurements of their widths and extensions. Due to meteorological issues, it was not possible to fly on two other beaches in the park.

### 2.3 Oil spill scenarios (Step 2)

To determine the surface dispersion of the oil, and consequently, the probability of touching the shore, numerical simulations were performed using the Delft3D-Part software for a hypothetical diesel oil spill at a specific point in the navigation channel in the study region.

The physico-chemical characteristics of the oils used in the simulations are: (1) 20m<sup>3</sup> oil spill volume; (2) 896kg/m<sup>3</sup> oil density; (3) 11mm<sup>2</sup>/m Kinematic viscosity and (4) 0.30 maximum water content. The adjusted parameters for the surface oil dispersion model are: (1) one hour wind data resolution; (2) time step 20 min; (3) 0.05 evaporation per day; (4) five days of simulation; (5) 0.0003m minimum thickness and (6)  $2 \cdot 10^{-6}$  emulsification parameter.

For the simulations to be carried out, the model provides input data for a modeled hydrodynamic base, which was developed by Marinho *et al.* (2020). In this study, the authors calibrated and validated a wave and current model induced by waves for the northern sector of Patos Lagoon.

As the local characteristics of the study region present low values of surface current intensity, the surface current induced by waves and winds was used. According to Nicolodi *et al.* (2010), in Lake Guaíba the currents have an average speed of 0.1 m/s, reaching maximum speeds of 0.15 m/s. Furthermore, Nicolodi *et al.* (2013) point out the surface currents induced by waves from

the E and SE quadrant and currents induced by the wind as the main forces in the resuspension of sediments.

Other authors such as Bhowmik and Stall (1978) and Burrows and Hedges (1985) also demonstrated that horizontal currents in shallow lakes would influence wave height only at speeds above 0.5 m/s. Thus, based on the literature and the modeled values of currents induced by waves and winds, it was possible to neglect the effect of horizontal currents on the influence of waves for the study region.

Starting from a local hydrodynamic base established and validated for the region, the scenarios of superficial dispersion of a hypothetical spill in the navigation channel in front of the Itapuã State Park were generated. For this simulation, four extreme scenarios of significant wave height were identified over the hydrodynamic time series modeled for the year 2018.

The four scenarios with extreme values of significant wave height ( $H_s$ ) and, consequently, higher values of intensity of winds and currents induced by waves were identified in the months of February, May, August, and November 2018. For the analysis of the oil dispersion time series, nine control points throughout the study region were established (Figure 3). As a criterion, three images were also used at different times of the location and structure of the spill for each established situation, they are: 1 hour after release; the exact day and time of the maximum wave height for the period; and in the last hour of the simulation.

The scenarios determined to analyze the behavior and structure of the diesel oil slick can be observed below:

February – (1) one hour after release: 09-Feb-18 01:00; (2) extreme waves: 11-Feb-18 17:00 and (3) last day of simulations: 14-Feb-18 00:00.

May- (1) one hour after release: 17-May-18 01:00; (2) extreme waves: 19-May-18 18:00 and (3) last day of simulations: 22-May-18 00:00.

August - (1) one hour after release: 17-Aug-18 01:00; (2) extreme waves: 19-Aug-18 18:00 and (3) last day of simulations: 22-Aug-18 00:00.

November - (1) one hour after release: 22-Nov-18 01:00; (2) extreme waves: 24-Nov-18 16:00 and (3) last day of simulations: 27-Nov-18 00:00.

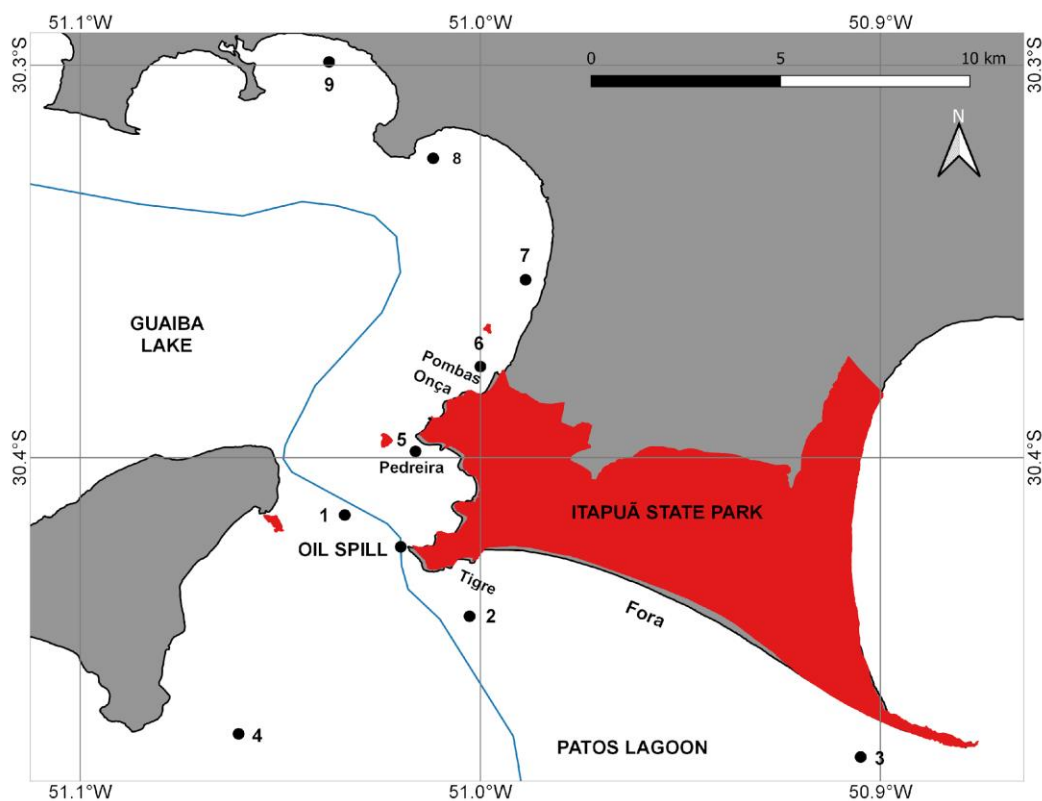


Figure 3. Location of the instantaneous release of 20m<sup>3</sup> of diesel oil and observation points of the time series.

#### 2.4 Vulnerability classification

After defining the environmental sensitivity to oil of Itapuã State Park's beaches, according to the methodology described in item 2.2, four levels of sensitivity could be established according to their indexes, they are:

- Low sensitivity: IISL values between 1 and 5;
- Moderate sensitivity: IISL values between 6 and 10;
- High sensitivity: IISL values between 11 and 15;
- Very high sensitivity: IISL values between 16 and 20.

The five beaches of the Itapuã State Park were classified within these four levels of sensitivity proposed and, together with the analysis of the oil dispersion scenarios over the days stipulated, it was possible to determine whether or not the beaches suffer impact from the oil spill in different hydrodynamic conditions and local wind patterns. The beaches identified with pollutant fractions are considered susceptible to diesel oil, regardless of the concentration of the pollutant on the surface and the simulation time required for such contact. The susceptibility levels are

determined by covering the oil spill on the beaches within the entire simulation period as described below:

- Low susceptibility: beaches reached in up to 25% of the simulated scenarios, or just one of the simulated months;
- Moderate susceptibility: beaches reached in up to 50% of the simulated scenarios or up to two of the simulated months;
- High susceptibility: beaches reached in up to 75% of the simulated scenarios or up to three of the simulated months;
- Very high susceptibility: beaches reached in 100% of the simulated scenarios or the four simulated months.

### 3. Results and discussions

#### 3.1 Oil sensitivity

Five beaches in the State Park of Itapuã, Pombas Beach, Pedreira Beach, Onça Beach, Tigre Beach, and Fora Beach were classified according to their environmental sensitivity to contact with oil through the methodology proposed and adapted by Marinho and Nicolodi (2019).

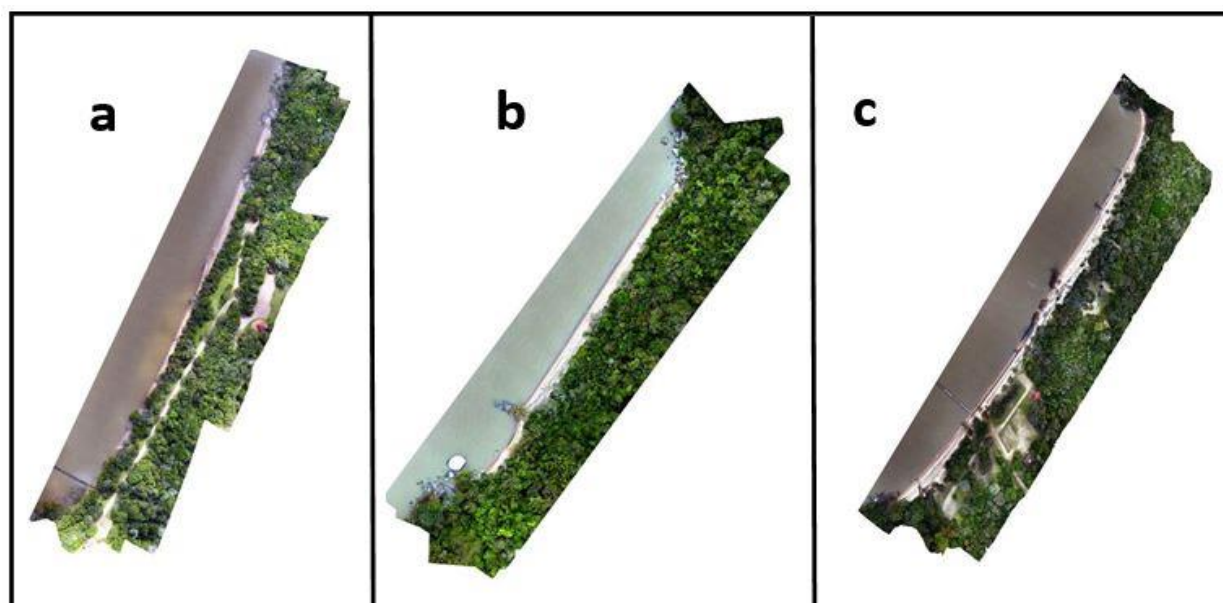


Figure 4: Orthomosaic of the beaches of Itapuã State Park. a) Pombas Beach. b) Pedreira Beach. c) Onça Beach.

The results of the data processing showed that Pombas and Pedreira beaches have an average beach face slope of  $7^\circ$  and Onça Beach of  $8^\circ$ . The methodology used by Marinho and Nicolodi (2019) presented results close to those observed in the present study. The comparison between two different data acquisition methods for the study region, one punctual and the other comprehensive, shows that the morphology of the beach face is continuous throughout its entire

length. Thus, the method developed in the present study becomes more efficient due to the higher quality and resolution of data and the acquisition of aerial images with less field effort, even though the point method has shown consistent results. The other two beaches studied, Tigre Beach and Fora Beach, according to Marinho and Nicolodi (2019) showed declivity of 4 °. Thus, the five beaches studied in Itapuã State Park were classified according to their environmental sensitivity to contact with oil.

Pombas Beach is approximately 800 meters long and 15 meters wide. Due to its position inside a small cove facing northwest, this beach is protected from strong winds from the southwest quadrant, whose wind track becomes very limited, with approximately 1 km. This beach is characterized by being made up of coarse sand, with a 7° beach face slope and defined as a protected, low energy environment. As for biological resources, this beach did not present any variable proposed in the methodology for determining the Biological Sensitivity Index (IB). After determining the variables that make up oil sensitivity, Pombas Beach was classified as level 8.

Onça Beach has an approximate length of 200m and a width of 10m, being considered a sheltered environment of low energy due to its orientation on Lake Guaíba. Its sedimentological characteristics have medium sand in its constitution and a beach slope of 8 °, with the park beach having the highest slope of its sub-aerial portion. As for biological resources, this beach also did not present any variable proposed in the methodology. Thus, Onça Beach had its sensitivity to contact with oil classified at level 6.

Pedreira Beach, whose approximate length is 600 meters and width is 25 meters, has the characteristic of being a sandy beach embedded by rocks, with the presence of spikes. Oriented towards Lake Guaíba, whose direction is northwest-southeast, it becomes very sheltered from the prevailing winds in the region. This beach is composed of medium sand, with a beach slope of 7° and classified as a low energy, protected beach. On this beach, the spawning of the water tiger turtle, *Trachemys dorbigni*, makes it a possible nesting area. These characteristics give this beach the sensitivity rating at level 10.

Tigre Beach is approximately 300 meters long and 20 meters wide and faces Patos Lagoon, which makes it protected from the north and northeast quadrant winds. This does not occur for the south and southeast quadrant winds, making it exposed to a wind track of approximately 60 kilometers. It is composed of coarse sand, 4° of beach slope, and classified as a beach of moderate energy. As for biological resources, Tigre Beach houses the species *Ephedra* (*Ephedra tweediana*) in its frontal dunes, which is endemic to the region. Due to its characteristics, this beach was classified as the most sensitive to oil contact at level 14.

Finally, the largest beach in the Itapuã State Park is Fora Beach, whose width is 25 meters and its length is approximately 17 km. Oriented to Patos Lagoon, it has a wind track that can reach



up to 200 km for winds from the south quadrant, creating waves sufficiently energetic to alter its profile, making it an ideal example to classify it as an exposed, high-energy environment (Nicolodi and Toldo, 2003). Its sedimentary characteristics are made up of fine sand, a declivity of 4°, and it is an exposed, high-energy environment. As for biological resources, this beach did not present any variable proposed in the methodology for determining the Biological Sensitivity Index (IB). After these determinations, Fora Beach was classified as level 6 for environmental sensitivity to the oil.

Of the five beaches studied, four of them were defined as environments of moderate sensitivity, with only Tigre Beach being considered as highly sensitive. Within a more in-depth analysis of its variables, it could be noted that the presence of an endemic plant species associated with characteristics of particle size and low slope, which allow greater oil penetration and coverage area, were predominant in increasing the level of sensitivity of the beach in question.

### *3.2 Modeling oil spill trajectory*

Four scenarios in different seasons of the year 2018 were selected for modeling the surface dispersion of diesel oil from the wave height values ( $H_s$ ) modeled in Marinho *et al.* (2020). In the respective work, the wave modeling showed a significant height of 0.35m in the summer, 0.32m in the fall, 0.34m in the winter, and 0.40m in the spring. According to Figure 5, all scenarios selected for oil dispersion have extreme wave heights, with values higher than those found for each season of the year. For the month of February, specifically on the 11th at 5 pm, the value of  $H_s$  was 0.77m with a predominant direction of S; on May 19 at 6 pm the value of  $H_s$  was 0.61m with a predominant direction of SW; on August 19 at 6 pm the value of  $H_s$  was 0.67m with predominant direction of S; and on November 24 at 4 pm the value of  $H_s$  was 0.76m with the predominant direction of S.

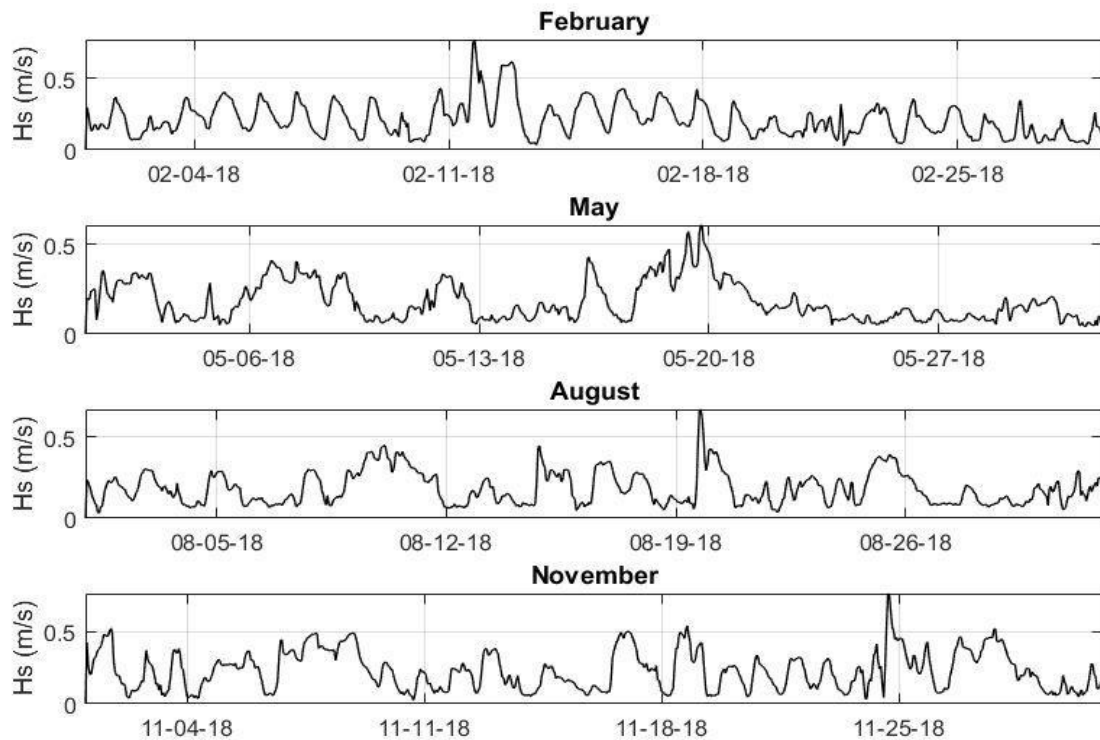


Figure 5. Wave height time series ( $H_s$ ) in the scenarios chosen for diesel oil dispersion.

### 3.2.1 Surface wind and current

Since the trajectory of the diesel oil spill in the study region is described as a function of wind patterns and surface-current induced waves, it is of paramount importance to analyze the behavior of these variables over time.

Figure 6 shows the wind roses for the simulation periods of the hypothetical diesel oil spill. As seen in Figure 6a, the predominant wind field is S and SE quadrant with a maximum intensity of 9.4 m/s on February 11th. For the month of May (Figure 6b), winds from the NW and W quadrant become more frequent with a maximum intensity value of 9 m/s on the 19th of May. For the period stipulated in the month of August (Figure 6c) the highest frequencies of the winds are associated with the NE and SW quadrants, with a maximum intensity of 8.5 m/s on May 19. Finally, in Figure 6d it can be seen that the highest frequencies are associated with the winds in the E and SE quadrant, with winds of greater intensity, 9.9 m/s, coming from the SW quadrant.

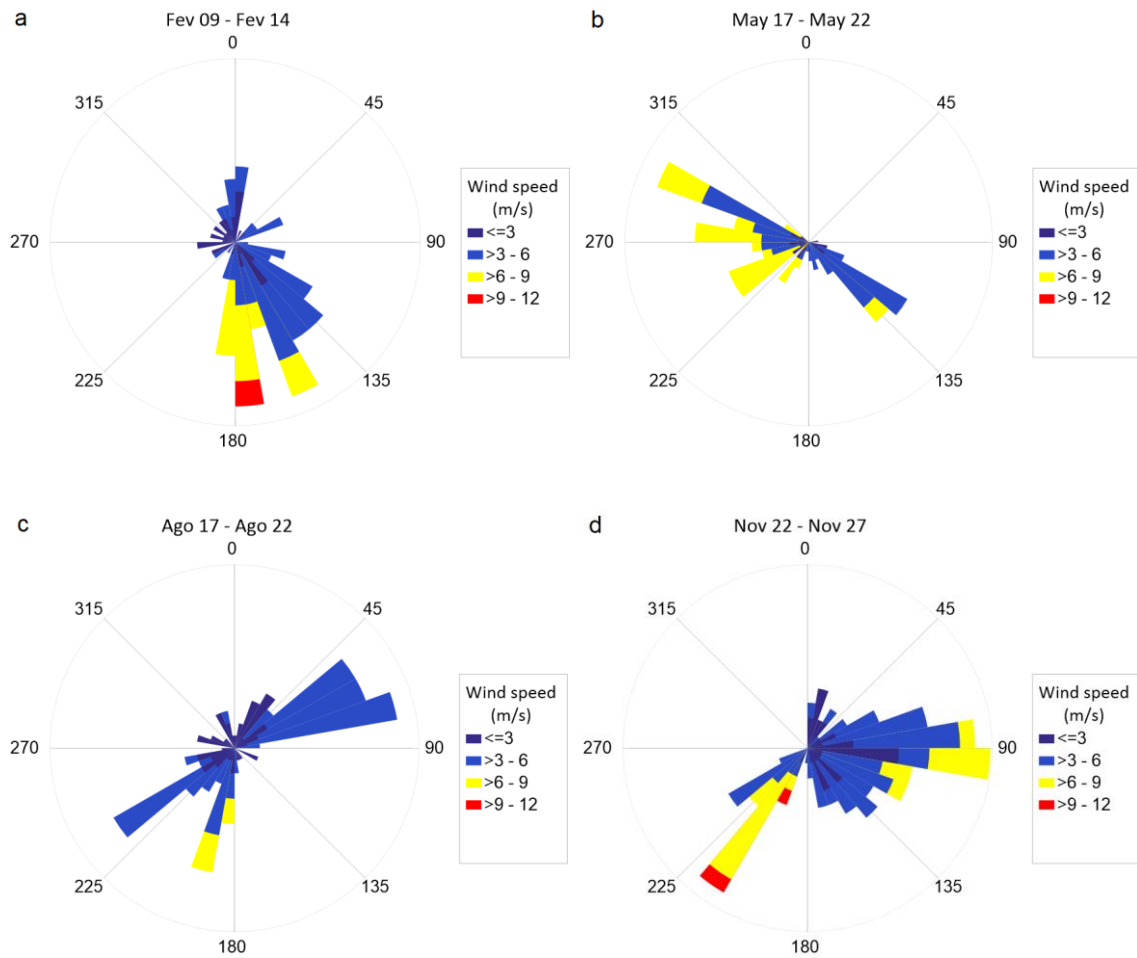
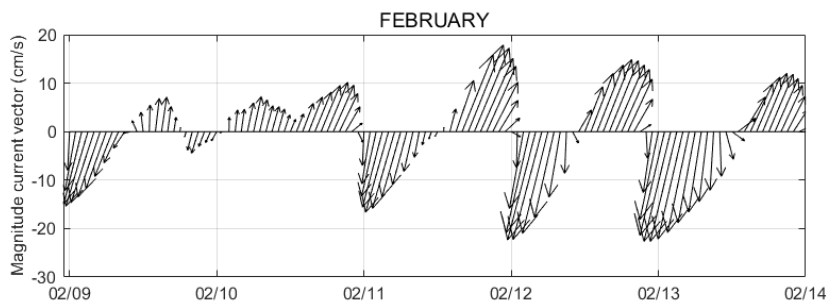


Figure 6. a) Wind rose for the 9th to 14th of February 2018. b) Wind rose for the 17th to 22nd of May 2018. c) Wind rose for the 17th to the 22nd of August 2018 d) Wind rose for November 22-27, 2018.

Regarding the modeled data of surface currents induced by waves, Figure 7 shows the time series of the current magnitude vectors for the four determined months. It is noted that in all cases, the meridional component ( $v$ ) of the current field presents greater magnitude when compared to the zonal component ( $u$ ). The increase in the magnitude of the vectors at the moment when the modeling points to the maximum wave heights found in the time series for each month is also evident, with the current magnitude only exceeding 20 cm/s in February.



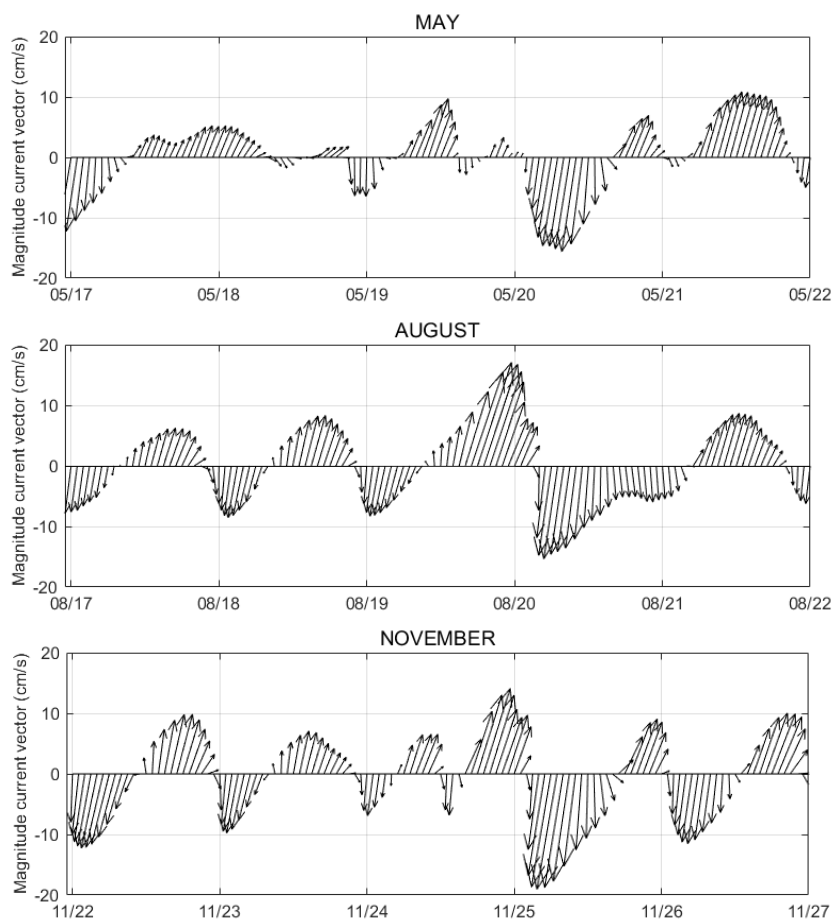


Figure 7. Surface current vectors of magnitude for the days simulated in February, May, August and November of 2018.

The work proposed by Stringari *et al.* (2012) analyzed, through numerical simulations in the Easy Coupling Oil System (ECOS), the behavior and the final destination of an oil spill hypothetically spilled on the continental shelf of Southern Brazil. Two different simulations were carried out, with the first simulation including all the physical forces acting on the oil dynamics, while the second simulation did not consider the wind forces in the hydrodynamic simulation. The results showed that the local wind controls the behavior and the final destination of the spill, where the processes of superficial dispersion and horizontal turbulence are dominant. For the second case, without the influence of local winds, the predominance of diffusion processes was observed. From these two approaches, it was identified that the spot reached the coast 30 hours after the spill in the first case, a fact not observed for the second case, where the spot was restricted to the ocean.

Several authors have pointed out in their respective studies the influence of local winds on oil spill dispersion patterns, as in the work by Wang *et al.* (2008) and Guo and Wang (2009), in the coastal zone of Asia. Such works confirmed the importance of the effect of local winds on the dynamics and scope of the oil spill. Other studies also reveal this behavior, as in Leal *et al.* (2019) and Lopes *et al.* (2019).

The study by Stringari *et al.* (2012) also suggests the secondary role of the surface current fields in displacing the oil spill, which conducts the oil primarily in the direction of the superficial circulation promoted by the winds, except for the particles that undergo a sinking process according to the three-dimensional circulation place. In this way, the intensity and direction of coastal currents become important in the vertical distribution of oil along the water column.

### 3.2.2 Oil spill dispersion

In general, it is observed that in all scenarios the first contact of diesel oil with the beach occurs within an interval of up to 1 hour after its spill, reaching the east coast of Guaíba close to the dumping site (Figure 8). Regarding the time required for the spot to reach the coastline, the work by Monteiro *et al.* (2019) simulated the movement and behavior of a diesel oil spill in coastal areas in the extreme south of Rio Grande do Sul and in Patos Lagoon estuary. The results showed that the oil reached the sensitive regions of the estuary approximately 1 hour after the spill.

Regarding the structure, the stains are small in size and with the highest concentrations of oil noted in the center. It can also be observed that the stain tends to spread out with greater intensity along the y-axis, except for the last scenario of the month of May, where it presents a different behavior. Such displacements are strongly influenced by wave patterns, winds in the region, and, to a lesser extent, surface currents induced by waves. This elongated pattern can be explained by the u and v components of the current, with a greater magnitude of v being evident (Figure 7).

In the work proposed by Janeiro *et al.* (2008), the authors used the MOHID model to reproduce the hydrodynamics of Patos Lagoon in two dimensions and simulate a hypothetical oil dispersion in the estuary. Such a study showed that the hydrodynamics of this system are controlled by wind patterns and freshwater discharge. Additionally, the dispersion, concentration, and evolution of the oil layer thickness are determined by the balance of these two components. It was also observed that the discharge of freshwater becomes preponderant in this process when the values are above 5000 m<sup>3</sup>, while the winds take control with values below this threshold.

Specifically for the month of February, according to what is shown in Figure 6a, the higher incidence of winds from the south quadrant contributes to the preferential displacement of the northern direction of Lake Guaíba. An important observation of the oil trajectory points to higher displacement speeds starting on February 11th, where the highest values of wind intensity, greater swell, and higher current speed are also found. Concerning the beaches of Itapuã State Park, the numerical simulations of the oil showed that for that same month only Fora Beach is not reached, and all other beaches in the park are reached within 1 day after the spill. When analyzing the time series of superficial concentration of diesel oil in the 9 predetermined points, it was observed that

for the month of February the oil reaches points 1, 5, 6, 7, and 8, being the most extreme point reached after 4 days of simulations.

The month of May showed a different pattern of dispersion and structure of the diesel oil spill when compared to the other months. Among the points reached by the oil are points 1, 2, 3, 5, and 6. As in February, the spot began to spread northwards, entering Lake Guaíba until Extreme Point 6. From that moment on, the change in the direction of the winds, with an incidence in the NW quadrant, and a swell direction with waves from the SW quadrant, became predominant in the dispersion process and oriented the spill towards Tigre Beach and Fora Beach, which were not reached in the month of February. In this way, all beaches in the State Park of Itapuã were affected by diesel oil on the surface, despite lower concentrations of oil on the beaches of Pombas and Onça due to their locations.

The month of August presented a pattern similar to that found for the month of February, however, the spill presented higher concentrations of diesel oil in the most extreme points and reached the west sector of Fora Beach, a fact that was not observed for the month of February. This behavior can be explained by the incidence of winds in the SW quadrant, which contributed to a greater displacement of the spill towards Tigre Beach and a small sector at Fora Beach. Among the points reached by the oil are points 1, 2, 4, 5, 6, and 7. Thus, the month of August showed all beaches in the State Park of Itapuã contaminated with diesel oil, with the highest concentrations of the pollutant at the end of the simulations at Pedreira Beach.

Finally, the month of November was the period in which the spill reached its greatest zonal displacement, reaching some sectors of the west bank of Lake Guaíba, a behavior that was not observed in any previous scenario. Observing the wind rose for the same month in Figure 6d, this fact can be explained by the high incidence of wind in quadrant E, not observed in previous months. All the beaches of the Itapuã State Park, except Fora Beach, had their areas contaminated with diesel oil during the days of simulations for this month, with the highest concentrations of oil on the surface in the Pedreira Beach region. The points that were observed fractions of contaminants were points 1, 2, 5, 6, and 7.

Analyzing the nine control points of diesel concentration on the surface, it is observed that the regions where points 1, 5, and 6 are found are impacted in all simulated scenarios. Point 1 is the closest to the diesel oil dumpsite, however, due to the field of hydrodynamic variables and winds, the oil tends to move first towards the continent, so Point 1 is reached only at the end of the first day of simulation in all cases. Points 5 and 6 are located near the beaches of Pedreira, Onça, and Pombas, and their analysis is sufficient to infer that these three beaches are reached in all simulation scenarios. Under no circumstances is Extreme Point 9 reached by oil, its southern dispersion being limited to Point 8.

The scenarios described above, as well as the structure and movement of the diesel oil slick, can be seen in Figure 8.

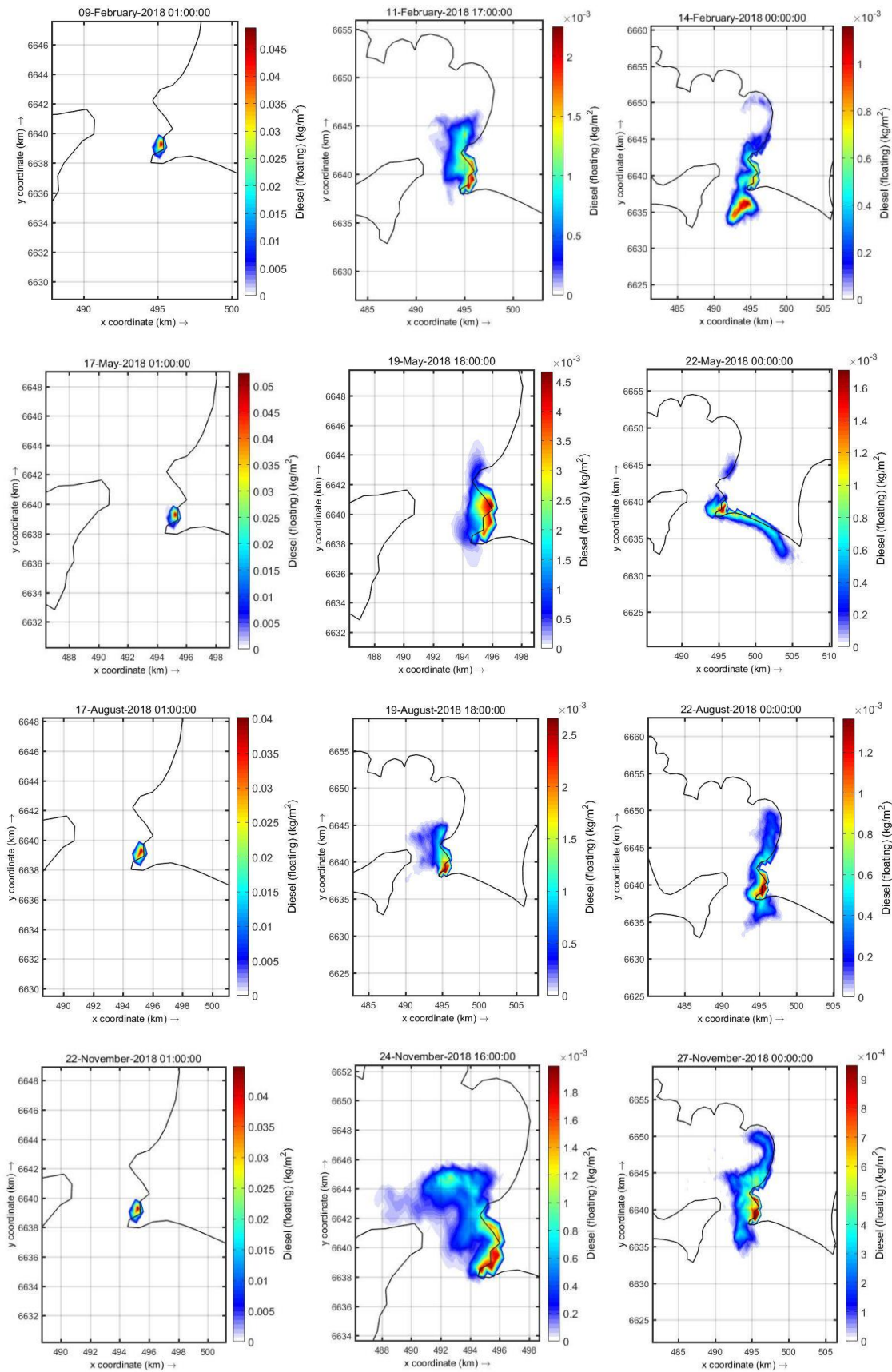


Figure 8. Twelve scenarios established to observe the structure and displacement of the diesel oil slick.

### 3.3 Oil vulnerability

With the sensitivity to the oil contact variable and the susceptibility scenarios established, the discussion on vulnerability could be developed. Within the context of sensitivity, the five beaches were classified according to the methodology presented in Item 2.4. Of the five beaches studied, four are considered moderately sensitive to oil and one is considered highly sensitive to oil. Concerning oil susceptibility and criteria established in Item 2.4, the beaches of Pombas, Onça, and Pedreira were considered to be very highly susceptible to oil, being affected in all the simulation scenarios proposed for the year 2018. Furthermore, Tigre Beach showed less susceptibility because it presented fractions of oil in its region in only two of the simulated months, being considered of moderate susceptibility. Finally, Fora Beach, the least susceptible of the park's beaches, was reached in almost all its extensions only in the month of May, being classified as low susceptibility.

In general, due to its environmental characteristics and location in front of the local waterway navigation channel, Itapuã State Park becomes a region in extreme need of attention regarding possible damage in incidents involving oil and its derivatives, a fact previously reported in the work of Marinho and Nicolodi (2019). Although the authors did not deal with the chance of each region being reached in hypothetical scenarios, the simple characteristic intrinsic to the environment becomes sufficient to draw due attention to the subject in question. Additionally, the lack of training of park employees in the event of an oil incident, the absence of containment and cleaning equipment, and the low amount of work related to the theme make this region a place to be monitored with great frequency. According to the numerical simulations, it was observed that in less than 1 hour after a hypothetical accident, the oil spill had already reached the coast, even though this region has low local hydrodynamics and low-intensity surface currents.

With the above and adopting a more conservative scenario as a criterion, the vulnerability classification took into account the highest level found among the variables that compose it, thus, three of the five beaches studied were classified as very high vulnerability, one classified as highly vulnerable, and one classified as moderate vulnerability. Table 1 summarizes this information.

Table 1. Synthesis of the sensitivity, susceptibility, and vulnerability analysis of the five beaches studied in Itapuã State Park.

Beaches	Sensitivity	Susceptibility	Vulnerability
Pombas	Moderate	Very high	Very high
Onça	Moderate	Very high	Very high
Pedreira	Moderate	Very high	Very high
Tigre	High	Moderate	High
Fora	Moderate	Low	Moderate



A specific and interesting case to be observed is Onça Beach, which presented the lowest environmental sensitivity to oil with a value of 6 on a scale of 0 to 20, however, classified as having very high vulnerability when being affected by diesel oil in all stipulated scenarios. In contrast, Tigre Beach represented the region with the greatest sensitivity to oil, especially due to its biological factors and present plant endemism, with a value of 14 on that scale and less vulnerability when compared to Onça, Pedreira, and Pombas Beaches due to its location in front of the local navigation channel. This analysis was only possible through the development of a methodology that allows the integration of an intrinsic environment variable (sensitivity) and a dynamic variable determined through diesel oil surface dispersion scenarios, where the parameters that make up the vulnerability can be observed in isolation and be compared between the different regions.

The results of the present work agree with the classic approaches present in Gundlach and Hayes (1978) and Hanna (1995) since the concept of environmental vulnerability used allows the determination of coastal environments highly vulnerable to contact with oil and derivatives, demanding priority of protection. Etkin (2000) points to the need for urgent responses in case of oil contamination since these actions are important in anticipating possible costs necessary for containment and cleaning affected environments. Based on the results obtained in the present study, it can be inferred that the environmental risks resulting from oil spills in the study regions can lead to ecological and economic losses, similar to what happened recently in shallow areas of the Brazilian coast (Araújo *et al.*, 2020; Pena *et al.*, 2020).

Finally, since academic work with this approach in the study area is scarce and the resources and equipment for contingency actions in case of accidents involving oil are absent or limited, the results presented here can contribute to the mitigation of incidents, reducing or even avoiding the undesirable effects of contamination of the environment in question.

#### **4. Conclusions**

The present study provided unprecedented knowledge about the environmental vulnerability of five beaches located in a protection conservation unit under two distinct views: a static, pragmatic, and integrated view of local geomorphological and biological characteristics, and another dynamic view, which is variable in space and time, depending on local hydrodynamic conditions and specific characteristics of the pollutant spilled in simulations.

Advantages were verified with the improvement of the methodology for determining oil sensitivity with the use of drone technology for beach imaging. They are the improvement in data acquisition, the increase of the topography elevation model resolution, and the slope of the beach

face; factors that resulted in the reduction of the effort and time of fieldwork. Thus, such a tool can be considered essential to be adopted in fieldwork for this purpose.

From the point of view of numerical simulations of diesel oil dispersion on the surface, a total of four simulations were carried out, which lasted 6 days, in different seasons, combined with bathymetry, meteorology, and hydrodynamics. The studies concluded that there are significant variations in the spreading speed and spread of the spill, with a greater range being observed in the spring, associated with the greater intensity of the winds, and in the autumn, a lower range of the same, where the wind fields presented the lowest values of intensity. Such results reinforce the preponderance of the fields of intensity and direction of the local winds in the displacement and behavior of the spill, reported by several published studies.

The result of the analysis of the different scenarios showed that in a period of 1 hour the oil already reaches the coastline, requiring a quick and timely response to avoid contact. The hourly and daily changes in the intensity and direction patterns of local winds, undulation, and surface currents guided by the waves are responsible for the great movement of the oil spill from the north to the south, and its spreading varies according to these characteristics, even if localized to a low hydrodynamic energy environment. In a specific analysis of the five beaches studied, three of them can be placed as a priority for protection, namely, Pombas, Onça, and Pedreira beaches, although the dynamic study points out all the beaches being hit by the hypothetically spilled oil.

The interactive use of an oil spill model becomes a powerful tool that can effectively contribute to the development of response strategies in the face of accidents involving oil and oil products, which has been intensified over the years since society's greater dependence on fossil fuel. The availability of good tools, which can and should be continuously improved, is a factor in the process of managing environmentally sensitive areas, offering support for decision-making by competent bodies.

This article contributed to the scientific and operational advancement regarding the subject addressed, suggesting priority areas for protection and paying attention to the fact that all beaches in Itapuã State Park are susceptible and vulnerable to a high and very high degree. The identification of these priority areas can maximize the concept of environmental protection, where the vulnerability scenarios can recommend possible containment procedures and cleaning methods to be employed.

Despite new and unprecedented data, many studies can still be developed in this area. Since the trajectories of oil particles tend to vary considerably for the same area, due to hydrodynamic oscillations, the increase in time series and the resolution of input data for hydrodynamic models, the advance and development of oil dispersion models promptly calibrated and validated for the region and experiments such as calculating the dispersion constant for the specific oil for the region

can be used to qualify the analysis and reduce uncertainties regarding the susceptibility to oil contact.

Also, the impossibility of eliminating the risks of accidents involving oil spills, especially in port areas and navigation channels, highlights the importance of establishing protocols for rapid action against these eventual disasters.

#### AUTHOR STATEMENT

**Chayonn Marinho:** Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal Analysis, Writing – Original Draft,

**João Luiz Nicolodi:** Conceptualization, Validation, Resources, Writing – Review & Editing, Supervision, Project Administration, Funding Acquisition.

**Jorge Arigony Neto:** Conceptualization, Validation, Resources, Writing – Review & Editing, Supervision, Project Administration, Funding Acquisition.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors of this paper are grateful to Deltares for the license to use Delt3D software and European Centre for Medium-Range Weather Forecasts for providing meteorological and reanalysis data, both crucial for the development of the work, and the project “*Ondas Network - Shallow Water Wave Monitoring Network*”. This study was funded by the Brazilian Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) through the PhD scholarship to C. Marinho.

## Capítulo VI: Síntese dos resultados e discussões

Dentro da proposta apresentada na presente tese está o estudo da vulnerabilidade ambiental ao óleo de praias do Parque Estadual de Itapuã (PEI) e adjacências. Partindo da definição de vulnerabilidade, a qual foi bem estabelecida ao longo do trabalho como função de características intrínsecas ao meio (sensibilidade) e probabilidade de determinada região ser atingida por óleo (susceptibilidade), foram desenvolvidos os dois artigos apresentados.

Os resultados obtidos, apesar de serem apresentados de maneira isolada, são dependentes e complementares, sob a ótica que sem o desenvolvimento do primeiro artigo não seria possível o prosseguimento do estudo e desenvolvimento da presente tese. A metodologia desenvolvida, o banco de dados utilizado, a aquisição de dados *in situ* e trabalhos de campo, juntamente com os resultados obtidos no primeiro manuscrito viabilizaram a metodologia e resultados obtidos no segundo manuscrito. A partir desse entendimento, nesse capítulo será apresentada uma síntese dos resultados e discussões dos artigos apresentados no capítulo V.

O artigo I teve como escopo a caracterização do regime de ondas do setor norte da Lagoa dos Patos (onde está localizado o PEI) por meio da modelagem numérica hidrodinâmica. O desenvolvimento desse trabalho foi responsável por caracterizar a hidrodinâmica local e gerar como produto um arquivo de extensão .hyd, o qual foi necessário e fundamental para a modelagem da dispersão da mancha de óleo diesel, a qual constituiu parte do artigo II.

A modelagem de ondas partiu de um modelo bem calibrado e validado o qual seguiu um padrão comumente encontrado em outros trabalhos nesse âmbito: tendência em superestimar altura de onda ( $H_s$ ) e subestimar período de pico ( $T_p$ ) e direção de pico ( $D_p$ ). Análises comparativas entre os parâmetros de ondas medidos *in situ* pelo ondógrafo e dados obtidos através da modelagem numérica mostraram uma boa performance do modelo. A escolha dos campos de intensidade média dos ventos e um maior coeficiente de fricção com o fundo responderam muito bem às expectativas de avanço na sua calibração, com a apresentação de resultados mais próximos da realidade. De maneira geral, os resultados mostraram que há uma relação direta entre o aumento da profundidade local e da altura significativa de onda e período de pico, sendo a batimetria local fator fundamental na determinação do padrão de ondas.

Os resultados mostraram também que as ondulações de menores alturas (até 0.3m) representam de 77.9% a 65.5% dos dados modelados, sendo esse valor inversamente proporcional à profundidade local, de modo que as regiões que apresentam maiores profundidades também apresentam maiores alturas de onda.

Em uma análise de toda série temporal modelada, os maiores valores de alturas de onda observados foram de 1m com período de 3,4s proveniente de S e SW durante a primavera de 2018.

Tal fato pôde ser relacionado com as maiores intensidades de vento observadas durante esse período e sua direção proveniente de S, uma vez que esses ventos sopram alinhados com o eixo principal da lagoa, aumentando a pista de vento local.

No que diz respeito a altura significativa de onda ( $H_s$ ) e período de pico ( $T_p$ ), os valores variaram entre 0,36m-0,46m e 2,1s-2,4s, respectivamente. Quando analisada a direção de propagação das ondas, observou-se ondas provenientes com maior frequência do quadrante E e ENE e menores frequências associadas a ondulações de ESE e S.

No que pese sobre a variação do padrão de ondas sazonalmente ao longo do ano de 2018, uma pequena variação de  $H_s$ ,  $T_p$  e  $D_p$  pôde ser observada, sendo que diferenças marcantes entre o verão e o inverno não foram verificadas. Com o desenvolvimento da modelagem numérica, processamento dos dados e análises estatísticas de dados de ondas e ventos foi possível inferir que o setor norte da Lagoa dos Patos tem por características ondulações que seguem os padrões de intensidade e direção dos ventos locais predominantes, alcançando seus máximos valores entre 1-2h após o pico de intensidade dos ventos.

Assim, a região do presente estudo foi definida como de baixa hidrodinâmica (região abrigada), caracterizada por ondulações de pequena altura de onda e curto período. Tal fato pode ser explicado pela morfologia da lagoa e sua pequena profundidade, fatores responsáveis por limitar o crescimento das ondas induzidas por ventos.

O artigo II teve como objetivo principal estimar a vulnerabilidade ambiental ao óleo de praias localizadas no Parque Estadual de Itapuã através do desenvolvimento de uma metodologia específica que integrou a sensibilidade local e a susceptibilidade da região ao contato com o poluente. Dentro do contexto de sensibilidade ambiental, o avanço metodológico a partir da utilização de imagens obtidas através de sobrevoos com drone foi empregado na metodologia proposta por Marinho & Nicolodi (2019), a qual foi utilizada para esta finalidade. Especificamente sobre a susceptibilidade ao óleo, quatro cenários hipotéticos de derramamento de 20m<sup>3</sup> de óleo diesel ao longo do ano de 2018 foi modelado. Uma vez estabelecidas essas duas variáveis, diferentes níveis de vulnerabilidade ambiental ao óleo puderam ser estabelecidos de acordo com a análise do comportamento superficial da mancha de óleo derramada e dos níveis de sensibilidade ambiental definidos.

Especificamente sobre o uso de imagens obtidas através de drones, ao comparar a metodologia original proposta por Marinho & Nicolodi (2019) com a metodologia aperfeiçoada no presente trabalho, notou-se que a utilização de drones tornou o processo de aquisição de dados *in situ* mais eficiente, com menor tempo gasto em trabalho de campo, maior cobertura espacial, qualidade e resolução dos dados adquiridos. Tal fato tornou o procedimento de aquisição de dados sobre a declividade da face de praia mais rápido e preciso quando comparado ao método pontual o

qual utiliza clinômetro para sua medição. Os valores de declividade da praia medidos entre os diferentes métodos foram bem próximos, o que viabilizou a utilização dessa nova metodologia para tal procedimento.

Cinco praias do Parque Estadual de Itapuã foram classificadas mediante sua sensibilidade ao óleo seguindo a metodologia desenvolvida na presente tese. De acordo com suas características geomorfológicas e biológicas as praias foram classificadas em uma escala crescente de sensibilidade que varia de 0 a 20. A praia das Pombas foi classificada no nível 8 (moderada sensibilidade), a praia da Onça e praia de Fora obtiveram nível 6 (moderada sensibilidade), a praia da Pedreira ficou determinada com nível 10 (moderada sensibilidade) e, por fim, a mais sensível delas, a praia do Tigre foi classificada em nível 14 (alta sensibilidade).

Com relação aos padrões de comportamento e deslocamento superficial da pluma de óleo diesel e a determinação da susceptibilidade das praias do PEI, os resultados das simulações numéricas da dispersão superficial de óleo diesel foram processados e analisados. Os quatro cenários estabelecidos para a simulação hipotética foram determinados em períodos de maior ondulação observada ao longo das quatro estações do ano, sendo um cenário para a primavera, um para o verão, um para o outono e um para o inverno.

De maneira geral, foi observado em todos os cenários que o primeiro contato do óleo com a praia ocorreu em um período máximo de uma hora após o derramamento do poluente, sendo que as maiores concentrações de óleo diesel foram encontradas no centro da pluma de despejo ao longo de seu deslocamento. Com relação à estrutura da mancha, observou-se, também, a maior velocidade de espalhamento da pluma ao longo do seu eixo y. Tal fato pode ser explicado devido à forte influência dos padrões de ondulação, correntes induzidas por ondas e ventos na dispersão e estrutura da mesma. O padrão alongado das plumas pode ser explicado pela maior magnitude da componente v das correntes superficiais quando relacionada com sua componente u. O padrão descrito acima não foi encontrado apenas em uma situação específica para o cenário do mês de maio, onde a pluma de dispersão tornou-se mais alongada em seu eixo x devido à incidência de ventos do quadrante NW e ondulações do quadrante SW, as quais foram responsáveis pelo diferente deslocamento nesse caso específico.

Do ponto de vista das simulações numéricas de dispersão do óleo diesel em superfície, os resultados dos estudos mostraram que há variações significativas na velocidade de espalhamento e abrangência da mancha, sendo observado na primavera uma maior abrangência, associada às maiores intensidade dos ventos e, no outono uma menor abrangência da mesma, onde os campos de ventos apresentaram os menores valores de intensidade. Tais resultados reforçam a preponderância dos campos de intensidade e direção dos ventos locais no deslocamento e comportamento da mancha, reportado por diversos estudos publicados.

Diferentes níveis de susceptibilidade puderam ser estabelecidos a partir da análise descrita acima. A praia das Pombas, praia da Pedreira e praia da Onça foram atingidas pelo óleo diesel em todos os cenários estabelecidos, sendo classificadas como praias de muito alta susceptibilidade ao óleo. A praia do Tigre foi atingida em metade dos cenários estabelecidos, o que foi determinante em sua classificação de moderada susceptibilidade. Por fim, a praia de Fora, foi classificada como de baixa susceptibilidade pois foi atingida pelo óleo em apenas um dos cenários estabelecidos.

A tabela abaixo reúne de maneira didática e concisa os resultados descritos acima.

Tabela 4. Síntese da classificação de sensibilidade, susceptibilidade e vulnerabilidade das praias do Parque Estadual de Itapuã (PEI).

<b>Praias</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Susceptibilidade</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
Pombas	Moderada	Muito alta	Muito alta
Onça	Moderada	Muito alta	Muito alta
Pedreira	Moderada	Muito alta	Muito alta
Tigre	Alta	Moderada	Alta
Fora	Moderada	Baixa	Moderada

O resultado das análises dos diferentes cenários mostrou que em um tempo de 1 hora o óleo já alcança a linha de costa, exigindo esforço rápido e pontual para que o contato seja evitado prontamente. As mudanças horárias e diárias dos padrões de intensidade e direção dos ventos locais, ondulação e correntes superficiais guiadas pelas ondas são responsáveis pela grande movimentação da mancha de óleo ora sentido norte ora sentido sul, sendo seu espalhamento variável de acordo com essas características, mesmo localizada em um ambiente de baixa energia hidrodinâmica. Em uma análise específica sobre as cinco praias estudadas, três delas podem ser colocadas como prioritárias de proteção, são elas, praia das Pombas, praia da Onça e praia da Pedreira, embora o estudo dinâmico aponte todas as praias sendo atingidas pelo óleo derramado hipoteticamente.

Mediante a determinação dos níveis de vulnerabilidade torna-se possível afirmar que devido as características ambientais e localização das praias do Parque Estadual de Itapuã (PEI) frente ao canal de navegação da hidrovia local, tal região necessita extrema atenção e proteção perante possíveis acidentes envolvendo embarcações que utilizam essa hidrovia com frequência. Somado a este fato, ainda, é observada a falta de treinamento específico de pessoas capacitadas para ações em casos de acidentes envolvendo óleo e derivados, ausência de equipamentos de contenção e limpeza prontamente disponíveis caso necessário e poucos trabalhos que abordam o tema desenvolvido no presente estudo.

## Capítulo VII: Conclusões

Uma vez finalizado o presente estudo, conclui-se que a hipótese apresentada no capítulo II é verdadeira, uma vez que os padrões hidrodinâmicos influenciam de maneira preponderante na classificação da vulnerabilidade local. Tal fato é observado à medida que as características geomorfológicas e biológicas (inseridas no contexto de sensibilidade) já são previamente conhecidas e possuem como característica serem permanentes, as quais não são influenciadas por sistemas meteorológicos e dinâmica lagunar. A realidade ambiental intrínseca, por já ser conhecida, permite que tais medidas de proteção e limpeza sejam previamente estabelecidas em ocorrência de acidentes envolvendo óleo e derivados, de maneira com que as regiões mais sensíveis ao óleo possam ser antecipadamente protegidas. Em contrapartida, o comportamento e deslocamento das plumas de óleo é totalmente dependente do padrão hidrodinâmico do exato momento em que o poluente entra em contato com o meio, de fato que sua movimentação e padrão de deslocamento não pode ser determinado anteriormente com precisão.

Um fato interessante de ser observado é que a análise escrita no parágrafo anterior só pode ser colocada em prática devido a maneira com que a metodologia proposta na presente tese foi equacionada. Tal metodologia permite a observação isolada dos parâmetros que compõem a vulnerabilidade ambiental ao óleo, bem como as variáveis que condicionam tanto a sensibilidade quanto a susceptibilidade.

O presente estudo aportou um conhecimento inédito sobre a vulnerabilidade ambiental de cinco praias localizadas em uma Unidade de Conservação de Proteção Integral sob duas distintas visões: uma visão estática, pragmática e integrada de características geomorfológicas e biológicas locais e outra visão dinâmica, a qual é variável no espaço e no tempo, dependente de condições hidrodinâmicas locais e características específicas do poluente derramado em simulações.

Foram verificados ganhos em relação ao aperfeiçoamento da metodologia para determinação da sensibilidade ao óleo com a utilização da tecnologia de drones para imageamento das praias. São eles: a qualificação na aquisição dos dados, o aumento da resolução dos modelos de elevação de terreno e da declividade da face de praia, fatores estes que resultaram na diminuição do esforço e tempo de trabalho de campo. Dessa forma, pode-se considerar tal ferramenta como imprescindível para ser adotada em trabalhos de campo com essa finalidade.

Os modelos numéricos são uma potente ferramenta para cálculo de regime de ondas, ajudando a superar as dificuldades que surgem na previsão devido à natureza randômica dos processos. O presente estudo contribuiu na disponibilização de dados a respeito do regime de ondas, correntes superficiais induzidas por ondas e comportamento/deslocamento de uma pluma hipotética de óleo diesel em um setor específico da laguna, onde poucos são os trabalhos desenvolvidos com



esse fim, colaborando com a pesquisa e tornando publicas informações úteis para a navegação e engenharia costeira, bem como para estudos a respeito da dinâmica lagunar.

Alguns experimentos, ainda, podem ser realizados com o intuito de melhorar a validação do modelo, como a utilização de malha numérica mais refinada, a qual, em contrapartida, exige maior capacidade computacional e tempo de modelagem, a aquisição de séries temporais maiores e mais contínuas dos parâmetros de onda, a fim de aumentar as amostras estatísticas, e a utilização de dados de intensidade e direção dos ventos adquiridos através de estações automáticas próximas à região de estudo, mesmo tendo o conhecimento da representatividade dos dados de reanálise para a Lagoa dos Patos. Também, no presente estudo, não foram incluídas as variações de nível da laguna e a vazão do Lago Guaíba no experimento, fatores que podem ser considerados em trabalhos futuros.

O uso interativo de um modelo de derramamento de óleo torna-se uma ferramenta poderosa que pode efetivamente contribuir para o desenvolvimento de estratégias de resposta frente à acidentes envolvendo óleo e derivados, comumente intensificado ao longos dos anos a partir da maior dependência da sociedade por esse combustível fóssil. A disponibilidade de boas ferramentas, as quais podem e devem ser continuamente melhoradas, é um fator para o processo de gestão de áreas ambientalmente sensíveis, oferecendo suporte para tomada de decisões de órgãos competentes.

O presente artigo contribuiu para o avanço científico e operacional referente ao assunto abordado, sugerindo áreas prioritárias para proteção e atentando para o fato de que todas as praias do Parque Estadual de Itapuã são susceptíveis e vulneráveis em alto e muito alto grau. A identificação dessas áreas prioritárias pode maximizar o conceito de proteção ambiental, onde os cenários de vulnerabilidade podem recomendar possíveis procedimentos de contenção e métodos de limpeza a serem empregados.

Apesar de dados novos e inéditos, muitos estudos ainda podem ser desenvolvidos nesse âmbito. Uma vez que as trajetórias das partículas de óleo tendem a variar consideravelmente para uma mesma área, devido às oscilações hidrodinâmicas, o aumento das séries temporais e da resolução dos dados de entrada para os modelos hidrodinâmicos, o avanço e desenvolvimento de modelos de dispersão de óleo prontamente calibrados e validados para a região e experimentos como cálculo da constante de dispersão do óleo específico para a região podem ser utilizados a fim de qualificar a análise e reduzir incertezas quanto à suscetibilidade ao contato com óleo.

Somado a isso, a impossibilidade de eliminar os riscos de acidentes envolvendo derramamentos de óleo, principalmente em zonas portuárias e canais de navegação, ressalta a importância de estabelecer protocolos para uma rápida ação contra estes eventuais desastres.

Por fim, o desenvolvimento desse trabalho gerou subsídios que podem contribuir com a gestão da Unidade de Conservação adjacente à área de estudo, o Parque Estadual de Itapuã, bem como para o projeto de retomada da hidrovia Brasil-Uruguai, ação que vem sendo discutida no âmbito do governo local e viria a auxiliar no equilíbrio da matriz de transportes da região. No estudo de viabilidade técnica desta proposta, os principais trechos navegáveis estudados são justamente a Lagoa dos Patos e o Lago Guaíba, os quais foram objetos do presente artigo.

## Capítulo VIII: Referências bibliográficas

ACSELRAD, H., MELLO, C. C. A. 2002. Conflito social e risco ambiental- o caso de um vazamento de óleo na Baía de Guanabara. In: ALIMONDA, II. (Org.). *Ecologia Política - Natureza, Sociedad y Utopia*. Buenos Aires: CLACSO. 2002. p. 293-317.

ADGER, W.N. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change* 16, 268-281.

AGUIAR, D.F. 2014. Metodologia para determinação da onda de projeto baseada em dados do WW3: aplicação aos molhes do Rio Grande. Master. Thesis. Federal University of Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil. 100p.

AKPINAR, A., VAN VLEDDER, G.P., KÖMÜRÇÜ, M.I., ÖZGER, M. 2012. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea. *Continental Shelf Research*, v.50–51, p.80–99.

ALVES, T.M., KOKINOU, E., ZODIATIS, G., LARDNER, R., PANAGIOTAKIS, C., RADHAKRISHNAN, H. 2015. Modelling of oil spills in confined maritime basins: The case for early response in the Eastern Mediterranean Sea. *Environmental Pollution* 206, 390-399.

AMIR-HEIDARI, P., ARNEBORG, L., LINDGREN, J.F., LINDHE, A., ROSÉN, L., RAIE, M., AXELL, L., HASSELLOV, I-M. 2019. A state-of-the-art model for spatial and stochastic oil spill risk assessment: a case study of oil spill from a shipwreck. *Environmental International* 126, 309-320.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO.

Disponível em: [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br)

ARAÚJO, M.E., RAMALHO, C.W.N., MELO, P.W. 2020. Artisanal fishers, consumers and the environment: immediate consequences of the oil spill in Pernambuco, Northeast Brazil. *Cadernos de Saúde Pública* 36.

BHOWMIK, N.G., STALL, J.B. 1978. Circulation patterns in the Fox Chain of lakes Illinois. *Water Resources Research* 14, 633-642.

BRADLEY, M.P., SMITH, E.R. 2004. Using science to assess environmental vulnerabilities. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.94, p.1-7.

BRASIL. Lei Federal nº 9966/00, que “dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas e perigosas em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências”.

BRYANT, E. 1979. Comparison of computed and observed breaker wave heights. *Coastal Engineering*, v.9, p.39-50.

BUCKLEY, R.C. 1982. Environmental sensitivity mapping — what, why and how. *Minerals and the Environment* 4, 151-155.

BURROWS, R., HEDGES, T.S. 1985. The influence of currents on ocean wave climates. *Coastal Engineering* 9, 247-260.

CARMO, E.H., TEIXEIRA, M.G. 2020. Desastres tecnológicos e emergências de saúde pública: o caso do derramamento de óleo no litoral do Brasil. *Cadernos de Saúde Pública* 36.

CASAGRANDE, A.I., AGUIAR, D.F., NICOLODI, J.L., DAMIÃO, A.L. 2018. Tendências de variação da linha de costa de Cidreira (RS) e suas relações com parâmetros oceanográficos e meteorológicos. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul*, n.31, p.35-62.

CASSIANO, G.F., RIBEIRO, R., YASSUDA, E. 2012. Acquisition of wave data and modeling in Santos Bay, São Paulo, Brazil. 10th International Conference on Hydrosience & Engineering, Orlando, Flórida, EUA.

CASTELÃO, R.M. & MOLLER, O.O. 2003. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. *Revista Atlântica, Rio Grande*, v.25, n.2, p. 91-106.

CIAPPA, A., COSTABILE, S. 2014. Oil spill hazard assessment using a reverse trajectory method for the Egadi marine protected area (Central Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin* 84, 44-55.

COASTAL ENGINEERING MANUAL – PART II. Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC. 623p

CUCCO, A., SINERCHIA, M., RIBOTTI, A., OLITA, A., FAZIOLI, L., PERILLI, A., SORGENTE, B., BORGHINI, M., SCHROEDER, K., SORGENTE, R. 2012. A high-resolution real time forecasting system for predicting the fate of oil spills in the Strait of Bonifacio (western Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin* 64, 1186-1200.

DANCHUK, S., WILSON, C. 2010. Effects of shoreline sensitivity on oil spill trajectory modelling of the lower Mississippi river. *Environmental Sciences Pollution Research* 17, 331-340.

DELANEY, P. 1965. Fisiografia e geologia de superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul. *Publicação Especial da Escola de Geologia de Porto Alegre*, v.6, p.1-105.

DISNER, G. R., TORRES, M. 2020. The environmental impacts of 2019 oil spill on the Brazilian coast: Overview. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 7(15): 241-255. ISSN p.2359-1412.

ETKIN, D. S. 2000. A Worldwide Review of Oil Spill Fines and Penalties. Environmental Research Consulting, 158p.

EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS.

Available in: <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>.

FATTAL, P., MAANAN, M., TILLIER, I., ROLLO, N., ROBIN, M., POTTIER, P., 2010. Coastal Vulnerability to Oil Spill Pollution: The Case of Noirmoutier Island (France). *Journal of Coastal Research* 26, 879-887.

FONTOURA, J.A.S., NICOLODI, J.L., ROMEU, M.A.R., MELO, E., LEMKE, N., AGUIAR, D.F., GOULART, M.M. 2015. Medição direcional de ondas na Lagoa dos Patos, RS, Brasil. Congresso Hidroviário da Sociedade Brasileira de Engenharia Naval (SOBENA), Manaus, Amazonas, Brasil. 7p.

GRIFFA, A., PITERBANG, L., OZGOKMEN, T. 2004. Predictability of Lagrangian particle trajectories: effects of smoothing of the underlying Eulerian flow. *Journal of Marine Research* 62, 1-35.

GUANDALINI, R., AGATE, G., MOIA, F. 2017. Numerical 3D modelling of oil dispersion in the sea due to different accident scenarios. *Energy Procedia*, v.125, p.161-169.

GUEDES-SOARES, C. 1986. Calibration of visual observations of wave period. *Ocean Engineering*, v.13, n.6, p.539-547.

GUIMARÃES, P.V., FARINA, L., TOLDO JR, E., DIAZ-HERNANDEZ, G., AKHMATSKAYA, E. 2015. Numerical simulation of extreme wave runup during storms events in Tramandaí Beach, Rio Grande do Sul, Brazil. *Coastal Engineering*, v.95, p.171-180.

GUNDLACH, E.R., HAYES, M.O. 1978. Vulnerability of Coastal Environments to Oil Spill Impacts. *Marine Technology Society Journal* 12, 18-27.

GUO, W.J., WANG, Y.X. 2009. A numerical oil spill model based on a hybrid method. *Marine Pollution Bulletin* 58, 726-734.

HANNA, R.G.M. 1995. An approach to evaluate the application of the vulnerability index for oil spills in tropical red sea environments. *Spill Science and Technology Bulletin* 2, 171-186.

HASSELMANN, K. & COLLINS, J.I. 1968. Spectral dissipation of finitedepth gravity waves due to turbulent bottom friction. *Journal of Marine Research*, v.26, n.1, p.1-12.

HERZ, R. 1977. Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos. Doctor. Thesis. University of São Paulo, Brazil.

HOLTHUIJSEN, L.H. 2007. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, New York, 388p.

HOSPITAL, A., STRONACH, J.A., MCCARTHY, M.W., JOHNCOX, M. 2015. Spill response evaluation using an oil spill model. *Aquatic Procedia*, v.3, p.2-14.

IHAKSI, T., KOKKOKEN, T., HELLE, I., JOLMA, A., LECKLIN, T., KUIKKA, S. 2011. Combining Conservation Value, Vulnerability and Effectiveness of Mitigation Actions in Spatial Conservation Decisions: An application to coastal oil spill combating. *Environmental Management* 47, 802-813.

IRGANG, G.V. 2003. Análise espacial e temporal do estado da conservação ambiental do Parque Estadual de Itapuã - RS e sua zona de amortecimento. Dissertação de mestrado em Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. 110 pag.

ITOPF. INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION. Statistics. Disponível em: <http://www.itopf.com>. Acesso em 2019.

IVANOV, A.Y., ZATYAGALOVA, V.V. 2008. A GIS approach to mapping oil spills in a marine environment. *International Journal of Remote Sensing* 29, 6297-6313.

JANEIRO, J., FERNANDES, E., MARTINS, F., FERNANDES, R. 2008. Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 56, 650-665.

JARDINE, T.P. 1979. The reliability of visually observed waves heights. *Coastal Engineering*, v.9, p.33-38.

KASPERSON, R.E., DOW, K., ARCHER, E.R.M., CÁCERES, D., DOWNING, T.E., ELMQVIST, T., ERIKSEN, S., FOLKE, C., HAN, G., IYENGAR, K., VOGEL, C., WILSON, K.A., ZIERVOGEL, G. 2005. Vulnerable People and Places. In: HASSAN, R., SCHOLLES, R., ASH, N. 9 (Ed). *Ecosystems and human well-being: current state and trends. Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: Island Press.

KJERFVE, B. 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: D. A. Wolfe (ed.), *Estuarine Variability*. Academic Press, New York. p. 63–81.

KJERFVE, B. & MAGILL, K.E. 1989. Geographic and hydrographic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, v.88, p.187–199.

KOMEN, G.J., HASSELMANN, S., HASSELMANN, K. 1984. On the existence of a fully developed wind sea spectrum, *Journal of Physical Oceanography*, v.14, p. 1271-1285.

LALBEHARRY, R. 2001. Evaluation of the CMC Regional Wave Forecasting System against Buoy Data. *Atmosphere-Ocean*, v.40, p.1-20.

LEAL, T.F., MONTEIRO, C.B., SILVA, M.C., MOLLER JR., O.O., OLEINIK, P.H., MARQUES, W.C. 2019. Numerical study of oil spill in the Patos Lagoon estuary region. *Revista de Engenharia Térmica* 18, 22-28.

LEE, J.M., WISEMAN JR., W.J., KELLY, F.J. 1990. Barotropic, subtidal exchange between Calcasieu Lake and the Gulf of Mexico. *Estuaries* 13, 258-264.

LEMKE, N. 2015. Morfodinâmica da Embocadura do Arroio Carahá, Lagoa dos Patos, São Lourenço do Sul – RS. Doctor. Thesis. Federal University of Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil. 356p.

LEMKE, N., FONTOURA, J.A.S, CALLIARI, L.J., AGUIAR, D.F., MELO, E., NICOLodi, J.L., ROMEU, M.A.R., GOULART, M.M. 2015. Estudo comparativo entre modelagem e medições de ondas na Lagoa dos Patos – RS, Brasil. In: Simpósio sobre ondas, marés, engenharia oceânica e oceanografia por satélite. Arraial do Cabo, RJ, Brazil.

LEMKE, N., CALLIARI, L.J., FONTOURA, J.A.S., AGUIAR, D.F. 2017. Wave directional measurement in Patos Lagoon, RS, Brazil. *Brazilian Journal of Water Resources*, v.22, e.1.

LEMKE, N., FONTOURA, J.A.S., CALLIARI, L.J., FERREIRA, N.M. 2018. Estimativa de cenários característicos de ondas na enseada de São Lourenço do Sul, Lagoa dos Patos – RS. *Revista Perspectivas Online: Exatas & Engenharias*, v.8, n.20, p.25-42.

LEMOs, A.T., SOARES, I.D., GHISOLFI, R.D., CIRANO, M. 2009. Oil spill modeling of the Brazilian eastern coast: the effect of tidal currents on oil fate. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.27, n.4.

LIN, W.Q., SANFORD, L.P., SUTTLES, S.E. 2002. Wave measurement and modeling in Chesapeake bay. *Continental Shelf Research*, vol.22, p.18-19.

LONG, T. 1989. Le quaternaire littoral du Rio Grande do Sul state témoin des quatre dernières épisodes eustatiques majeurs. *Geologie et évolution*. DSc. Thesis, Université Bordeaux I, France.

LOPES, B.V., PAVLOVIC, A., TROMBETTA, T.B., OLEINIK, P.H., MONTEIRO, C.B., GUIMARÃES, R.C., DA SILVA, D.V., MARQUES, W.C. 2019. Numerical study of oil spill in the Patos lagoon under flood and ebb conditions. *Journal of Marine Science and Engineering* 7, e7010004.

LU, X., WONG, K.C. 1994. The subtidal lagrangian current in Delaware's inland bays under low wind conditions. *Estuarine Coastal Shelf Science* 39, 353-365.

MACHADO, M.D. Um estudo sobre o clima de ondas e o transporte de lama ao largo da Praia do Cassino, RS. 2013. Doctor. Thesis. Federal University of Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil. 346p.

MAGRIS, R. A., GIARRIZZO, T. 2020. Mysterious oil spill in the Atlantic Ocean threatens marine biodiversity and local people in Brazil, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 153, 2020, 110961.

MARINHO, C., NICOLODI, J.L. 2019. Integração de parâmetros geomorfológicos e biológicos no desenvolvimento do Índice Integrado de Sensibilidade do Litoral (IISL). *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 1509-1524.

MARINHO, C., NETO, J.A., NICOLODI, J.L., LEMKE, N., FONTOURA, J.A.S. 2020. Wave regime characterization in the northern sector of Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Ocean and Coastal Research* 68, e20295.

MATOS, M.F.A., SCUDELARI, A.C., AMARO, V.E., FORTES, C.J.E.M. 2017. Integration among numeric Simulating (SWAN) and field data on wave climate determination at the state of Rio Grande do Norte northern coast. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.18, n.2, p.311-328.

MELO, C.L., NETO, A.C.B., CAICEDO, N.O.L., SCHWARZ, M.R. 2003. Contaminação do lençol freático pelo vazamento de óleo na refinaria Presidente Getúlio Vargas – REPAR, Município de Araucária, Paraná. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, ISSN 2318-0331.

MELO, E., HAMMES, G.R., FRANCO, D., ROMEU, A.R. 2008. Aferição do desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina. In: Seminário e workshop em engenharia oceânica (SEMENGO). Rio Grande, RS, Brazil.

METZGER, M.J., ROUNSEVELL, M.D.A., ACOSTA-MICHLIK, L., LEEMANS, R., SCHROTER, D. 2006. The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.114, p.69-85.

MILLET, B., TEXIER, H., COLLEUIL, B. 1991. Modélisation numérique de circulation et dynamique sédimentaire d'un écosystème lagunaire tropical: le lac Nokoue (Benin). *J. Rech. Oceanore*, v.16, p.10-15.

MMA. 2007. Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. 107 pag.



MOEINI, M.H. & ETEMAD-SHAHIDI, A. 2009. A wave parameter hindcasting in a lake using the SWAN model. *Scientia Iranica*. Sharif University of Technology. Transaction A: Civil Engineering, v.16, n.2, p.156-164.

MOLLER, O.O. 1996. *Hydrodynamique de La Lagune dos Patos. Me´sures et modelisation*. DSc. Thesis, Universite´ Bordeaux I, France.

MONTEIRO, C.B., OLEINIK, P.H., LOPES, B.V., LEAL, T.F., MOLLER JR., O.O., MARQUES, W. C. 2019a. Oil spill simulations and susceptibility in coastal and estuarine areas. *Defect Diffusion Forum* 396, 109-120.

MONTEIRO, C.B., OLEINIK, P.H., LEAL, T.F., MARQUE, W.C., NICOLODI, J.L., LOPES, B.C.F.L. 2020. Integrated environmental vulnerability to oil spills in sensitive areas. *Environmental Pollution* 267, e115238.

NICOLODI, J.L. 2002. *A morfodinâmica praial como subsídio ao gerenciamento costeiro. O caso da praia de Fora – Parque Estadual de Itapuã, RS*. Master. Thesis. Federal University of Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil.

NICOLODI, J.L., TOLDO JR., E.E. 2003. Beach Morphodynamics: A tool for coastal habitat managers. A case study-Praia de Fora, Itapuã State Park, RS. *Natureza e Conservação* 1, 66-75.

NICOLODI, J.L., TOLDO JR., E.E., FARINA, L. 2010. Dinâmica e ressuspensão por ondas no Lago Guaíba (RS, Brasil) e implicações nos locais de captação de água para abastecimento humano. *Pesquisas em Geociências* 37, 25-39.

NICOLODI, J.L. & PETTERMANN, R.M. 2011. Vulnerability of the brazilian coastal zone in its environmental, social and technological aspects. *Journal of Coastal Research*, v.SI 64, p.1372-1379.

NICOLODI, J.L., TOLDO JUNIOR, E.E., FARINA, L. 2011. Wave dynamics and resuspension in Lake Guaíba (Brazil) with implications on points of water abstraction for human supply. *Journal of Coastal Research*, v.SI 64, p.1550-1554.

NICOLODI, J.L., TOLDO JUNIOR, E.E., FARINA, L. 2013. Dynamic and resuspension by waves and sedimentation pattern definition in low energy environments, Guaíba Lake, Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, São Paulo, v.61, n.1, p.55-64.

PADILLA-HERNÁNDEZ, R. & MONBALIU, J. 2001. Energy balance of wind waves as a function of the bottom friction formulation. *Coastal Engineering*, v.43, p.131-148.

PAES-LEME, R.B., VIOLANTE-CARVALHO, N., ACCETTA, D., MEIRELLES, S. 2008. Modelagem física e computacional de ondas geradas pelo vento em um terminal portuário: o

desempenho do modelo SWAN 40.51 em uma região com elevada reflexão e difração. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.16, n.1.

PALLARES, H., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., INFANTES, M.E. 2014. Wave energy balance in wave models (SWAN) for semi-enclosed domains – Application to Cantabrian coast. *Continental Shelf Research*, v.87.

PENA, P.G.L., NORTHCROSS, A.L., LIMA, M.A.G., RÊGO, R.C.F., 2020. The crude oil spill on the Brazilian coast in 2019: the question of public health emergency. *Cadernos de Saúde Pública* 36.

PLANT, N.G. & GRIGGS, G.B. 1992. Comparison of visual observations of wave height and period to measurements made by an offshore slope array. *Journal of Coastal Research*, v.8, n.4, p.957-965.

PRINCE, R.C. 2015. Oil spills dispersants: boon or bane? *Environmental Science Technology* 49, 6376-6384.

ROCHA, M.V.L., MOURA, T., FORTES, C.J.E.M., CAPITÃO, R., BEZERRA, M.M., SANCHO, F.E. 2012. Análise comparativa de medições in situ e estimativas numérica na Praia da Cornélia, Costa da Caparica, Portugal. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v.12, n.2, p.147-157.

RODRÍGUEZ, M.G., NICOLODI, J.L., GUTIÉRREZ, O.M., LOSADA, V.C., HERMOSA, A.E. 2018. Brazilian Coastal Processes: Wind, Wave Climate and Sea Level. In: Short, A.D., Klein, A.H.F. (eds), *Brazilian Beach Systems*. v.17.

ROMERO, A.F., ABESSA, D.M.S, FONTES, R.F.C., SILVA, G.H. 2013. Integrated assessment for establishing an oil environmental vulnerability map: Case study for the Santos Basin region, Brazil. *Marine Pollution Bulletin* 74, 156-164.

RUSU, E. 2016. Reliability and applications on the numerical wave predictions in the Black Sea. *Frontiers in Marine Science*, v.3:95.

RUSU, L., BERNARDINHO, M., GUEDES SOARES, C. 2014. Wind and wave modeling in the Black Sea. *Journal of Operational Oceanography*, v.7.

SÁNCHEZ, A.S., RODRIGUES, D.A., FONTES, R.M., MARTINS, M.F., KALID, R.A., TORRES, E.A. 2018. Wave resource characterization through in-situ measurement followed by artificial neural networks' modeling. *Renewable Energy*, v.115, p.1055-1066.

SCHROTER, D., METZGER, M.J., CRAMER, W., LEEMANS, R. 2003. Vulnerability assessment - analyzing the human-environment system in the face of global environmental change. *The ESS Bulletin*, v. 2, p. 11-17.

SEIBT, C., PEETERS, F., GRAF, M., SPRENGER, M., HOFMANN, H. 2013. Modeling wind waves and wave exposure of Nearshore zones in médium-sized lakes. *Limnology and Oceanography*, v.58, n.1, p.23-26.

SHIN, S. Simulation of two-dimensional internal waves generated by a translating and pitching foil. *Ocean Engineering*, v.70, p.77-86.

SIMÃO, C.E. 2016. Estudo do padrão de ondulações na Lagoa dos Patos utilizando o modelo SWAN (Delft3D), RS, Brasil. Master. Thesis. Federal University of Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil.

SINGKARAN, N. 2013. Classifying risk zones by the impacts of oil spills in the coastal waters of Thailand. *Marine Pollution Bulletin* 70, 34-43.

SMITH, N. P. 1978. Long period, estuarine-shelf exchanges in response to meteorological forcing, p. 147–159. In J. C. J. Nihoul (ed.), *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*. Elsevier Oceanography Series 30, Amsterdam.

SOOMERE, T., DOOS, K., LEHMANN, A., MEIER, M., MURAWSKI, J., MYRBERG, K., STANEV, E.V. 2014. The potential of current and wind driven transport for environmental management of Baltic Sea. *Journal of the Human Environment* 43, 94-104.

SORENSEN, O., KOFOED-HANSEN, H., RUGBJERG, M., SORENSEN, L.S. 2004. A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique. 29th international conference on coastal engineering. Lisbon, Portugal.

STECH, J.L. & LORENZZETTI, J.A. 1992. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysics Research*, v.97, p.9507-9520.

STRINGARI, C.E., MARQUES, W.C., MELLO, L.F., EDIT, R.T. 2012. Modeling the wind influence in an oil spill along the Southern Brazilian Shelf. *Engenharia Térmica* 12, e109.

STRINGARI, C.E., MARQUES, W.C., EIDT, R.T., MELLO, L.F. 2013. Modeling an oil spill along the Southern Brazilian Shelf: Forcing characterization and its influence on the oil fate. *International Journal of Geosciences*, v.4, p.397-407.

SUPRG. 2020. Superintendência do Porto de Rio Grande. Accessed in 2020.

<http://www.portosrs.com.br/site/>.

TOBIN, G.A., MONTZ, B.E. 1997. *Natural Hazards, Explanation and Integration*. New York, London: The Guildford Press.

TOLDO, E.E., ALMEIDA, L.E.S.B., CORRÊS, I.C.S., FERREIRA, E.R., GRUBER, N.L.S. 2006. Wave prediction along Lagoa dos Patos Coastline, Southern Brasil. *Revista Atlântica*, v.28, n.2, p.87-95.

TURNER, B.L., KASPERSON, R.E., MATSONE, P.A., MCCARTHYF, J.J., CORELLG, R.W., CHRISTENSENE, L., ECKLEYG, N., KASPERSONB, J.X., LUERSE, A., MARTELLOG, M.L., POLSKYA, C., PULSIPHERA, A., SCHILLERB, A. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.100, n.14, p.8074-8079.

VAN VLEDDER, G.P. & AKPINAR, A. 2015. Wave model predictions in the Black Sea: sensitivity to wind fields. *Applied Ocean Research*, v.53, p.161-178.

VILLWOCK, J.A. 1972. Contribuição à Geologia do Holoceno da Província Costeira do Rio Grande do Sul. Master. Thesis. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil. 113p.

WANG, S.D, YONG-MING, S., GUO, J.K., TANG, J. 2008. Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas. *Ocean Engineering* 35, 503-510.

WILLIAMS, L.R.R., KAPUTSKA, L.A. 2000. Ecosystem vulnerability: a complex interface with technical components. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v.19, p.1055-1058.

WONG, K. C. 1991. The effect of coastal sea level forcing on Indian River Bay and Rehoboth Bay, Delaware. *Estuarine Coastal Shelf Science*, v.32, p.23-229.