

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL

MARIANA MAGNAGO ALVES

**MÉTODOS QUANTITATIVOS DE RISCOS AMBIENTAIS -
INVESTIGAÇÃO DO SEU USO NO LICENCIAMENTO DE
E&P DO CAMPO DE GOLFINHO**

ARACRUZ, 2015

MARIANA MAGNAGO ALVES

**MÉTODOS QUANTITATIVOS DE RISCOS AMBIENTAIS –
INVESTIGAÇÃO DO SEU USO NO LICENCIAMENTO DE
E&P DO CAMPO DE GOLFINHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção de título de mestre em Oceanografia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Renato David
Ghisolfi

ARACRUZ, 2015

MARIANA MAGNAGO ALVES

MÉTODOS QUANTITATIVOS DE RISCOS AMBIENTAIS - INVESTIGAÇÃO DO SEU USO NO LICENCIAMENTO DE E&P DO CAMPO DE GOLFINHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção de título de mestre em Oceanografia Ambiental.

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Renato David Ghisolfi – Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo / UFES

Dr. – Examinador Interno
Universidade Federal do Espírito Santo / UFES

Dr. – Examinador externo

Dr.

“Se alguém lhe disser que algo é impossível, não interprete como limite, encare como um desafio. O único limite que existe é aquele que impomos a nós mesmos!” (André Ricardo Franco).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a CAPES (CNPQ), pelo fomento da bolsa de estudos que possibilitou o melhor desenvolvimento deste trabalho;

Agradeço ao meu orientador, Renato David Ghisolfi, por confiar no meu trabalho e me dar a oportunidade de estar no laboratório Posseidon, e também a todos os integrantes do laboratório pelas dicas, momentos compartilhados, dúvidas sanadas, em especial ao Ricardo Servino e Bruno Borlini pela elaboração de uma das rotinas utilizadas em Matlab e Java respectivamente; também a Meyre Pereira, a Júlia Tavares Salviato e Mahatma Fernandes, sempre prestativos em todos os momentos.

Agradeço a FUGRO por fornecer os *shapefiles* do Projeto Carta SAO antes deles estarem disponíveis na internet. Tornou o cronograma possível de executar. Muito obrigada.

Agradeço a Odd Willy Brude por esclarecer dúvidas e enviar o texto do método em inglês (o que tornou o trabalho muito mais fácil de realizar do que na versão em Norueguês).

Agradeço a Deus, por me permitir sonhar e conquistar tudo o que preciso.

Agradeço a minha família que sempre me apoiou e tornou possível a conclusão deste curso. Eu não seria nada sem vocês.

Agradeço ao meu namorado, que chegou no meio do caminho, mas compartilhou os desafios dessa caminhada comigo, dando força, suporte, e tornando o caminho mais florido.

Agradeço a Jacqueline Albino pela prestatividade em fornecer dados do CARTA SAO e sanar as minhas dúvidas sempre.

Agradeço ao Bruno Berguer e sua equipe e a CTA Meio Ambiente por me receber, me apresentar e me orientar sobre os dados de nidificação de tartarugas marinhas.

Muito obrigada!

RESUMO

A proposta deste estudo é avaliar se a análise quantitativa de riscos ambientais (QRA) poderia ser aplicada com eficiência nos países em áreas tropicais e subtropicais, como o Brasil, já que este método foi desenvolvido e aplicado em países em áreas temperadas, subpolares e polares. Para isto foi implementado um estudo de caso no Campo de Golfinho utilizando o método quantitativo de riscos ambientais norueguês MIRA, e comparados os resultados e o método do presente estudo com os resultados qualitativos do processo de licenciamento prévio. O resultado é que o método MIRA poderia ser aplicado em qualquer região do globo, desde que haja dados de entrada para a região estudada, já que o método é independente de variáveis climatológicas, mas sim o intemperismo do óleo, que é simulado no interior do modelo. O método ratificou a liberação do campo para a exploração, mas é necessário para o Brasil o levantamento de alguns dados da biologia e da socioeconomia para desenvolver melhor este tipo de análises. Considerando a importância do destino do óleo na análise ambiental de riscos, deve-se utilizar a melhor base de dados hidrodinâmica e o melhor modelo de destino de óleo em relação ao intemperismo do óleo, e que principalmente para a região de estudo, uma região extremamente dinâmica, que as modelagens de óleo contemplem pelo menos cada uma das quatro estações do ano, e não só inverno e verão, já que as estações intermediárias como primavera e outono se mostraram bastante nocivas considerando a chegada mais rápida ou de maiores volumes, ou atingindo maior extensão da costa.

Palavras-chave: ERA, QRA, MIRA, modelagem de óleo.

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate if the quantitative environmental risk analysis (QRA) could be applied efficiently in tropical and subtropical areas as Brazil since this method was developed and was applied in developed countries in temperate, subpolar and polar areas. For this a case study was implemented at Golfinho Field utilizing the Norwegian environmental quantitative risk analysis method MIRA and the results and the method were compared with the qualitative method and the results of the previous licensing process. The result is that the MIRA method could be applied any part of the world, since there are input data to the study area, once the method is independent of climatological variables, but of the oil weathering, that is simulated inside of model. The method ratified the liberation of the Field to exploration, but it is necessary to Brazil to survey some biological and socioeconomical data to develop better this analysis type. Considering the importance of destination of oil to environmental risk analysis, should be utilized the best hydrodynamic database and the best weathering oil modeling destination model. That is especially important to extremely dynamic regions as the study area that the oil modeling contemplate at least once in each of the four seasons for year, and not only Winter and Summer, once the intermediate seasons like Spring and Autumn proved to be quite harmful considering a faster arrival of oil and bigger volumes arrived to the coast or affecting more extensions of it.

Keywords: ERA, QRA, MIRA, oil modeling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - NÚMERO DE VAZAMENTOS POR ANO E MÉDIAS DECADAIS.....	11
FIGURA 2 - ÁREA DE ESTUDO.....	18
FIGURA 3 - BATIMETRIA TRIDIMENSIONAL DA TOPOGRAFIA DA COSTA DO ESPÍRITO SANTO.....	19
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO.....	21
FIGURA 5 - ESQUEMA GENÉRICO DE UM FPSO, COM OS PONTOS/SISTEMAS SUSCEPTÍVEIS AO VAZAMENTO DE ÓLEO22	
FIGURA 6 - ESQUEMA EXPLICATIVO DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS.....	24
FIGURA 7 - SEÇÃO VERTICAL DE UM VAZAMENTO NO C2 NO INVERNO.....	28
FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO SAZONAL DA PROBABILIDADE DE PRESENÇA DE ÓLEO NA REGIÃO DE ESTUDO ASSOCIADO AO CENÁRIO DE VAZAMENTO C2.....	29
FIGURA 9 –DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO A POSIÇÃO DO VÓRTICE DE ABROLHOS, VÓRTICE DE VITÓRIA E VÓRTICE DE VITÓRIA SUL E IMAGEM DE AVHRR DEMONSTRANDO MEANDRAMENTOS DA CB COMO PARTE DE UMA ONDA DE VORTICIDADE.....	30
FIGURA 10- RESULTADO DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS PARA O VERÃO E INVERNO PARA O PRESENTE ESTUDO, CENÁRIO C2 E PARA O EIA/RIMA.....	34
FIGURA 11 - RISCO PONDERADO ENTRE SENSIBILIDADE LITORAL E VOLUME DE ÓLEO(M) PARA O CENÁRIO (C1)	36
FIGURA 12 - RISCO PONDERADO ENTRE SENSIBILIDADE LITORAL E VOLUME DE ÓLEO(M) PARA O CENÁRIO (C2)	37
FIGURA 13 - RISCO PONDERADO ENTRE SENSIBILIDADE LITORAL E VOLUME DE ÓLEO(M) PARA O CENÁRIO (C3)	38
FIGURA 14 - RISCO PONDERADO ENTRE SENSIBILIDADE LITORAL E VOLUME DE ÓLEO(M) PARA O CENÁRIO (C4)	39
FIGURA 15 - RISCO PONDERADO ENTRE SENSIBILIDADE LITORAL E VOLUME DE ÓLEO PARA O CENÁRIO (C5).	40
FIGURA 16 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C1 NO INVERNO.	42
FIGURA 17 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA C1 NO OUTONO.....	43
FIGURA 18 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA C1 NA PRIMAVERA.	44
FIGURA 19 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C1 NO VERÃO.44	
FIGURA 20 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C2 NO INVERNO.	45
FIGURA 21 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C2 NO OUTONO	46
FIGURA 22- ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C2 NA PRIMAVERA.....	47
FIGURA 23 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C2 NO VERÃO.48	
FIGURA 24 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C3 NO INVERNO.	49
FIGURA 25 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C3 NO OUTONO.	50
FIGURA 26 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C3 NA PRIMAVERA.....	51
FIGURA 27- ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C3 NO VERÃO.52	
FIGURA 28 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C4 NO OUTONO.	53
FIGURA 29 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C4 NO VERÃO.53	
FIGURA 30 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C5 NO INVERNO	54
FIGURA 31 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C5 NO OUTONO.	55
FIGURA 32 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C5 NA PRIMAVERA.....	56
FIGURA 33 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DE RISCO PARA OS AMBIENTES NO LITORAL PARA O CENÁRIO C5 NO VERÃO.57	

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - INCIDÊNCIA DE VAZAMENTOS <i>OFFSHORE</i> NO PERÍODO DE 2001-2011, POR VOLUME DE ÓLEO CRU	15
TABELA 2 - CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO BASEADO NO MEIO AMBIENTE NÃO SENDO AFETADO 95% DO TEMPO	21
TABELA 3 - CENÁRIOS ACIDENTAIS PARA UMA UNIDADE TIPO FPSO, COM DESCRIÇÃO DE PROFUNDIDADE DO VAZAMENTO, TOTAL VAZADO, PERÍODO DE VAZAMENTO E A FREQUÊNCIA (ANO^{-1}) DE OCORRÊNCIA.....	23
TABELA 4 - TABELA DE CONVERSÃO DE CÉLULA LITORAL POR CATEGORIA DE IMPACTO DE (K1-K4), CONSIDERANDO O VOLUME MÉDIO QUE ATINGIRIA A CÉLULA (RESULTADO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA ESTOCÁSTICA) E A SENSIBILIDADE LITORAL	26
TABELA 5 - TABELA DE CONVERSÃO DE SENSIBILIDADE LITORAL ASSOCIADA À MASSA DE ÓLEO MÉDIA PARA OBTENÇÃO DO TEMPO TEÓRICO DE RECUPERAÇÃO DO LITORAL.....	27
TABELA 6 - RESULTADOS QUANTITATIVOS DAS MODELAGENS PROBABILÍSTICAS POR CENÁRIO..	32

LISTA DE ABREVIações

APA – Área de Proteção Ambiental.

CGPEG – Coordenação Geral do Petróleo e Gás.

CVT – Cadeia Vitória-Trindade;

BMES – Bacia Marítima do Espírito Santo.

EIA – Estudo de Impacto Ambiental.

ERA – *Environmental Risk Analysis*.

ET – Embaiamento de Tubarão.

E&P – Exploração e Produção (de Petróleo).

FPSO – (*Floating Production, Storage and Offloading*).

IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente.

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade.

ISL – Índice de Sensibilidade Litoral.

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MIRA – *Metode Miljørettet Risikoanalyse*.

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

QRA – *Quantitative Risk Analysis*.

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental.

SAO – Sensibilidade Ambiental ao Óleo.

SL – Sensibilidade Litoral

VA – Vórtice de Abrolhos

VEC – *Valued Ecosystem Component*.

VV – Vórtice de Vitória.

VVS – Vórtice de Vitória Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 METODOLOGIA.....	17
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	17
3.2 METODOLOGIA PARA A ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS (QRA) COM O MÉTODO MIRA.....	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5 CONCLUSÃO.....	60
7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	61
ANEXO I.....	67
ANEXO II.....	68

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento na demanda energética mundial nos obriga a criar soluções para supri-la. Novas tecnologias e empreendimentos são criados em diversas áreas, como os biocombustíveis, energia solar, energia eólica, energia das ondas marinhas entre outras fontes. O petróleo além de servir como combustível, ainda é matéria-prima para diversos itens na indústria, sendo então economicamente viável e necessário explorá-lo. Essa atividade está incluída no chamado “desenvolvimento sustentável”, ou seja, o benefício econômico da sua produção ainda compensa seus passivos ambientais, desde que bem gerenciada em seus riscos ecológicos, econômicos e sociais.

Mesmo com todos os esforços para prevenção e contingência de acidentes, os vazamentos de óleo continuam acontecendo, mesmo em menor proporção e número (a Figura 1 mostra a redução progressiva dos grandes acidentes, maiores que 700 toneladas, ao longo do tempo).

No Brasil, o esgotamento contínuo das jazidas já existentes tem ocasionado a busca e o aumento da exploração em novas fronteiras oceânicas, principalmente em relação a profundidade na qual o petróleo é explorado (contabilizando-se aqui não só a coluna d’água, mas também o pacote de sedimentos), sendo locais cada vez mais de difícil acesso (como, por exemplo, o pré-sal e o pós-sal), o que dificulta o gerenciamento de riscos. Cria-se então a necessidade de novas tecnologias, ligadas principalmente à contenção do óleo vazado e a redução da probabilidade de ocorrer possíveis danos ao ambiente, à economia e à sociedade em geral. Como agravante, em sua grande maioria, estes empreendimentos se localizam próximos a ecossistemas sensíveis.

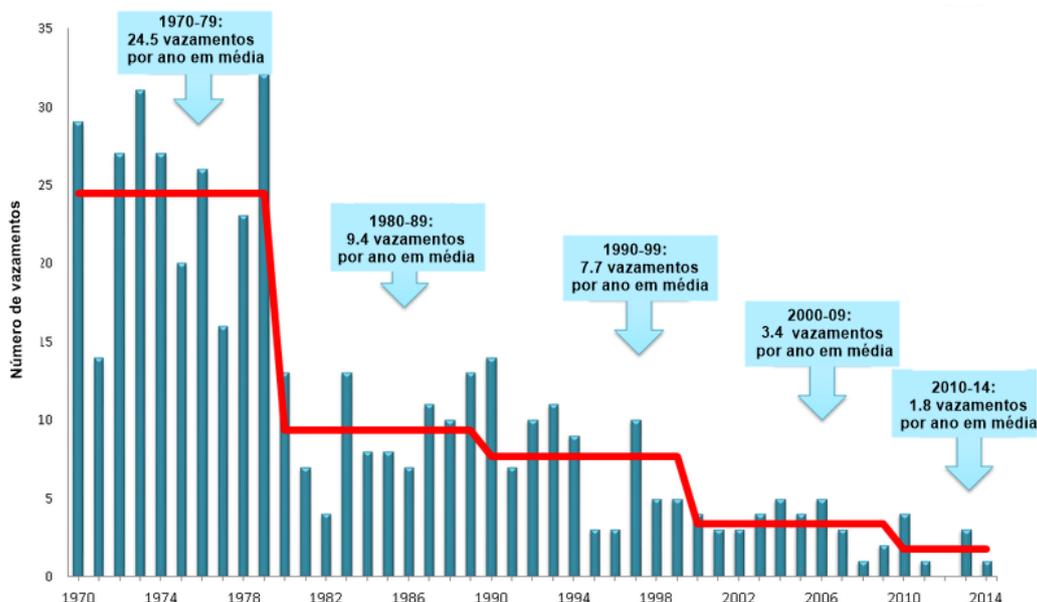


Figura 1 - Número de vazamentos por ano e médias decadais. Adaptado de ITOPF, 2015. Disponível em: <http://www.itopf.com/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>.

No acidente ocorrido em 2010, com a plataforma *Deepwater Horizon*, de responsabilidade da empresa *British Petroleum*, o volume estimado de óleo que vazou durante 84 dias foi 7790375 m³, durante o período de 84 dias (CRONE e TOLSTOY, 2010), é um exemplo que demonstra que acidentes continuam acontecendo e que nem sempre a tecnologia é capaz de controlá-los depois de ocorridos. O tempo previsto para o controle do poço era muito menor do que 84 dias, porém, as tentativas prévias de conter o vazamento fracassaram.

O derrame de óleo pode ter impactos socioeconômicos que independem de seus efeitos ecológicos, como impactos diretos sobre os estoques de pescado naturais, sobre a aquicultura, e sobre a extração de frutos do mar, ou mesmo impactos indiretos sobre a economia, quer seja pela exclusão de áreas importantes para o transporte, o turismo e outras atividades relacionadas (NISSEN-LIE e ASPHOLM, 2008). Uma emergência ambiental decorrida de um derrame de petróleo pode resultar em perdas diretas tangíveis de vidas, em prejuízos financeiros, em danos ambientais, em danos às cargas e às embarcações. Um derramamento pode levar também ao descrédito do público na segurança da atividade, perda da liberdade dos seus gerentes ou responsáveis pela atividade através de prisão, entre outras consequências negativas (ORNITZ e CHAMP, 2001) que as empresas petrolíferas querem evitar (ORNITZ e CHAMP, 2001; OLF e NOFO, 2007).

Não obstante aos problemas já descritos, outro desafio universal para os gestores dos recursos e suas equipes em um derramamento de petróleo é a composição complexa do óleo. O óleo derramado em um incidente é sempre diferente daquele de outros incidentes, o que altera o seu intemperismo e, conseqüentemente, o seu comportamento no ambiente. Mesmo que os óleos tivessem a mesma composição, os processos físicos, químicos e biológicos (intemperismo) que agem sobre o óleo derramado alteram imediatamente as características originais do petróleo (MILTON *et al.*, 2011), resultando em comportamentos distintos.

O aumento dos níveis de educação e consciência ambiental aliado a uma maior maturidade política da sociedade em geral têm incentivado às empresas a aprimorarem suas práticas de gestão de riscos, bem como órgãos ambientais a melhorarem as políticas públicas associadas ao processo de E&P de petróleo, pois a população está mais bem informada e preocupada com o meio ambiente. Apesar disso, o risco é percebido pelo público em geral como um conceito pobremente definido, com confusões entre algo envolvendo probabilidade e consequências e alguma coisa implicando em perdas monetárias ou outras perdas (MELCHERS, 2001). OLF e NOFO (2007) definem risco como “a combinação da probabilidade de ocorrência de danos e a gravidade desses danos”, e conforme esta definição que o risco será abordado neste trabalho.

Logo este novo cenário exige um cuidado maior ao se executar uma análise de riscos ambientais (ERA, sigla do inglês *Environmental Risk Analysis*), para licenciar as atividades de exploração e produção (E&P) de petróleo. Torna-se necessário usar métodos mais eficientes e inteligíveis ao

público geral.

Dentre os objetivos da análise de risco, OLF e NOFO (2007) destacam a necessidade de se proporcionar o entendimento e o conhecimento dos riscos da atividade para todos os envolvidos na parte operacional ou que possam ser afetados por ela, outro é assegurar que as incertezas da atividade sejam reduzidas. Em outro plano sugerem a gestão destes riscos, ou seja, a identificação da necessidade de adoção de medidas de redução de risco e quantificação da eficácia das medidas de redução de risco introduzidas. A fim de reduzir o risco, através de ações para diminuir a probabilidade de que um evento ocorra ou pela redução das consequências do evento já ocorrido através de medidas mitigadoras.

Outros objetivos práticos de uma análise de risco ambiental são múltiplos e suprem demandas externas que envolvem o atendimento às regras e regulamentações impostas pelas autoridades, o controle e a redução dos riscos ambientais, o uso como projetos de apoio à tomada de decisão, o fornecimento de documentação dos riscos ambientais às autoridades ambientais e a outras entidades públicas. Além disso ele pode servir como documentação para o público em geral (atores sociais, “*stakeholders*” / comunidades etc.) e estabelecer a melhor base possível para a seleção e concepção de medidas de redução de riscos, incluindo especialmente a resposta ao vazamento de óleo (OLF e NOFO, 2007).

As análises de riscos podem ser de dois tipos, qualitativa ou quantitativa. A análise qualitativa de riscos se limita a identificar os perigos com potencial de gerar riscos e as suas consequências, define possíveis cenários, riscos associados a cada cenário e suas consequências. A análise quantitativa associa a uma análise qualitativa a frequência de ocorrência dos possíveis cenários de riscos, com alguma combinação (uma função matemática, por exemplo) com probabilidade de acontecer, com graus de magnitude para os eventos em diferentes áreas da indústria.

A Análise Quantitativa de Risco (QRA – *Quantitative Risk Analysis*) foi desenvolvida inicialmente para plantas industriais de um modo geral, mas pode ser aplicada especificamente para a indústria do petróleo já que aborda desde os aspectos socioeconômicos até ecológicos. A parte ambiental é o foco deste estudo. A QRA envolve o uso sistemático de informações para identificar os riscos e as probabilidades, e prever as possíveis consequências para os indivíduos ou populações, bens ou ambiente (OLF e NOFO, 2007; SKOGDALEN e VINNEM, 2012a).

Este tipo de análise tem sido objeto de estudo e sua abordagem publicada em diversos artigos científicos que concluem que o método é mais eficiente do que os qualitativos na prevenção de acidentes (por exemplo, SØRGÅRD, 1997; SCHOFIELD, 1998; VINNEM, 1998; AVEN e VINNEM, 2005; HAAG e ALE, 2005; GEM/FOIG, 2001; BRUDE, 2007; BRUDE *et al.*, 2008; NISSEN-LIE e ASPHOLM 2008; SKOGDALEN e VINNEM, 2011; SKOGDALEN e VINNEM, 2012a; SKOGDALEN e VINNEM, 2012b; LIBRE *et al.*, 2012; entre outros) ou para locais com

ecossistemas complexos e sensíveis (LIBRE *et al.*, 2012).

Um exemplo da evolução de uma análise qualitativa para quantitativa ocorreu na Noruega no final do século passado. Regras internacionais mais rigorosas para licenciamento de atividades petrolíferas foram desenvolvidas na Noruega, em 1976 e incluíram uma análise qualitativa, conhecidas como *Integrated Production, Drilling and Quarters* (Produção, perfuração e armazenamento integrados) pelo órgão *Novergian Petroleum Directorate* (Diretório de Petróleo Norueguês). Os acidentes de grandes proporções que ocorreram na década de 1970 fizeram com que a partir de 1981 o órgão norueguês regulador da análise para o licenciamento da atividade petrolífera offshore demandasse o uso de QRA nesta atividade industrial através da introdução do o "*Guidelines for Safety Evaluation of Platform Conceptual Design*" (Diretrizes para Avaliação de Segurança de Plataforma, Projeto Conceitual). Os resultados desta aplicação foram estudos que ficaram conhecidos como *Concept Safety Evaluations* (Avaliações conceituais de segurança). O Reino Unido passou a adotá-lo logo em seguida. A considerável queda no número de acidentes no Reino Unido fez com que outros países também adotassem essas medidas, sendo eles a Austrália, o Canadá, Brunei e a Nova Zelândia (BRANDSAETER, 2002).

Até recentemente no Brasil o IBAMA (órgão ambiental nacional), através do CGPEG (Coordenação Geral do Petróleo e Gás), tem exigido somente as análises qualitativas para o licenciamento ambiental de atividades de E&P de petróleo. As análises qualitativas são bons descritores dos cenários, das atividades e do ambiente, porém não representam com qualidade o dimensionamento do risco em relação a cada cenário. Essas análises não abordam, por exemplo, o fato de que o cenário de pior caso tem na maioria das vezes uma frequência de ocorrência estatisticamente muito pequena. No caso do campo de Golfinho, foi considerado pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente, o maior volume possível de vazamento, no caso de FPSO (unidade flutuante de produção, estocagem e transferência, da sigla em inglês "*Floating Production, Storage and Offloading*"), o vazamento total do FPSO). Isto pode gerar um exagerado rigor para o não licenciamento, o que geraria um entrave à atividade econômica, já que não justificaria a proporção do risco e acabaria sendo uma ameaça ao desenvolvimento sustentável.

A análise qualitativa também não representa claramente os riscos intermediários e o quanto estes podem ser controlados utilizando medidas de redução de risco. Isto porque a análise qualitativa não considera a frequência de ocorrência daqueles eventos. Neste caso, subestima-se o potencial dos acidentes que proporcionam vazamentos de óleo médios ou menores, que são os mais frequentes (como pode ser observado na Tabela 1) e por ter maiores frequências acabam se tornando capazes de causar maiores prejuízos ambientais devido sua maior recorrência (ITOPF, 2009).

As análises qualitativas descrevem a sensibilidade do ambiente e a representa de modo expositivo, mas não a quantifica, tornando-se muito simplistas quando se trata de ambientes

complexos e de difícil visualização. Essas análises não representam as variáveis descritas integrando as informações (óleo, sensibilidade ambiental, socioeconomia entre outros), o que resulta em uma tediosa e extensa lista de tabelas e textos desconexos e de difícil interpretação global.

Tabela 1 - Incidência de vazamentos *offshore* no período de 2001-2011, por volume de óleo cru (SEAPOP, 2013).

Volume vazado (toneladas)	Mar do Norte	Mar da Noruega	Mar de Barents	Soma dos vazamentos
<10	347	153	1	501
10 - 100	5	6	0	11
100 - 1000	0	2	0	2
>1000	1	0	0	1

As avaliações qualitativas se tornam subjetivas, pois não existem padrões ou critérios de fácil visualização que definam limites aceitáveis para impactos ambientais, sociais e econômicos e que forneçam um suporte para o gerenciamento do risco. Torna-se necessário ao processo de licenciamento brasileiro associar uma ferramenta que seja mais clara, para o público geral, de o porquê licenciar ou não um empreendimento na área de óleo e gás, bem como que associe de forma mais quantitativa e não somente descritiva a questão ambiental.

A análise quantitativa proporciona a produção de resultados gráficos com resultados integrados, sendo mais inteligíveis para o público em geral, que é quem deve ser atendido no licenciamento ambiental de uma atividade que pode causar impactos no seu ambiente, na socioeconomia, enfim, diretamente na qualidade de vida da população.

Uma Análise Quantitativa de Riscos (QRA) associada a um critério de tolerabilidade de riscos pode suprir essa demanda. O método MIRA (“Método de análise ambiental de riscos”, sigla proveniente do norueguês “*Metode Miljørettet Risikoanalyse*”), desenvolvido por OLF e NOFO (2007), abrange as duas abordagens. Uma abordagem baseada na exposição do ambiente e outra baseada em danos ao ambiente. O método foi baseado principalmente em observações do histórico de impacto de acidentes das últimas décadas e na literatura científica sobre o comportamento biológico das espécies potencialmente afetadas (LIBRE *et al.*, 2012).

O método MIRA utiliza três níveis de análise. No primeiro nível, ele aplica uma análise que os autores nomeiam de “análise baseada em referência”. Esta primeira etapa é que identifica os riscos por célula baseado na sensibilidade do litoral, no volume de óleo por célula em uma modelagem probabilística, e no uso ocupação (socioeconomia). Em uma segunda etapa, o método agrega frequências acidentais (frequências dos eventos centrais) aos resultados da primeira etapa, produzindo uma matriz de riscos (gráfico de frequência de ocorrência x gravidade

dos danos) para expressar os riscos em relação ao que é inaceitável ou de primeira prioridade (acima do critério de tolerabilidade), e o que está na região de riscos aceitáveis ou toleráveis, sempre considerando que se cumpram medidas para torná-lo o mais baixo possível, baseados na sua frequência de ocorrência (abaixo do critério de tolerabilidade). Em uma terceira e mais profunda abordagem, tem-se a etapa 3, chamada “baseada em danos”. Nesta etapa, o método utiliza como ferramenta os componentes de valor ecossistêmico (*Valued Ecosystem Component - VEC*), ou também conhecidos como componentes com valor ambiental – CVA (CARDOSO e VAROVESKA, 2012) para dimensionar impactos ambientais. O método pode ser desenvolvido somente na primeira etapa, primeira e segunda etapa ou todas as três etapas, de acordo com a disponibilidade de dados na área de estudo.

Um VEC é definido como um elemento que é importante para a população local, nacional ou internacional (não só economicamente, mas ecologicamente, socialmente ou culturalmente) com presença significativa na área de risco, sensível ao óleo, que é usado como indicador em uma análise ambiental. Espécies presentes em lista vermelha (lista de risco de extinção) a nível nacional, internacional ou espécies endêmicas, podem ser selecionadas como VEC's (OLF e NOFO, 2007; NISSEN-LIE e ASPHOLM, 2008; VAROVESKA *et al.*, 2012; CARDOSO e VAROVESKA, 2012; LIBRE *et al.*, 2012).

Os VEC's são analisados em relação às suas vulnerabilidades, sejam individuais ou em termos de população. As vulnerabilidades estão ligadas ao tempo de recuperação das áreas degradadas, a sensibilidade das espécies ao poluente, e são determinadas pela estratégia de alimentação, habitat, endemismo, mobilidade, capacidade de resiliência da população em número de indivíduos depois de uma redução do tamanho da população.

As QRA, especialmente o MIRA, é o método adequado para se lidar com sistemas complexos e naturalmente variáveis, tais como manguezais, em relação ao transporte e ao intemperismo do óleo na superfície do oceano (LIBRE *et al.*, 2012). Este tipo de ambiente está presente na área de estudo bem como ao longo de toda a costa brasileira, que possui uma grande diversidade de ambientes (MMA, 2010).

Uma vez que o método MIRA considera a questão ambiental de forma quantitativa através de indicadores de vulnerabilidade, a hipótese do estudo é que este método quantitativo de risco seja o mais adequado para tratar a diversidade da costa brasileira em detrimento a um método puramente qualitativo, o qual facilitaria o processo de tomada de decisão ao estabelecer critérios de aceitabilidade e o entendimento da análise e o processo de licenciamento ambiental da atividade de E&P brasileira.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicabilidade de um método quantitativo de riscos ambientais (MIRA) a uma situação de licenciamento ambiental na atividade de E&P no Campo de Golfinho.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 – Comparar os resultados das modelagens do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) aprovado e as produzidas neste estudo;
- 2 – Discutir os resultados do método MIRA com os resultados do processo de licenciamento ambiental qualitativo;
- 3 – Avaliar se a análise de risco através do uso do MIRA ratifica o resultado qualitativo produzido no EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto Ambiental) já aprovado pelo IBAMA.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a Bacia Marítima do Espírito Santo (BMES) na qual está inserida a região do Embaiamento de Tubarão e localizado o Campo de Golfinho, operado pela Petrobrás. A exploração deste campo iniciou em 2006 quando a FPSO Capixaba começou a operar (20°00'7,54"S e 39°33'32"W – Figura 2). Posteriormente, a exploração também foi realizada pela FPSO Cidade de Vitória, em 2010. A exploração ocorre no pós-sal da Bacia do Espírito Santo, e as FPSO's estão localizadas a 50 km do continente, sendo o primeiro poço em produção em águas profundas da Bacia do Espírito Santo (PETROBRÁS, 2011).

Esta área de estudo foi escolhida por ser um campo já licenciado com dados disponíveis sobre o óleo e o empreendimento com acesso público para análise e comparação entre a metodologia qualitativa realizada pelo EIA e os resultados quantitativos produzidos neste estudo.

O empreendimento compreende o desenvolvimento da Fase de Produção de hidrocarbonetos no

Campo de Golfinho, utilizando-se a unidade de produção FPSO Capixaba, e exportação de gás natural para o continente através de gasoduto de 12 polegadas (CEPEMAR, 2006a).

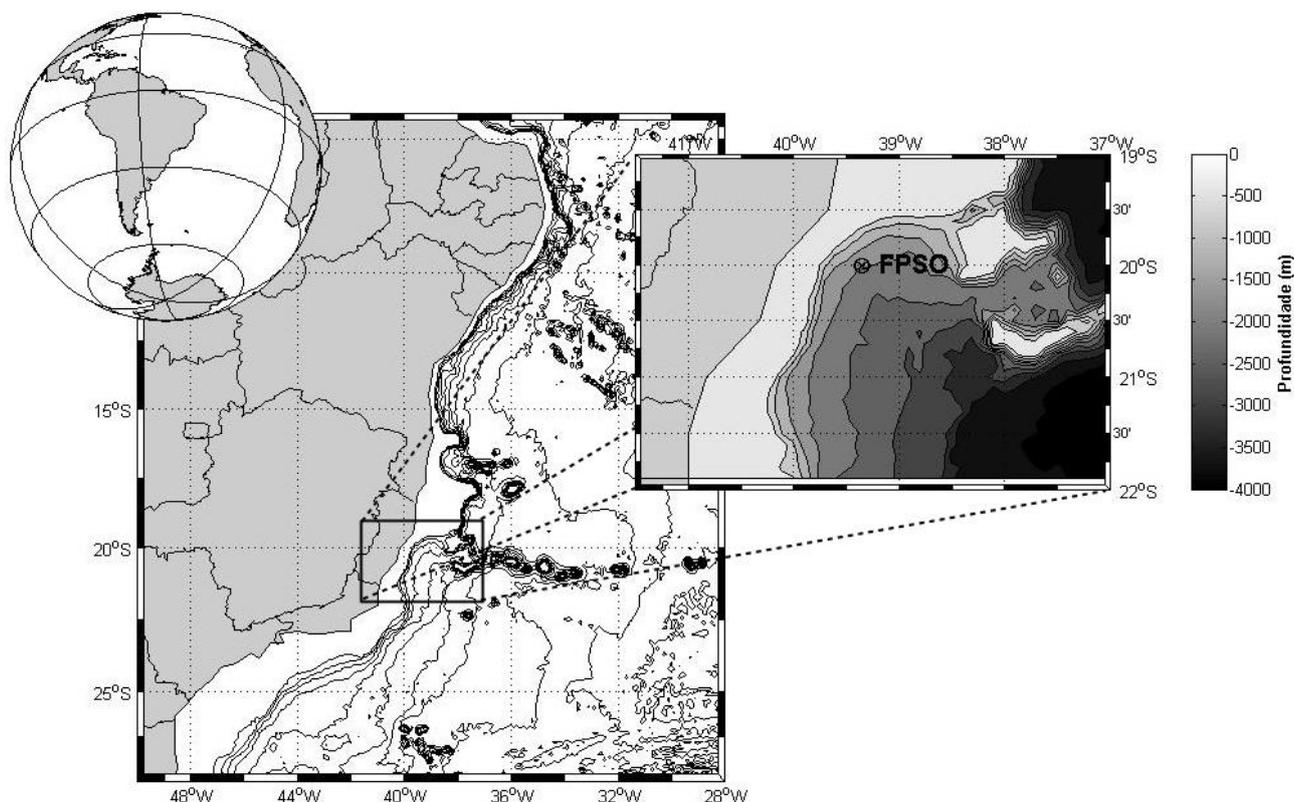


Figura 2 - Área de estudo. Em destaque o Embaiamento de Tubarão e a localização do ponto de vazamento, identificado como FPSO.

O campo de Golfinho está abaixo de uma coluna de água que varia entre 1300 e 1640 m, e consiste em dois reservatórios, um da idade Campaniano com óleo 40° API e outro, Maastrichtiano com óleo 28° API, ambos de elevado valor comercial, baixos níveis de enxofre e parafínicos. Os reservatórios são separados por falhas normais e de transferência e são encontrados em profundidades de 3000 e 5000 m. Eles consistem de conglomerados, diamictitos e de arenito de granulometria muito grossa. O petróleo é encontrado em uma estrutura complexa de canais turbidíticos amalgamados. O reservatório também contém gás em um reservatório da idade Santoniano (OFFSHORE TECHNOLOGY, 2013).

O óleo produzido é escoado através de navios aliviadores, enquanto o gás natural é exportado para o continente até a Unidade de Tratamento de Gás de Cacimbas, localizada no município de Linhares – ES, através de um gasoduto de 12 polegadas de diâmetro e 69,64 km de extensão, sendo 66.340 metros no ambiente marinho e 3.300 metros em área terrestre (CEPEMAR, 2006a).

Dependendo de sua extensão e condições ambientais, um vazamento de óleo no Campo de Golfinho poderia atingir a região do Banco de Abrolhos (Figura 3) e a região da APA (Área de Proteção Ambiental) Costa das Algas. Esses ambientes possuem grande sensibilidade, com a presença bancos de rodolitos e em Abrolhos também de recifes mesofóticos, cuja distribuição foi

descrita por Moura *et al.*, (2013). O vazamento também poderia atingir a região da Cadeia Vitória Trindade, onde similarmente foram documentados extensivos bancos de rodólitos por PEREIRA-FILHO *et al.*, (2012). A Cadeia Vitória Trindade (Figura 3) possui muitos aspectos básicos de sua biodiversidade ainda desconhecidos, bem como, em relação às comunidades de peixes, um alto grau de endemismo nas ilhas e um grande número de espécies ameaçadas nos montes submarinos (PINHEIRO *et al.*, 2015). Caso um vazamento atingisse estas áreas sensíveis citadas, poderia ter consequências catastróficas para o meio ambiente.

Na Figura 3 podemos observar a batimetria da área de estudo, com todas as suas particularidades, variações na extensão da plataforma continental, bem como a presença de montes submarinos e ilhas.

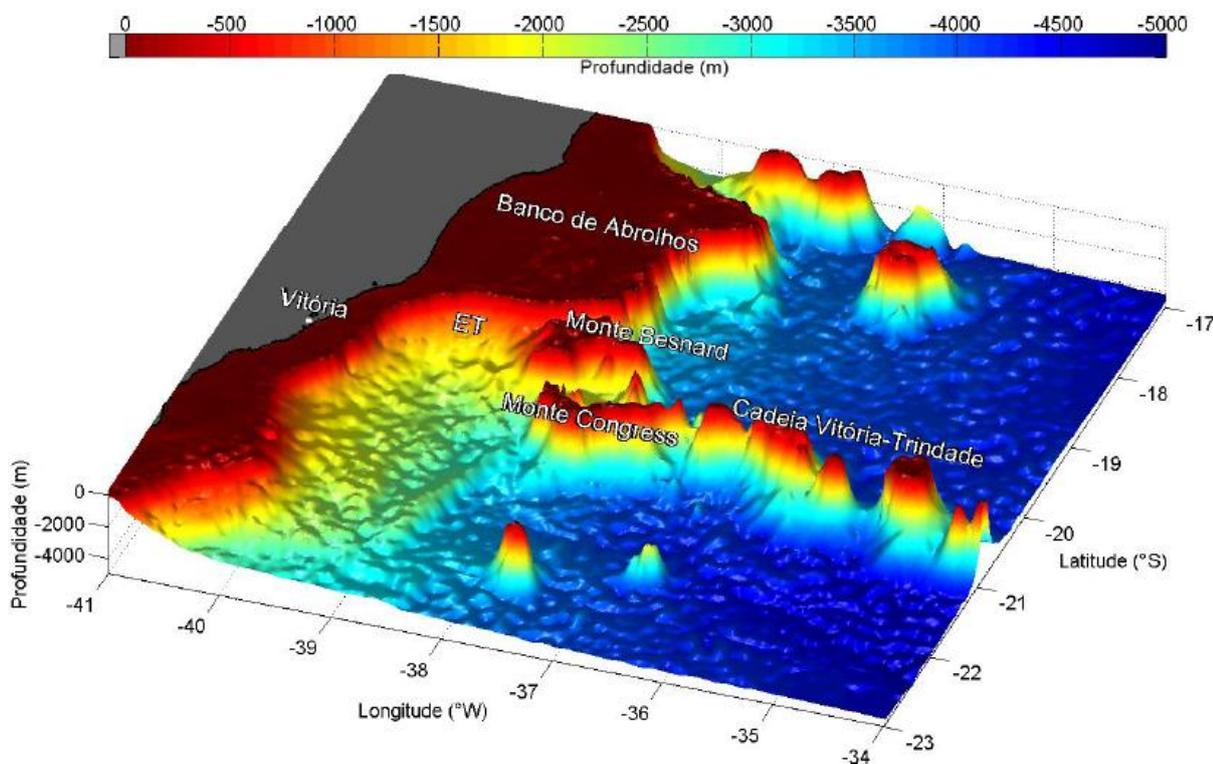


Figura 3 - Batimetria tridimensional da topografia da Costa do Espírito Santo mostrando as principais feições geomorfológicas da região, com base no ETOPO 1. Fonte: Servino (2014).

De acordo com o Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo da Bacia do Espírito Santo (GHERARDI e CABRAL, 2010), o litoral da BMES apresenta diversidade de paisagens, e pode ser classificado em quatro principais fisiografias naturais:

- 1) Litoral dos costões rochosos – extremamente recortado com praias e planícies limitadas com promontórios rochosos.
- 2) Litoral de baías, estuários e manguezais;
- 3) Litoral de falésias e praias precedidas por terraços de abrasão marinha sedimentar;
- 4) Litoral de planícies fluvio-costeiras, associadas à desembocadura dos rios;

Os substratos de sensibilidade máxima (ISL 10) compreendem 33% do litoral da BMES, seguido dos substratos de baixa sensibilidade (ISL 1 e 2), que compreendem 23,15%, os substratos intermediários (ISL 3 a 5) englobam as praias de areia média a grossa com 21,43%; os substratos com alta sensibilidade (ISL 7 a 9) são encontrados em ambientes de baixa energia hidrodinâmica (ex., terraços de baixa-mar e enrocamentos abrigados) e perfazem 15,77% do total. Esses ambientes se encontram espacialmente fragmentados, o que ocorre também com os terraços cobertos por concreções lateríticas e enrocamentos expostos (ISL 6) que são 6,65% do total dos ambientes descritos (GHERARDI e CABRAL, 2010).

No desenvolvimento deste estudo, os dez níveis do Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL) propostos na metodologia desenvolvida pela NOAA (NOAA, 1997) foram reagrupados em 3 classes (aqui denominados de SL – Sensibilidade Litoral) de acordo com aqueles usados nas Cartas estratégicas no Carta SAO (GHERARDI e CABRAL, 2010). Esse rearranjo foi necessário para se adequar-se a metodologia do método MIRA. O SL1 agrupa os ISL's de 1 a 4 e foi classificado como sensibilidade litoral baixa; o SL2 é de sensibilidade média e reuniu os ISL de 5 a 7; e o SL3 de sensibilidade alta reuniu os ISL de 8 a 10. Uma descrição sumarizada dos ambientes de acordo com a Sensibilidade Litoral é apresentada no Anexo 1, enquanto que uma descrição de como o óleo se comporta nestes ambientes e a justificativa para esta reclassificação pode ser encontrada em Gherardi e Cabral (2010).

Em relação aos recursos biológicos, há uma variada e rica fauna ao longo da costa capixaba, favorecida pela diversidade de habitats costeiros que estão disponíveis à colonização. Nas Cartas SAO, não há uma distribuição quantitativa dos recursos biológicos, mas somente uma descrição qualitativa.

Para uma descrição completa das fisiografias naturais, bem como da presença de áreas de preservação e reservas ecológicas, dos recursos biológicos incluindo espécies endêmicas e ameaçadas de extinção e da descrição das atividades econômicas aqui desenvolvidas, o leitor encontrará em GHERARDI e CABRAL, (2010).

3.2 METODOLOGIA PARA A ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS (QRA) COM O MÉTODO MIRA;

O método MIRA é desenvolvido basicamente em 7 passos, a saber:

1 - definição dos critérios de aceitação;

2 - descrição do empreendimento;

- 3 - estabelecimento da estimativa de probabilidade de eventos adversos;
- 4 - estabelecimento de um número suficiente de combinações prováveis de duração e descarga – taxa de vazamento na avaliação dos riscos ambientais;
- 5 - Cálculos de destino de óleo;
- 6 - Implementação dos cálculos de danos;
- 7 - Calculo do risco ambiental.

Para facilitar o entendimento, foi criado um fluxograma explicativo (Figura 4), que apresenta o que são os dados de entrada, o que são os resultados deste trabalho.

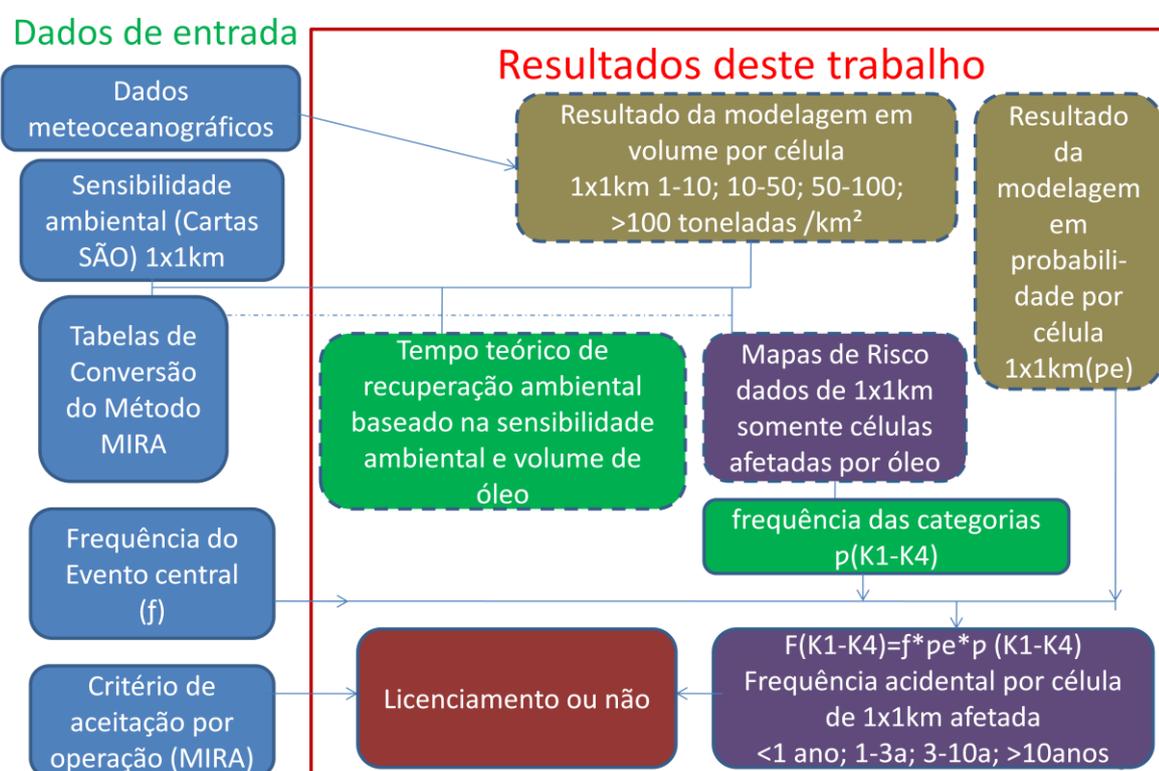


Figura 4 - Fluxograma metodológico, com os dados de entrada e os resultados atingidos por este trabalho.

Os critérios de aceitação utilizados neste estudo foram os descritos em OLF e NOFO, (2007), conforme Tabela 2:

Tabela 2 - Critério de aceitação baseado no meio ambiente não sendo afetado 95% do tempo (adaptado de OLF e NOFO, 2007).

Designação	Categoria de Consequência			
	Menor	Moderado	Significante	Sério
Duração recomendada nos cálculos	0.1-1 ano	>1-3 anos	>3-10 anos	>10 anos
Critério de aceitação específico por Campo (frequência/ano)	$2,5 \times 10^{-2}$	$8,5 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$1,25 \times 10^{-3}$

Os critérios de aceitação são as frequências anuais máximas com as quais podem recorrer danos

por óleo nas células litoral, deve ter uma frequência menor que o critério de aceitação pré-definido. Esses critérios são criados baseados no meio ambiente sendo afetado em 95% do tempo, ou seja, se a frequência for menor que o critério, o ambiente é afetado em no máximo 5% do tempo. Por isso nas categorias de consequência, os valores do critério são diferentes, porque a duração da perturbação é diferente, ou seja, de 01.1-1 ano (menor), de 1-3 anos (moderado), de 3-10 anos (significante) ou maior que 10 anos (sério), estes que seriam os 5% do tempo em que o ambiente é afetado. Esses dados completam a etapa 1 do método MIRA.

A descrição completa do empreendimento, passo 2 do método MIRA, encontra-se na seção Área de estudo (item 3.1).

A partir de dados históricos relativos aos possíveis cenários, é possível estabelecer as frequências de ocorrência (frequência do evento central) para a análise quantitativa de riscos ou então deve ser utilizada a Análise de Árvore de Falha (AAF ou *Fault Tree*) para estimar as frequências de ocorrência. A identificação e a determinação da frequência do evento central estão além das capacidades de um oceanógrafo. Desta forma, neste estudo, foram utilizados os cenários acidentais e frequências dos eventos centrais para um FPSO já identificados e estimadas no trabalho de Libre *et al.*, (2012) (Tabela 3). Conforme especificado na Figura 5, as estruturas/sistemas susceptíveis ao vazamento:

- 1 – vazamento na torre do riser;
- 2 – vazamento decorrente de perda de controle de poço;
- 3 – vazamento no 1º estágio de separação;
- 4 – Circulação do óleo;
- 5 – vazamento no sistema de escoamento do óleo.

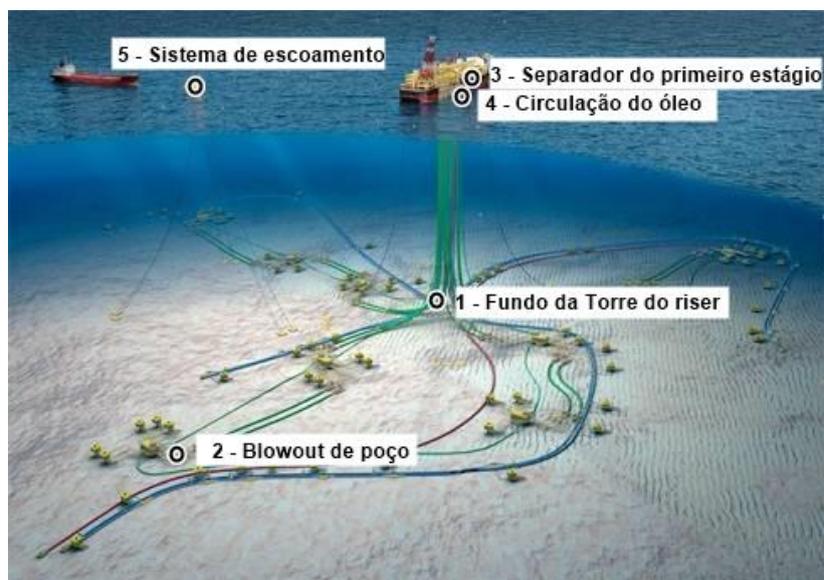


Figura 5 - Esquema genérico de um FPSO, com os pontos/sistemas susceptíveis ao vazamento de óleo conforme proposição de Libre *et al.*, (2012).

Na Tabela 3 são apresentadas as frequências de ocorrência de eventos adversos (frequências centrais) dos cinco cenários de vazamento identificados e as respectivas combinações prováveis de duração e descarga utilizadas no presente estudo. Essas definições contemplam as etapas 3 e 4 do método MIRA.

Tabela 3 - Cenários acidentais para uma unidade tipo FPSO, com descrição de profundidade do vazamento, total vazado, período de vazamento e a frequência (ano⁻¹) de ocorrência para cada um dos cinco cenários propostos (adaptado de LIBRE *et al.*, 2012)

ID cenário	Localização do vazamento	Superfície/fundo	Volume total vazado m ³	Duração	Frequência (ano ⁻¹)
C1	Base da torre do <i>riser</i>	Submarino (~1460m)	283	34 min	2,63 x 10 ⁻⁶
C2	Perda de controle de poço	Submarino (~1460m)	178860	45 dias	1,30 x 10 ⁻⁵
C3	Separador do primeiro estágio	Superfície	22198	31min	1,06 x 10 ⁻⁵
C4	Circulação do óleo	Superfície	167	40 min	5,66 x 10 ⁻³
C5	Sistema de escoamento do óleo	Superfície	5017	31min	3,48 x 10 ⁻⁴

A etapa 5 do método corresponde a simulação numérica do destino de óleo vazado. Nesta simulação foi usado o modelo OSCAR® (Vazamento de óleo, contingência e resposta, sigla do inglês “*Oil Spill Contingency and Response*”), produzido pela SINTEF *Applied Chemistry*, que usa partículas para simular o transporte, o comportamento e os efeitos dos derrames de poluentes no ambiente. O OSCAR® é uma ferramenta para quantificar as consequências ambientais de derramamento de óleo e a eficácia de várias estratégias de contingência/resposta. O OSCAR® computa o destino e a desagregação do óleo, os potenciais efeitos biológicos, além de servir como suporte às análises de derramamentos de substâncias perigosas e os impactos biológicos, o planejamento de contingência e as análises estocásticas de risco (REED *et al.*, 2012). O modelo OSCAR® foi escolhido devido à necessidade metodológica de resultados probabilísticos para o QRA e devido a sua abordagem em relação ao intemperismo, que é a mais completa em termos de modelos na atualidade.

Ao implementar o modelo foi utilizada uma grade com resolução espacial de 1x1 km, definida entre os limites 44°11'W - 23°55'S (limite inferior esquerdo) e 35°13'W - 15°16'S (limite superior direito), perfazendo um total de 898583 células (937 na direção vertical e 959 na direção horizontal), escolhida com base nos dados ambientais disponíveis. O tipo de óleo considerado foi o mesmo do EIA, Maastrichtiano, com grau API 27,5. Na ausência de informações sobre a composição deste óleo, optou-se por inserir um perfil composicional disponível no banco de dados do modelo, o perfil de óleo cru “Alaskan North Slope”.

Em relação à modelagem de destino do óleo, foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada na modelagem: 4000 partículas, líquidas e sólidas, e 4000 partículas dissolvidas, além de 100 partículas gasosas. A grade de concentração abrangeu de 0-2200 metros de profundidade, com limite de espessura superficial do óleo de 0.1 mm e espessura terminal de 0.001mm. O passo de tempo do modelo foi de 10 minutos, e a saída de resultados a cada 2 horas de tempo de simulação. A deposição do óleo no sedimento do fundo oceânico não foi avaliada.

Seguindo as recomendações do método MIRA, as simulações foram elaboradas de acordo com as 4 estações do ano assim separadas: verão (janeiro a março), outono (abril a junho), inverno (julho a setembro) e primavera (outubro a dezembro). As simulações foram estocásticas e multianuais considerando os anos de 2008 e 2009. No total foram obtidas 20 simulações probabilísticas – conforme a Figura 6 - (ou seja, quatro para cada um dos cenários de vazamento – Tabela 3), sendo que cada um dos campos probabilísticos foi o resultado de 300 simulações por estação do ano com duração de 30 dias cada.

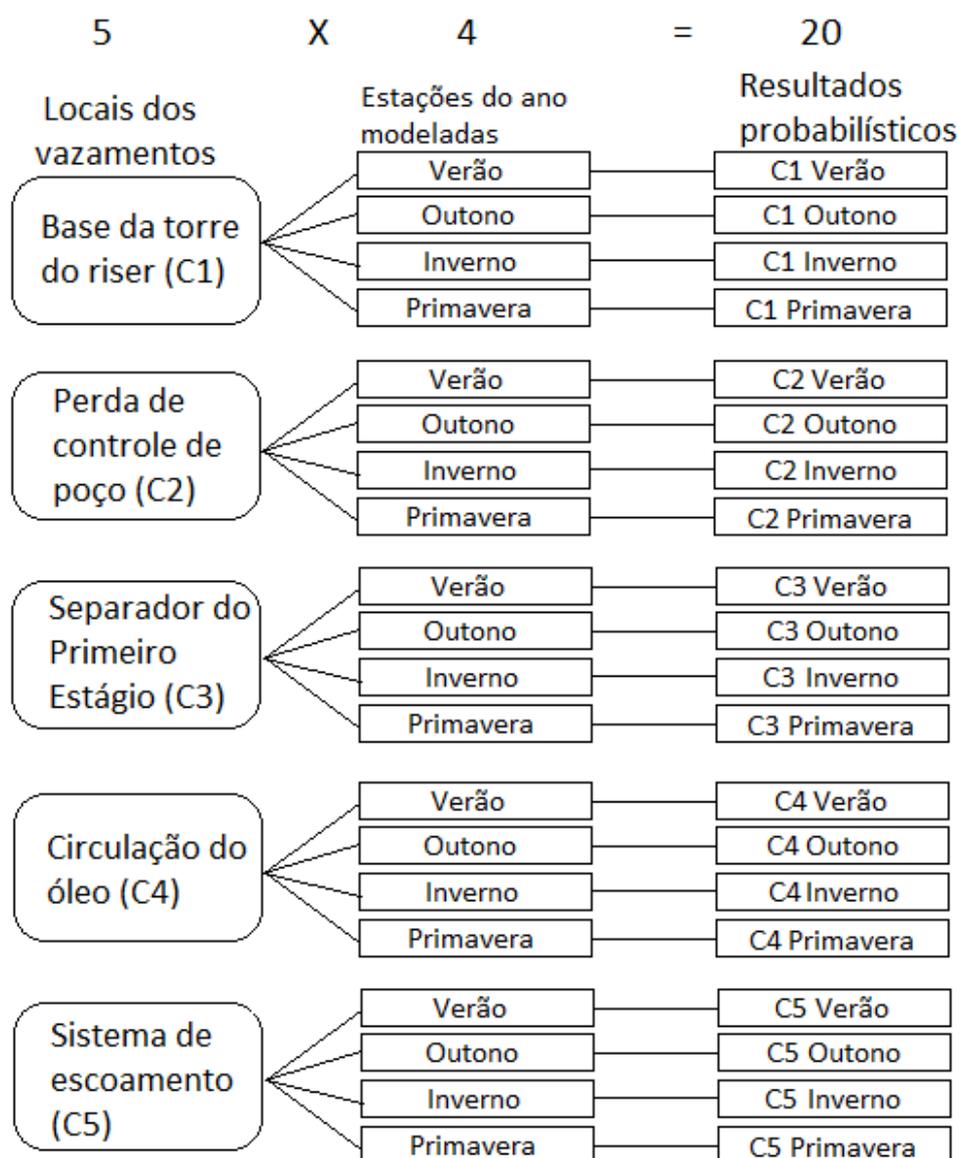


Figura 6 - Esquema explicativo das simulações probabilísticas que foram realizadas neste estudo.

Como dado de entrada no modelo foi caracterizado o ambiente físico (dados como batimetria, linha de costa, ventos, correntes, material em suspensão, oxigênio dissolvido, salinidade, temperatura). As informações sobre a velocidade da corrente foram produzidas em uma simulação regional desenvolvida com o modelo numérico HYCOM (Modelo oceânico de coordenadas híbridas, sigla do inglês, *HYbrid Coordinate Ocean Model*), no escopo do Projeto REMO (Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica) pela equipe da COPPE/UFRJ, cujo domínio compreende as coordenadas 10°N a 45°S e 60°W a 18°W. O HYCOM é um modelo de circulação oceânica global de equações primitivas que usa coordenadas híbridas para melhor representar a coordenada vertical (BLECK *et al.*,1992) . Esse modelo tem sido usado com sucesso em estudos de dinâmica oceânica global e regional (e.g. Chassignet *et al.*,(2003), Hogan (2004), Thacker *et al.*, (2004), Campos (2006), Pimentel (2012), Santos (2012) e Servino (2014).

No caso específico deste conjunto de dados, a validação dos resultados foi realizada por Servino (2014), que comparou os valores de transporte de volume da CB na região de estudo com dados *in situ* disponíveis na literatura. O autor concluiu que os resultados numéricos eram representativos e adequados.

Campos diários tridimensionais de velocidade de 21 camadas híbridas com resolução espacial de 1/24° foram transformados em coordenadas Z (profundidades padrão) e incorporados no modelo OSCAR. As informações das componentes x e y da intensidade do vento implementadas no OSCAR foram as mesmas utilizadas na simulação numérica do modelo HYCOM e correspondem ao resultado da reanálise de 4 campos diários de vento do NCEP/NOAA, com resolução espacial de 2,5°. Utilizou-se o fator de 1,5% para transformar o valor da intensidade do vento em intensidade da corrente superficial, uma vez que a forçante tensão de cisalhamento já havia sido imposta na simulação numérica do modelo HYCOM. Adicionalmente, foram incorporados perfis verticais da concentração de oxigênio dissolvido, temperatura e salinidade da água do mar oriundos de campos climatológicos do *World Ocean Atlas 2013* (WOA, 2013). Os dados de material em suspensão foram obtidos de Valentin (2007). Finalmente, os dados batimétricos foram da base de dados Sea Topo 8.2, grade IBCAO, com resolução 2 km.

No passo 6 do método, foram identificadas as áreas da costa com probabilidade de ser atingidas pelo óleo derramado e conseqüentemente identificados os VEC's passíveis de contaminação por óleo, bem como as classes de SL (Sensibilidade do Litoral) das áreas atingidas. Uma vez identificados os VEC's, eles deveriam ser avaliados quanto à sensibilidade a contaminação por óleo, abundância e tempo de recuperação de acordo com consulta a publicações científicas, baseados em dados históricos e/ou experimentais ou em dados já desenvolvidos no método MIRA (que trabalha com chaves de danos), para definir quais elementos devem ser usados como indicadores. Porém não existem dados suficientes em nível de espécies e população, então foi desenvolvido o método até o nível de exposição de habitats.

Para concluir a etapa 7 do método, foram utilizadas quatro categorias de severidade de danos baseados no tempo de recuperação que foram expressos em matriz que representa frequência de danos *versus* severidade de danos para avaliar se os riscos estão dentro do aceitável (menores que o critério de aceitação para um ambiente sem impacto em 95% do tempo), conforme a Tabela 2.

O primeiro passo é combinar a sensibilidade litoral (SL) da célula com a exposição ao óleo em relação ao volume que atinge a referida célula (conforme a Tabela 4, de acordo com o MIRA).

Tabela 4 - Tabela de conversão de célula litoral por categoria de impacto de (K1-K4), considerando o volume médio que atingiria a célula (resultado da simulação numérica estocástica) e a sensibilidade litoral, neste caso utilizada a Carta SAO. Adaptada de OLF e NOFO, (2007).

Volume de óleo na célula de 1x1 km ²	Sensibilidade litoral		
	SL1	SL2	SL3
M1: 1-10 toneladas	K1	K1	K2
M2: ≥10-50 toneladas	K2	K2	K3
M3: ≥50-100 toneladas	K3	K3	K4
M4: > 100 toneladas	K3	K4	K4

Foram definidas 4 categorias de volume de óleo por célula (M1, M2, M3 e M4), e 3 categorias de sensibilidade ambiental do litoral, baixa (SL1), moderada (SL2) e elevada (SL3), resultando em um potencial efeito combinado dado em quatro magnitudes (K1, K2, K3 e K4), conforme a Tabela 4. Observe que no MIRA a célula é de 10 km² e no presente estudo, 1km², por isso os valores para as categorias foram adaptados. O raciocínio considerado é tal que uma maior quantidade de óleo por célula, ou uma maior sensibilidade litoral definiria um conseqüente maior impacto ambiental associado.

A partir da Tabela 4, as células atingidas pelo óleo derramado são categorizadas em grau de vulnerabilidade, do nível K1 até K4. A partir do número total de células atingidas é calculado um percentual para cada uma dessas categorias, sendo que a soma de todas as células é 1 (100%).

De posse desta categorização é estimada a frequência do dano por estação do ano (OLF e NOFO, 2007) (Equação 1):

$$F(K1 - K4) = f * pe * p(K1 - K4) \quad (\text{Equação 1})$$

onde $F(K1 - K4)$ é a frequência do dano por estação do ano;

f é a frequência do evento central (valores discriminados na Tabela 3);

pe é a probabilidade da célula ser exposta à óleo, obtido a partir dos resultados da simulação numérica;

$p(K1 - K4)$ é a probabilidade de cada categoria de impacto.

Na etapa seguinte se associa o tempo teórico de recuperação ambiental através de uma tabela de conversão (Tabela 5), baseado no volume de óleo que atinge a célula e no índice de sensibilidade litoral. Estes valores são baseados nas estatísticas históricas do petróleo e em estudos prévios, abordados por OLF e NOFO, (2007), no Manual que compõe o método MIRA.

Tabela 5 - Tabela de conversão de sensibilidade litoral associada à massa de óleo média para obtenção do tempo teórico de recuperação do litoral, baseado em estudos prévios e estatísticas operacionais de petróleo (OLF e NOFO, 2007).

Classe de Vulnerabilidade Ambiental*	Tonelada métrica por 1km ² (célula)	Menor (0.1 - 1 ano)	Moderado (1-3 anos)	Considerável (3-10 anos)	Sério (>10 anos)
SL3	1-10	20%	50%	30%	
	≥10-50	10%	60%	20%	10%
	≥50-100		20%	50%	30%
	>100			40%	60%
SL2	1-10	60%	40%		
	≥10-50	30%	60%	10%	
	≥50-100	10%	60%	30%	
	>100		40%	50%	10%
SL1	1-10	80%	20%		
	≥10-50	60%	40%		
	≥50-100	40%	50%	10%	
	>100	20%	40%	40%	

Utilizando a Tabela 5, os resultados foram distribuídos do total de células atingidas pela mesma categoria de óleo em uma determinada SL, nos percentuais indicados na mesma. Por exemplo, se em determinado cenário 10 células com SL1 forem atingidas por um volume entre 1-10 toneladas métricas, 8 terão tempo de recuperação entre 0.1 e 1 ano e 2 entre 1 e 3 anos. Assim se obtém o tempo de recuperação teórico, organizado em 4 níveis de severidade de danos, da seguinte forma: menor (0.1-1 ano), moderado (1-3 anos), Considerável (3-10 anos) e sério (>10 anos).

Com estes procedimentos, tem-se o tempo de recuperação teórico e a frequência accidental por célula com probabilidade de ser atingida pelo vazamento de óleo. Com estes dados foram construídos gráficos (matriz) de frequência versus severidade de danos (baseados no tempo teórico de recuperação do ambiente).

A vulnerabilidade por hidrocarbonetos pode abranger ambientes, conforme os SL, ou em nível de população ou espécie. Infelizmente há uma escassez de dados biológicos quantitativos de distribuição mais refinada para a costa do Espírito Santo. As tartarugas marinhas são os componentes de valor ecossistêmico dos quais se têm mais informações sobre a sua distribuição geográfica, principalmente no que se refere a localização das nidificações. Infelizmente estes dados estão divididos em diversos órgãos públicos e privados o que dificultou sua obtenção, e a sua obtenção tardia aliada a falhas de georreferenciamento nestes dados fez com que fosse descartado o uso destes dados neste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pode-se considerar que a base do processo de licenciamento ambiental das atividades de E&P de petróleo em regiões costeiras e marinhas depende crucialmente dos resultados das simulações numéricas probabilísticas do padrão espaço-temporal do destino final do óleo em distintos e possíveis cenários de vazamentos associados a uma determinada estrutura (por exemplo, uma FPSO). Com isso, pode-se avaliar o destino final do óleo e a probabilidade associada do óleo vazado atingir uma determinada área e o volume de óleo que atinge uma região específica. Associando-se a esse resultado a presença de recursos ambientes (bióticos e abióticos) e os aspectos socioeconômicos pode-se determinar a potencial abrangência e o dano de um possível vazamento de óleo.

Entre os cinco cenários de vazamento simulados (Tabela 3) aquele que produz a maior abrangência superficial probabilística é o cenário associado à perda de controle do poço (C2), isto é, um vazamento que ocorre próximo ao fundo. A Figura 7 mostra uma seção vertical ao longo da latitude $20^{\circ}00'7,54''S$ no instante 06:00 do 20º dia de vazamento iniciado na data 16-09-2008, às 23:16h no cenário C2 (Tabela 3) na estação de inverno. Este cenário foi escolhido ao acaso para ilustrar a seção vertical de um vazamento de fundo no modelo OSCAR®. Vale destacar que o padrão de distribuição do óleo na coluna d'água não é escopo do presente estudo.

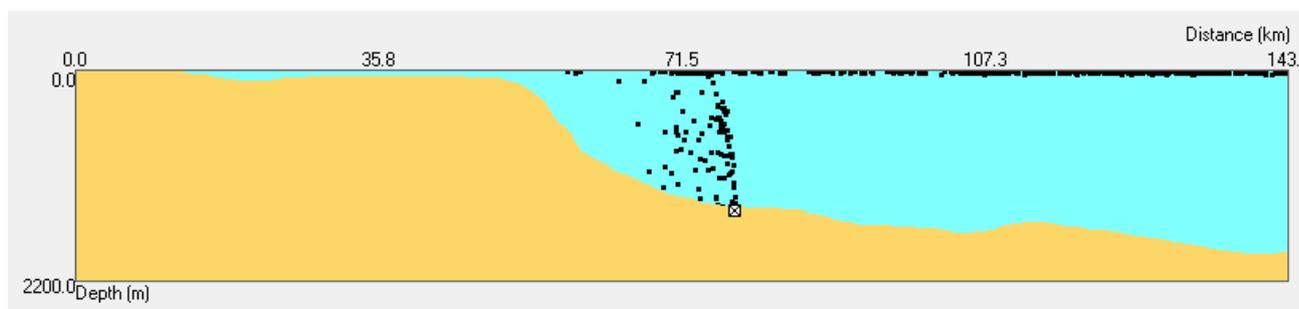


Figura 7 - Seção vertical de um vazamento no C2 no inverno, ao longo da latitude $20^{\circ}00'7,54''S$ no instante 06:00 do vigésimo dia de vazamento iniciado na data do modelo de 16 de setembro de 2008, às 23:16. Os pontos preto representando o óleo partícula ou líquido vazado, em azul a coluna d'água e em bege, o assoalho oceânico, talude e plataforma continental

O Embaiamento de Tubarão é habitat de diversos processos dinâmicos distintos que ocorrem devido à interação entre três elementos: uma corrente superficial que apresenta bastante variabilidade no local – a CB (Corrente do Brasil); uma corrente em maiores profundidades de sentido contrário à superficial – a Corrente de Contorno Intermediária e uma complexa topografia (SERVINO, 2014). Entre esses processos dinâmicos distintos temos meandramentos e feições vorticiais que serão discutidas mais a diante, e que são dependentes também do padrão de ventos local.

Os resultados das simulações probabilísticas para o cenário C2 nas quatro estações do ano é

mostrado na Figura 8. Os campos para os demais cenários serão apresentados no Anexo II.

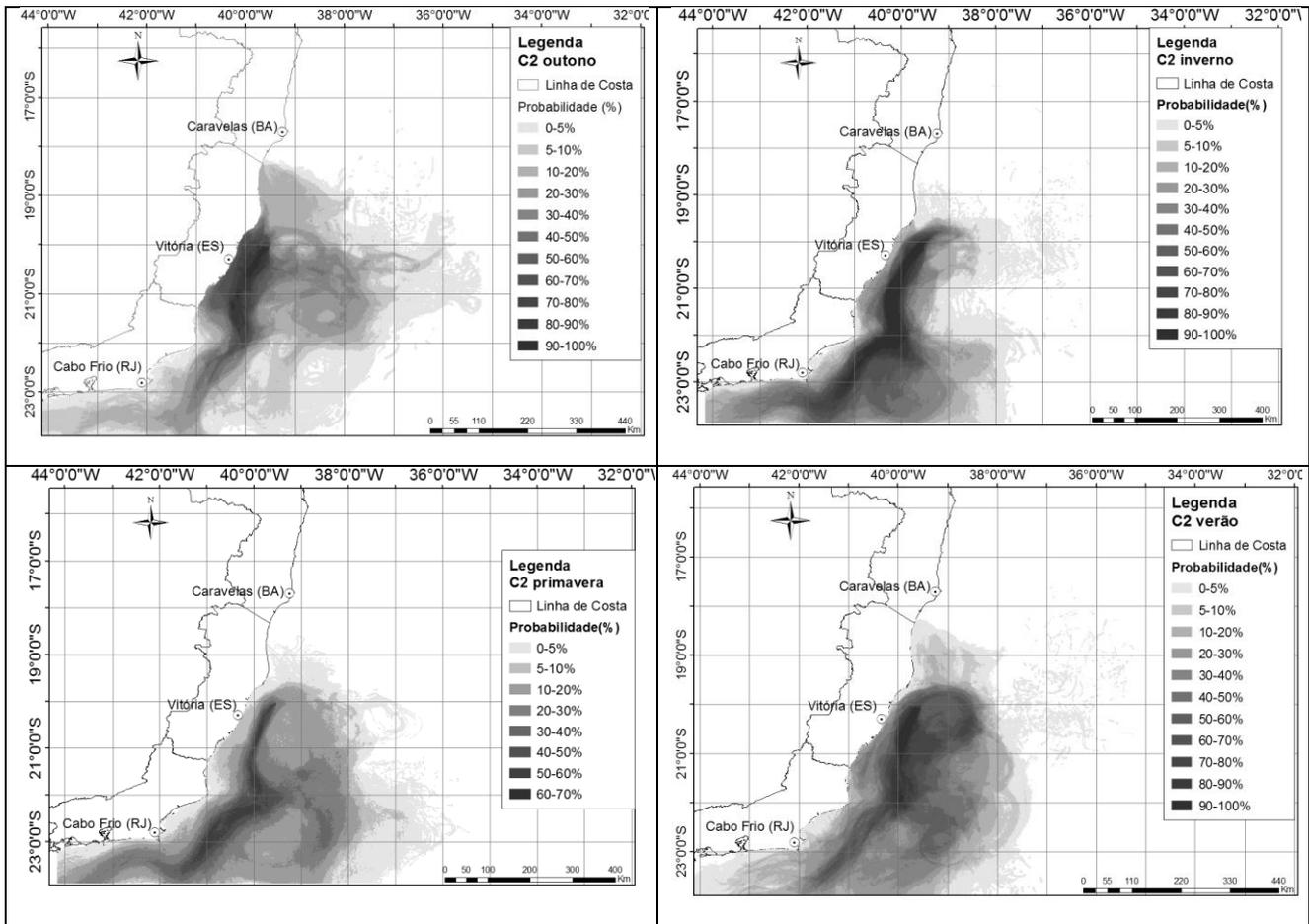


Figura 8 - Distribuição sazonal da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C2 (Tabela 3). Superior esquerdo: outono; Superior direito: inverno; Inferior esquerdo: primavera e Inferior direito: verão.

Claramente, um óleo vazado no Embaiamento de Tubarão responde a alta variabilidade dinâmica, já identificada na região por estudos prévios, já que sua trajetória é o resultado da dinâmica oceanográfica e meteorológica. Assume-se na Figura 8 (conforme pode ser observado nas legendas da mesma) que as cores mais escuras representam os locais com maior probabilidade do óleo estar presente em caso de vazamento. Percebe-se que os padrões entre as quatro estações são diferentes. Assim, qualitativamente, a variabilidade aumentaria progressivamente do inverno (superior direito), para primavera (inferior esquerdo), verão (inferior direito) e outono (superior esquerdo). Onde há uma menor variabilidade, as maiores probabilidades parecem seguir o contorno batimétrico.

O comportamento variável do destino do óleo ao longo das estações do ano poderia ser explicado por uma hidrodinâmica que favorece ou não o toque do óleo à costa. A variabilidade pode ser incrementada pela ocorrência de formações vorticiais registradas em estudos para a região. O Vórtice de Vitória (ARRUDA *et al.*, 2013; GAETA *et al.*, 1999; CAMPOS, 2006; COSTA, 2007; FRAGOSO e TORRES JR., 2009, MARTINS, 2014), o Vórtice de Abrolhos e o Vórtice de Vitória Sul (ARRUDA *et al.*, 2013) ou o Vórtice de Cabo Frio (SCHMID *et al.*, 1995) que se transladam

para norte e nordeste, ou ficam estagnados e são advectados pela Corrente do Brasil (CB) para Sul (ARRUDA *et al.*, 2013; CAMPOS, 2006; SCHMID *et al.*, 1995).

Resultados da simulação numérica obtidos por Fragoso e Torres Jr. (2009), indicaram que a formação do Vórtice de Vitória é proveniente de mudança abrupta de batimetria influenciando a CB e da variação da largura da plataforma continental entre o Banco de Abrolhos e o Embaiamento de Tubarão. Segundo os autores isso causaria o estiramento do tubo do vórtice, que por conservação do momento angular, geraria um aumento na vorticidade relativa induzindo a formação de um vórtice ciclônico se estendendo até aproximadamente 600 metros de profundidade.

Silveira (2007), em uma releitura das imagens AVHRR apresentada no trabalho de Schmid *et al.*, (1995), conclui que os meandros da CB e seus vórtices (Figura 9, Lado direito) são parte de uma onda de vorticidade, ou seja, uma sequência alternada de ciclones e anticiclones (estes, por serem de núcleo quente, coincidindo com a temperatura do mar superficial típica local, são mais difíceis de observar).

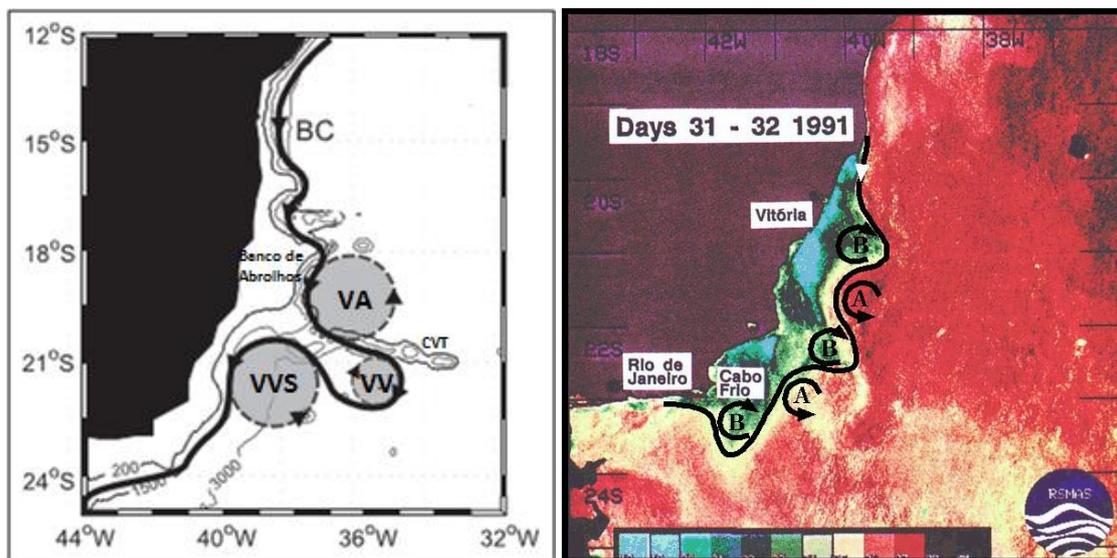


Figura 9 – Lado esquerdo: Desenho esquemático, adaptado de Arruda *et al.*, (2013), mostrando a posição do Vórtice de Abrolhos (VA), Vórtice de Vitória (VV) e Vórtice de Vitória Sul (VVS). Lado direito: Imagem de AVHRR de Schmid *et al.* (1995) interpretada por Silveira (2007), que demonstra meandramentos da CB como parte de uma onda de vorticidade.

Siedler e Zenk (1992) detectaram a presença de um vórtice de núcleo frio através de dados termais obtidos ao Sul da Cadeia Vitória-Trindade em fevereiro de 1991, que poderia ser o VV.

Arruda *et al.* (2013) afirmam que no caso típico, o VV orbita ao redor do VA, centrado em 19°S, onde o VA se apresenta como uma estrutura anticiclônica profunda alimentado pelo fluxo intermediário da Subcorrente Norte do Brasil (SNB), ou seja, após seu desprendimento da CB, o deslocamento do VV para o norte é incitado pelo VVS. Já em situações menos frequentes, o enfraquecimento do VA permite o deslocamento do VV rumo ao equador sobre a borda da

plataforma, devido a sua interação com a topografia e a advecção pela Subcorrente Norte do Brasil.

Segundo Servino (2014), o Banco de Abrolhos e os montes submarinos da Cadeia Vitória-Trindade promovem influências no sistema de correntes de contorno oeste local no Embaiamento de Tubarão, em especial ao fluxo da Corrente do Brasil (CB), induzindo a formação de meandramentos e vórtices na região, cuja formação foi investigada no presente trabalho como sendo influenciada por uma bifurcação da CB nesse sítio. O autor caracterizou dois tipos de vórtices ciclônicos no Embaiamento de Tubarão (ET), caracterizados como VC1 e VC2. O vórtice do tipo VC1 foi caracterizado como um vórtice de tamanho maior, com cerca de 140 km de diâmetro, ocupando praticamente todo o ET, em um formato circular. O vórtice do tipo VC2 foi caracterizado como um vórtice menor, confinado na parte mais ao norte do Embaiamento e de formato achatado, com aproximadamente 100 km de diâmetro em seu maior eixo. No mesmo estudo foi caracterizada a variabilidade interanual dos dois tipos de vórtices. Nos anos utilizados no presente estudo, em 2008 o VC1 esteve presente do fim de janeiro até fim de março, e o VC2 em parte de janeiro e parte de novembro e dezembro e em 2009, o VC1 de abril a meados de junho, apresentando-se em agosto, e o VC2 em janeiro somente.

Freitas (2014) identificou vórtices no ET através de imagens de satélite de clorofila-*a* de cinco anos de dados diários e identificou que os vórtices nesta região podem transladar em todas as direções, mas geralmente eles seguem o efeito β topográfico, ou seja, acompanharam o contorno batimétrico, e que as feições ciclônicas ocorrem durante todo o ano nesta localidade. Ela concluiu também em seu estudo que as feições ciclônicas são mais comuns no verão e outono. Feições de tamanho grande (caracterizadas pela autora como feições com área maior que 10.800 km²) são incomuns, sendo que ela encontrou somente duas em 5 anos de dados diários, sendo uma dentro do período modelado (com início em 21 de fevereiro de 2008, verão) no presente estudo. Estes vórtices de maior tamanho podem ser responsáveis por variabilidades interanuais na hidrodinâmica do ET, e precisam ser estudados mais a fundo, pois influenciam o destino do óleo.

Em relação ao padrão de ventos na área de estudos, Bastos e Ferreira (2000) afirmaram que no inverno os ventos são de leste (L) no Sul da BA e norte do ES e os ventos de nordeste (NE) no litoral do RJ, e no verão no litoral das regiões Sul e Sudeste, os ventos predominantes são de NE.

No trabalho de Lima e Lentini (2009), que analisou a distribuição climatológica sazonal de ventos na plataforma leste brasileira, é possível observar nos resultados que para a costa do ES, o padrão seria o seguinte: no verão e primavera, os ventos seriam de NE, enquanto que no outono e inverno, eles seriam de L, sendo mais intensos no inverno que no outono, apresentando uma sutil divergência próximo a costa, que é mais intensa em direção ao sul do ES e norte do RJ.

Resultados com sazonalidade mais detalhada estão sendo produzidos por de Meyre Pereira, no Laboratório Poseidon. Através de comunicação verbal da autora, foi informado que na primavera e verão ocorrem ventos de NE, mas que somente no verão eles são intensos e constantes suficiente para promover ressurgência costeira. Entre março e junho (outono e inverno), predominam os ventos de SE e SO, que provocam o afundamento de águas superficiais.

O resumo quantitativo das simulações probabilísticas realizadas neste estudo é apresentado na Tabela 6, que informa a massa e o tempo (dias) para o toque na costa, entre outras informações.

Tabela 6 - Resultados quantitativos das modelagens probabilísticas por cenário. Em vermelho, destaque para os maiores volumes que tocam a costa e, em azul, os menores tempos para o toque do óleo na costa.

Cenário	Estação	Toque na costa		
		Massa (m ³)	% do total vazado	Tempo (dias)
C1	Outono	62,55	22,10	5,74
	Inverno	6,80	2,40	9,53
	Primavera	9,94	3,51	4,03
	Verão	33,87	11,97	7,25
C2	Outono	32575,98	27,32	4,10
	Inverno	13131,12	11,01	5,53
	Primavera	13370,34	11,21	3,26
	Verão	10762,10	9,03	7,51
C3	Outono	9196,24	41,43	2,98
	Inverno	6868,51	30,94	4,40
	Primavera	11786,75	53,10	2,72
	Verão	3359,23	15,13	5,42
C4	Outono	22,99	13,77	5,66
	Inverno	1,39	0,83	9,16
	Primavera	12,35	7,39	4,51
	Verão	10,99	6,58	6,83
C5	Outono	1986,99	39,61	3,75
	Inverno	805,42	16,05	4,49
	Primavera	1418,14	28,27	2,92
	Verão	569,40	11,35	6,80

*C1 – Vazamento na fundo da torre do riser; *C2 – Perda de Controle de poço; *C3 – Separador do 1º estágio; *C4 – Vazamento na circulação do óleo; *C5 – Vazamento no sistema de escoamento do óleo.

No presente estudo, a combinação que produziu a maior extensão da linha de costa atingida pelo óleo vazado e também recebeu o maior volume foi observado no cenário C2 durante o outono (Figura 8 – superior esquerdo). Neste cenário, houve óleo ao longo da costa desde Mucuri (BA) (Latitude 18°14'05”) até Angra dos Reis (RJ) (Latitude 23.01'00”). A maior presença de óleo na costa no cenário C2 deve ser uma consequência do volume total a ser vazado (Tabela 3) de

acordo com Libre *et al.* (2012). É importante notar que o volume vazado na simulação foi menor que o indicado na Tabela 3, já que a simulação durou 30 dos 45 dias necessários para vaziar aquele montante, logo o volume vazado correspondeu a 119.240 m³, ou seja, menos de 40% do volume de pior caso indicado no Estudo de Impacto Ambiental (300.000 m³) que é associado ao vazamento completo de uma FPSO, conforme feito no processo de licenciamento ambiental.

Outra característica que se destaca é que foi no outono que a maior quantidade de óleo chegou à costa (com exceção do cenário C3, onde o outono foi o segundo maior). Além disso, com exceção do cenário C1, a primavera foi a segunda estação do ano em relação aos maiores volumes de óleo chegando à costa. Foi também na primavera que o óleo chegou mais rapidamente à costa.

Considerando-se os aspectos qualitativos e quantitativos apresentados na Tabela 3 e na Figura 8, o questionamento natural está relacionado à sazonalidade nas simulações numéricas normalmente solicitadas nos Termos de Referência emitidos pelo CGPEG/IBAMA. Seria realmente, verão e inverno as duas situações que representariam os extremos meteorológicos e oceanográficos para a região de estudo?

De acordo com os resultados de estudos prévios sobre correntes e ventos (já citados) que abrangeram quatro estações anuais na área de estudo, e de acordo com os resultados do presente estudo, existe uma considerável variabilidade sazonal. Em termos de destino de óleo, concluiu-se que as estações intermediárias como outono e primavera podem ser potencialmente perigosas. A dinâmica meteorológica e oceanográfica peculiar favorece dois agravantes para ambientes costeiros em caso de derrame de óleo nestas estações: uma chegada mais rápida (na primavera) e a chegada de um maior volume e maior extensão de costa atingida (no outono). Uma chegada mais rápida do óleo à costa exige uma ação de resposta ao incidente com óleo mais ágil, enquanto que a chegada de maiores volumes na costa implica em um maior impacto ambiental para os ambientes costeiros presentes.

Contribuindo com a importância de se estudar as quatro estações anuais tem-se a biologia reprodutiva das espécies encontradas na região de estudo. É conhecido que algumas espécies de aves, tartarugas, e baleias aqui encontradas se reproduzem em temporadas reprodutivas específicas. As andorinhas-do-mar de bico amarelo (*Sterna eurygnatha*) e *Sterna hirundinacea* habitam o ES de abril a setembro (GHERARDI e CABRAL, 2010). As baleias Jubarte se reproduzem e se apresentam mais frequentes na costa do ES principalmente no segundo semestre entre setembro e novembro (HORTON *et al.*, 2011; ZERBINI *et al.*, 2006; ZERBINI *et al.*, 2011). A ave pardelinha (*Puffinus lherminieri*) se estabelecem de julho a dezembro na Ilha do Boqueirão (Vila Velha). As desovas de tartarugas marinhas no Brasil compreendem o período de setembro a abril nas praias continentais e de dezembro a junho em praias oceânicas (BELLINI *et al.*, 1996; MARCOVALDI *et al.*, 1999). Além de aumentar o número de indivíduos na área no período reprodutivo, os filhotes em geral são mais sensíveis ao estresse do que os adultos.

Ao se comparar os resultados do destino do óleo no presente estudo com os do EIA/RIMA, um outro aspecto que necessita ser considerado se refere a base hidrodinâmica e meteorológica usada. Neste sentido, podem-se comparar qualitativamente os campos probabilísticos apresentados no EIA/RIMA com os produzidos neste estudo. Neste caso são apresentados na Figura 10, o pior caso simulado no EIA/RIMA (vazamento superficial completo da FPSO em 300.000 m³) e o cenário C2 para as estações de verão e inverno no presente estudo.

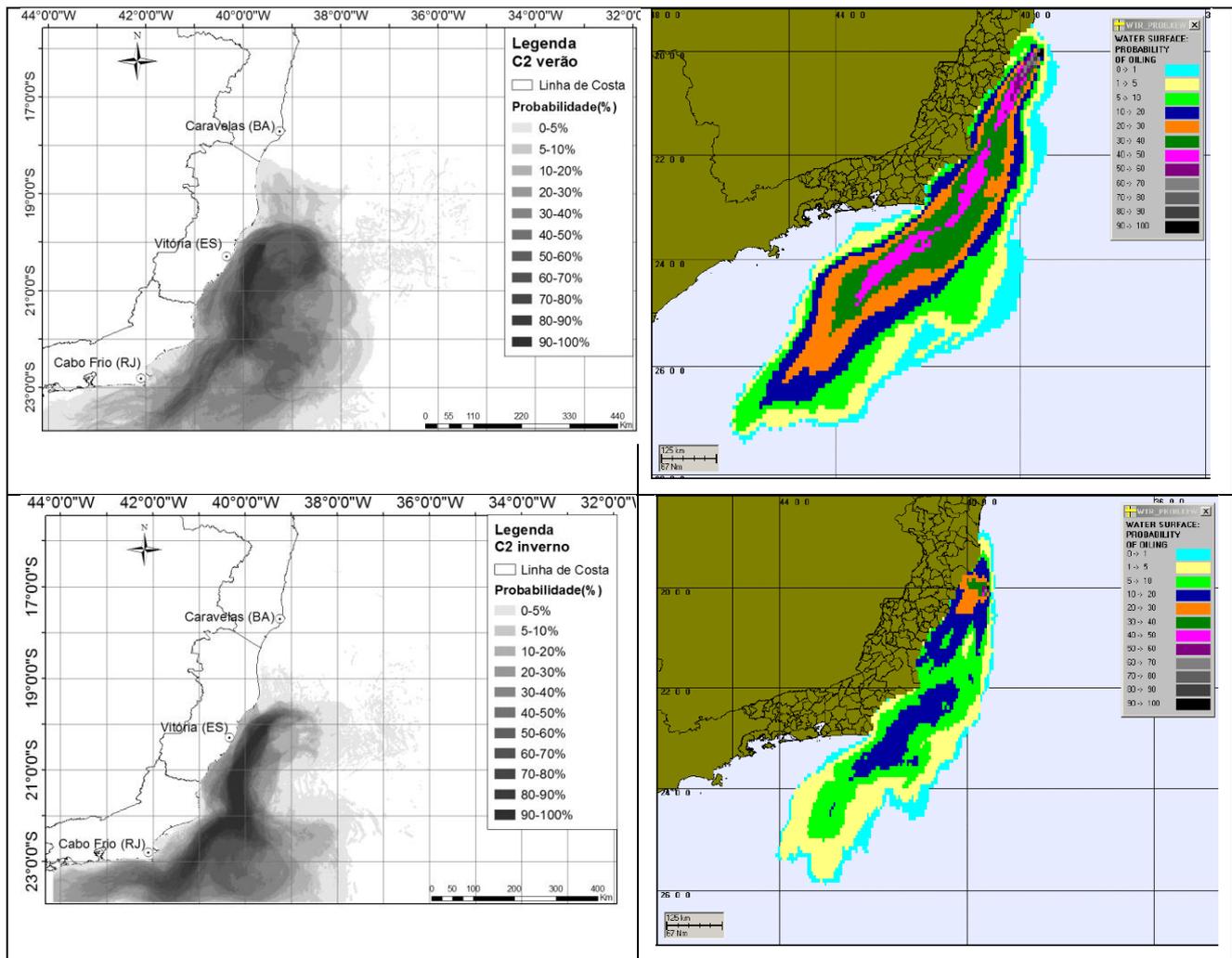


Figura 10- Superior: Resultado das simulações probabilísticas para o verão: (esquerdo – este estudo, cenário C2; direito – EIA/RIMA, vazamento total da FPSO). Inferior: Resultado das simulações probabilísticas para o inverno: esquerdo – este estudo, cenário C2 e direito, resultados do EIA/RIMA.

Desconsiderando o fato dos vazamentos estarem em profundidades distintas, ambos os cenários representam os piores volumes vazados nos dois estudos. Enquanto nos dois cenários do EIA/RIMA o resultado final é bastante semelhante, há uma nítida variabilidade entre os mesmos dois cenários produzidos neste estudo.

Há algumas diferenças entre os vazamentos do EIA e o do presente estudo, já que o acidente englobado no EIA não cabe no método MIRA. Os cenários de Perda de controle de poço (C2) foram feitos a partir do fundo (exemplo na Figura 7), o que não gerou diferenças significativas em relação ao destino do óleo na superfície e o que chega à costa, já que o óleo emerge

rapidamente, por ser mais leve que a água. O cenário criado no EIA apresenta volume de 300.000 m³, enquanto a Perda de controle de poço gera nos 30 dias de simulação, um volume total de vazamento de 119.240 m³ (aproximadamente 40% do volume do EIA). A área onde há probabilidade de chegada do óleo na modelagem de óleo do EIA compreendeu de São Mateus à Arraial do Cabo. No cenário correspondente no presente estudo (C2 no inverno) a extensão a sul foi maior, passando por Arraial do Cabo e chegando ao município de Angra dos Reis (limite da grade a Sul). No EIA, a região costeira do município de Aracruz (ES) seria atingida primeiramente no verão, enquanto no inverno seria o município de Linhares (ES). No presente estudo, tanto no verão quanto no inverno, o município primeiramente atingido seria Guarapari. Esta distinção já era esperada pois no modelo mais atual, utilizado neste estudo, possui maior grade e resolução espacial que dão origem as bordas do modelo em relação à utilizada na modelagem do EIA, reduzindo drasticamente o efeito das bordas na dinâmica oceânica. Além disso, o modelo simula de forma mais realística a dinâmica da CB e os efeitos de sub-mesoescala.

No EIA/RIMA foi usado o modelo hidrodinâmico POM (Modelo Oceânico Princeton, sigla do inglês "*Princeton Ocean Model*"). As variáveis potencialmente prognósticas do POM são: as três componentes da velocidade (u , v e w), a temperatura, a salinidade, a energia cinética turbulenta, a escala turbulenta, e a elevação da superfície. As forçantes fluxo de calor e tensão de cisalhamento do vento foram oriundas da reanálise do ECMWF, enquanto que os dados de temperatura e salinidade da água foram interpolados da climatologia Levitus, somente dados de superfície. A grade teria resolução variável, com média de 3 km.

Segundo Pimentel (2012), a resolução do HYCOM apresenta uma batimetria da Cadeia Vitória Trindade bem definida, considerada essencial para a caracterização dos fluxos nesta região (PIMENTEL, 2012; SERVINO, 2014). Além disto, o modelo possui as camadas verticais híbridas, sendo isopícnais em oceano aberto estratificado, mas modifica-se gradualmente para coordenadas sigma em regiões rasas e para coordenadas-z em camadas sem estratificação. Essa característica do modelo HYCOM é ideal para resolver processos de meso/larga-escala associados à borda continental, como as correntes de contorno oeste (HYCOM CONSORTIUM, 2013). Estas são provavelmente as diferenças principais e as responsáveis pelas distinções entre os resultados do presente estudo do destino do óleo em direção *offshore* leste, em relação às simulações do EIA (Figura 10). No EIA/RIMA, os resultados de probabilidade obtidos possuem falhas, principalmente porque não simularam a CB de forma adequada, fazendo com que pareça um jato forte e contínuo em direção ao Sul, não representando bem suas variabilidades associadas, como meandros ou vórtices, ocorrendo apenas o ajuste subsuperficial.

Para cada simulação especificada na Figura 5 foram obtidos mapas de risco ponderado entre sensibilidade litoral e massa de óleo máxima por célula (pior caso por célula de litoral, Figuras de 11 a 15), estes resultados referentes ao nível 1 do método, uma análise baseada em referência, categorizando os resultados em níveis de risco mínimo, moderado, significativo e grave. Este

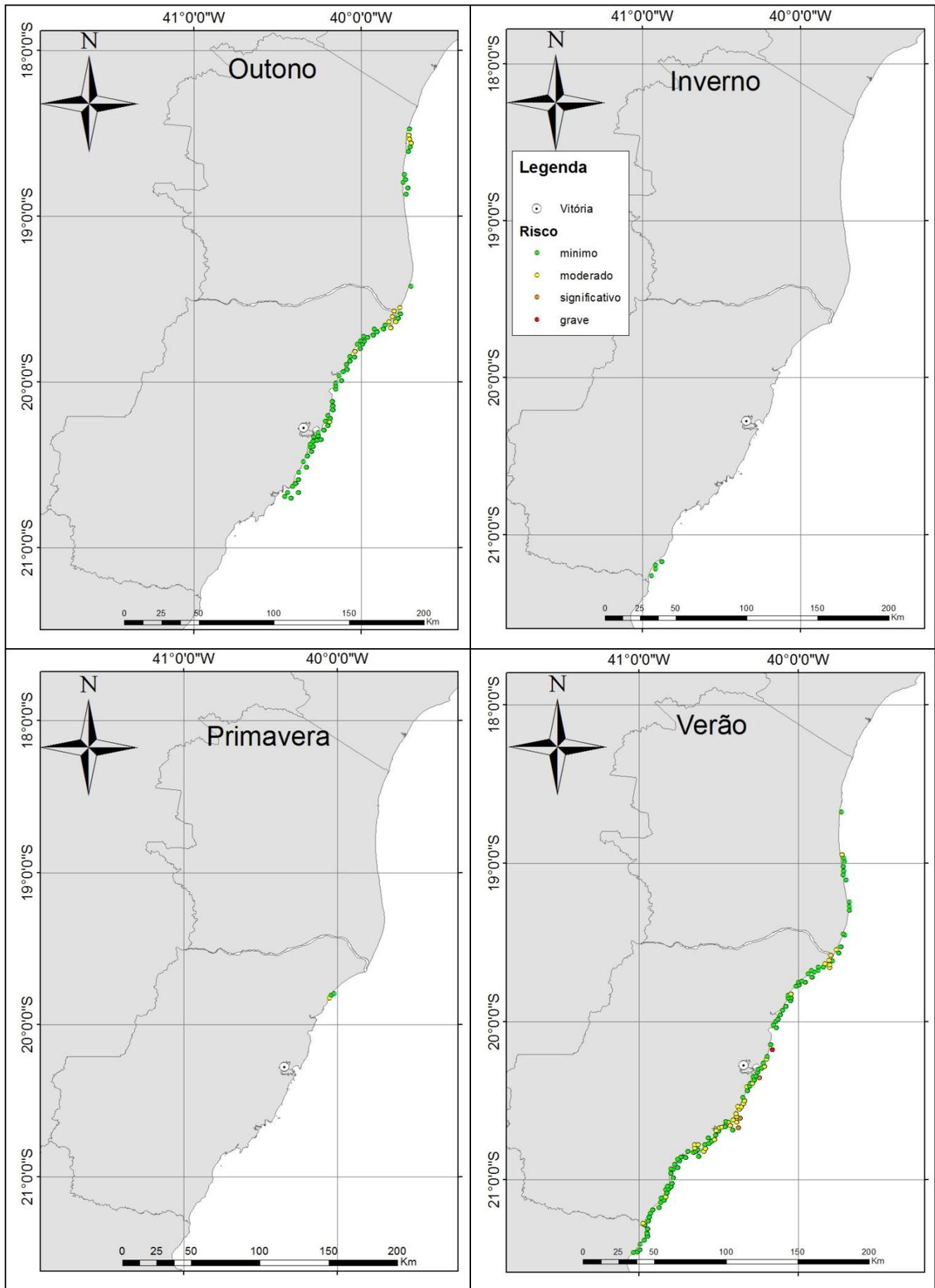


Figura 11 - Risco ponderado entre sensibilidade litoral (SL) e volume de óleo(M) para o cenário (C1), onde há vazamento na torre do riser.

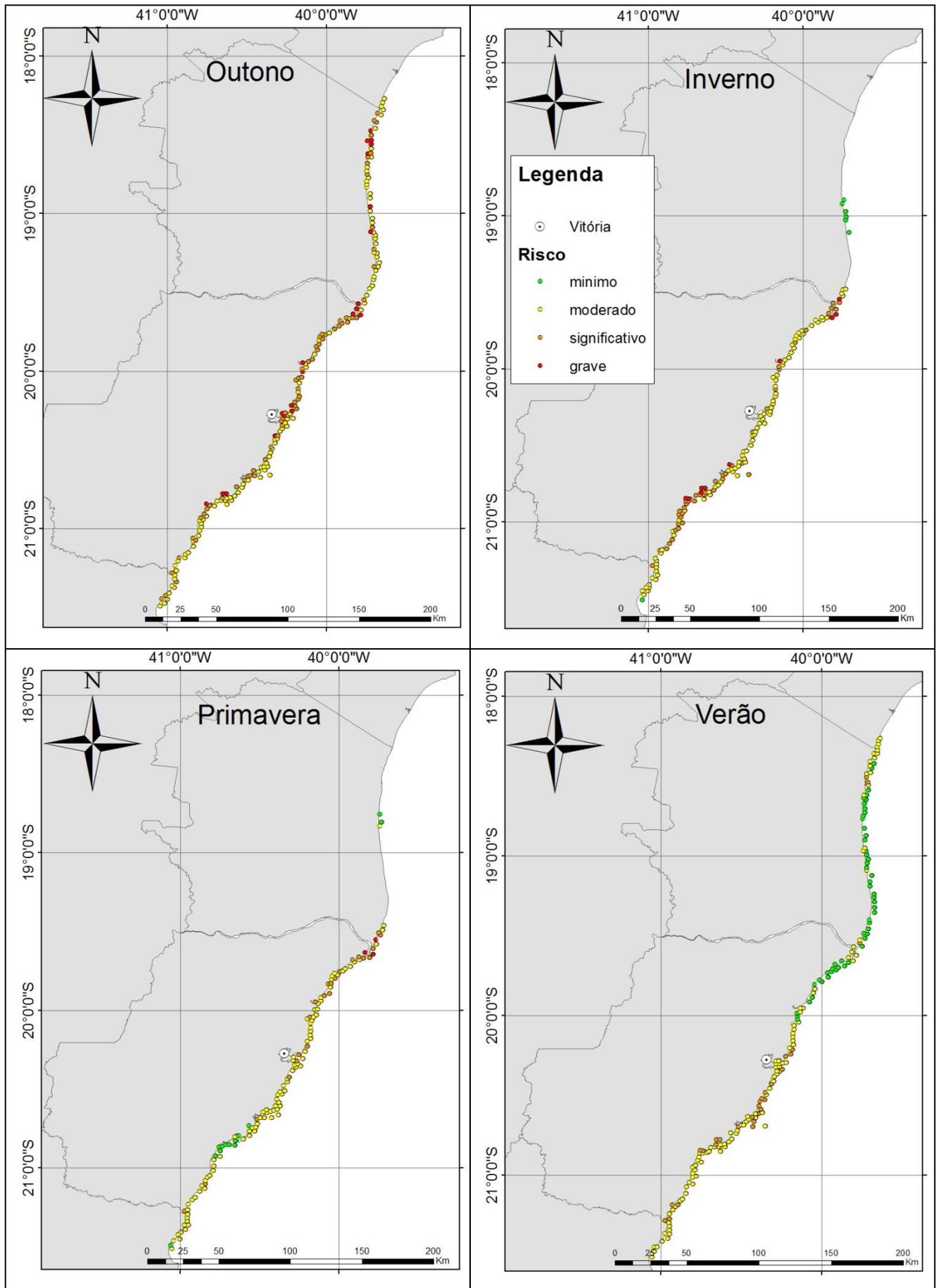


Figura 12 - Risco ponderado entre sensibilidade litoral (SL) e volume de óleo(M) para o cenário (C2), Perda de controle de poço.

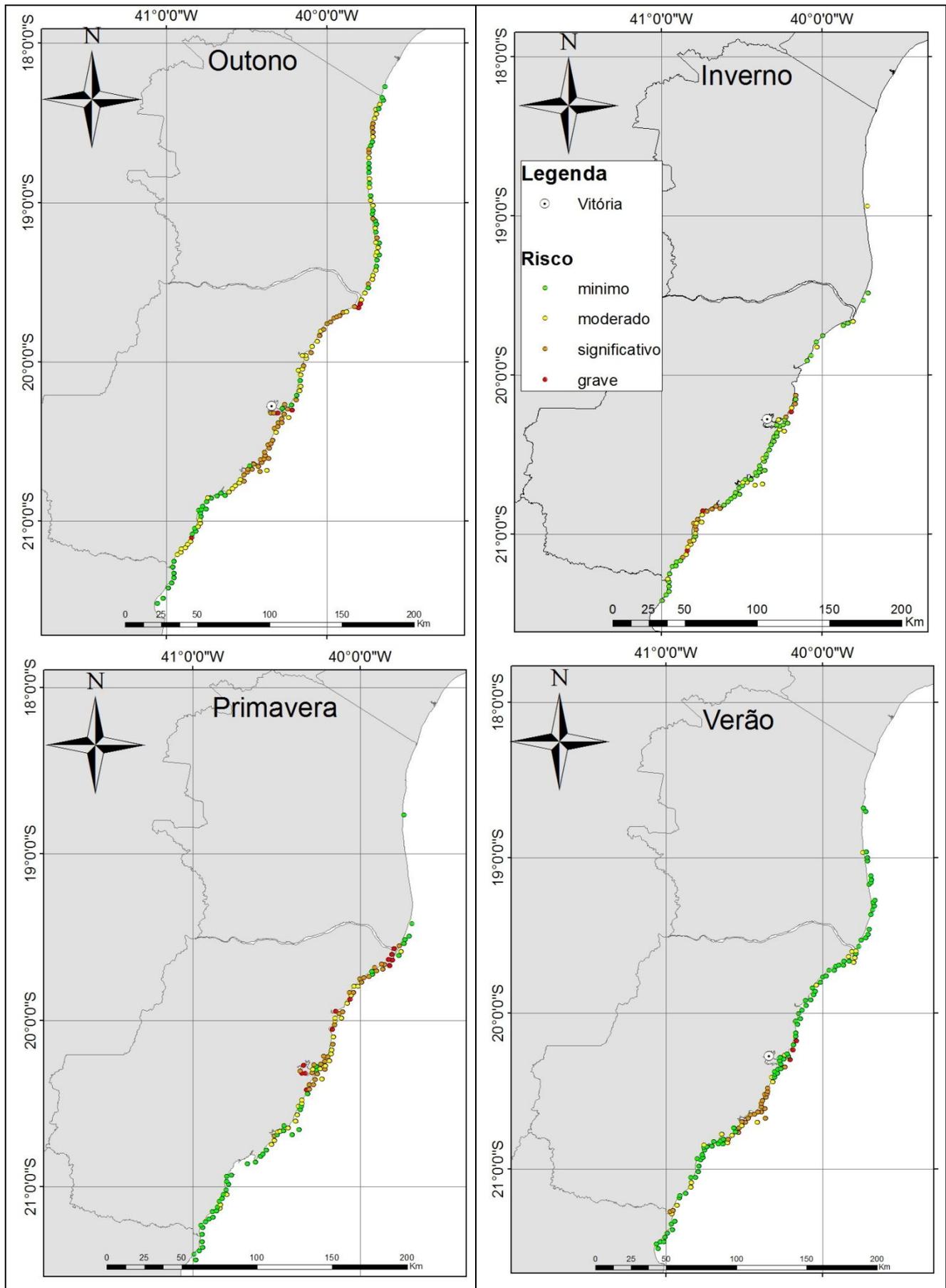


Figura 13 - Risco ponderado entre sensibilidade litoral (SL) e volume de óleo(M) para o cenário (C3), vazamento no separador do primeiro estágio.

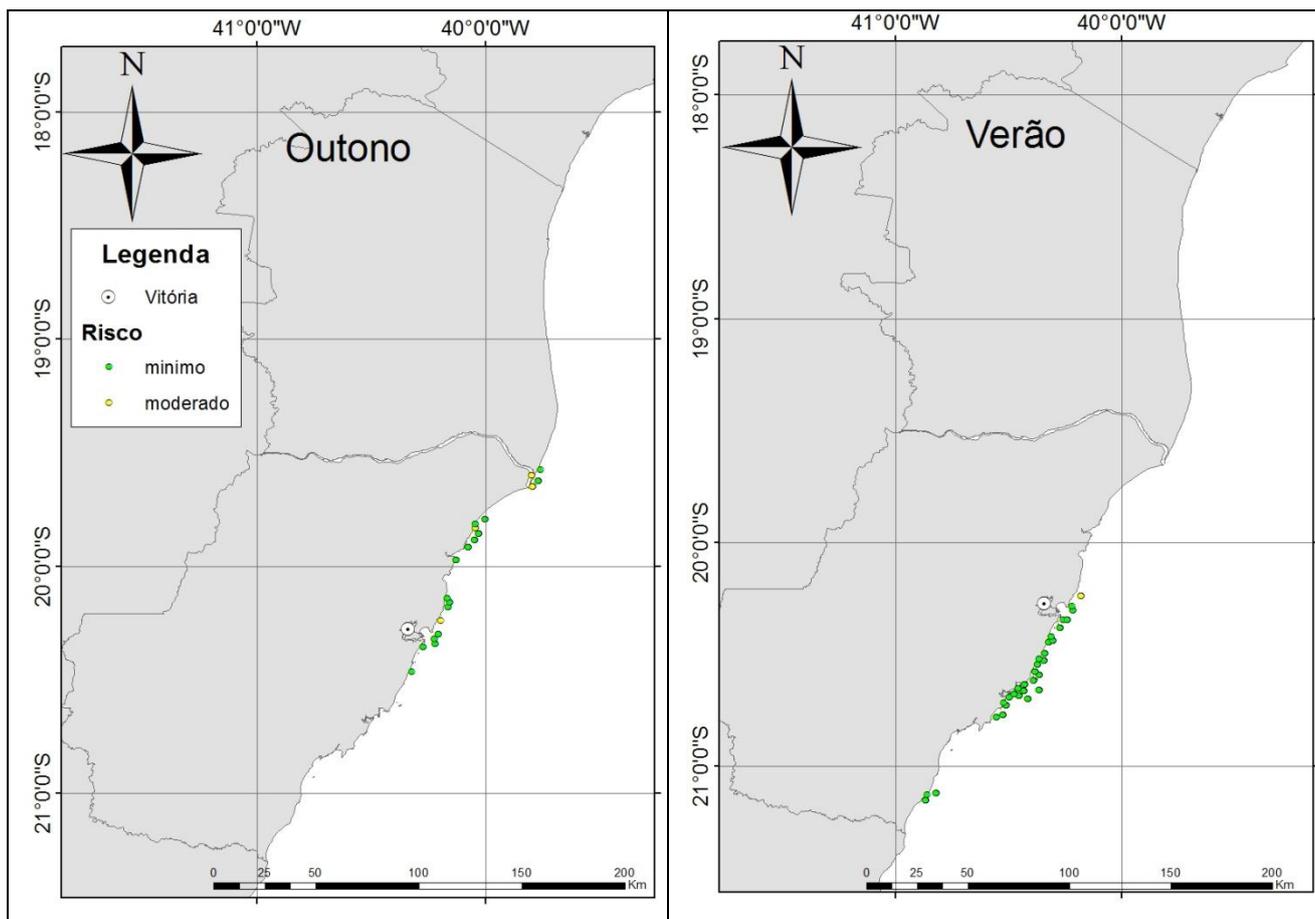


Figura 14 - Risco ponderado entre sensibilidade litoral (SL) e volume de óleo(M) para o cenário (C4) Circulação de óleo. As figuras referentes à primavera e ao inverno foram ocultadas porque não exibiam nenhum resultado com toque a costa.

resultado é interessante porque demonstra exatamente as regiões que seriam mais afetadas e como elas seriam afetadas (onde o risco é mínimo, significativo, moderado e grave, por exemplo), considerando sua sensibilidade e o volume de óleo que iriam atingi-la, e não um resultado geral para todos ambientes (o pior caso entre as estações testadas). Um ambiente pode ser mais afetado em um cenário que de uma forma geral não foi o pior caso entre as quatro estações do ano avaliadas.

Este tipo de resultado ajuda a tomada de decisão para a resposta de acordo com o comportamento hidrodinâmico de cada uma das estações do ano, e não só de extremos. Pode-se utilizar assim a estratégia de resposta mais adequada para cada estação do ano.

No cenário C1 (Figura 11), percebe-se que apesar do maior volume de óleo chegar à costa no outono (62m³, 22% do total vazado, Tabela 6), o caso em que há mais risco litoral foi o verão, pois um maior número de células de costa foi afetado e um maior número de células com riscos mais graves, ponderados entre volume e sensibilidade litoral, foram afetadas. O outono ficaria em segundo lugar, seguido do inverno. Apesar de a primavera apresentar o menor tempo de toque (Tabela 6), somente 3 células foram afetadas e com risco mínimo, sendo a estação que apresenta menor risco.

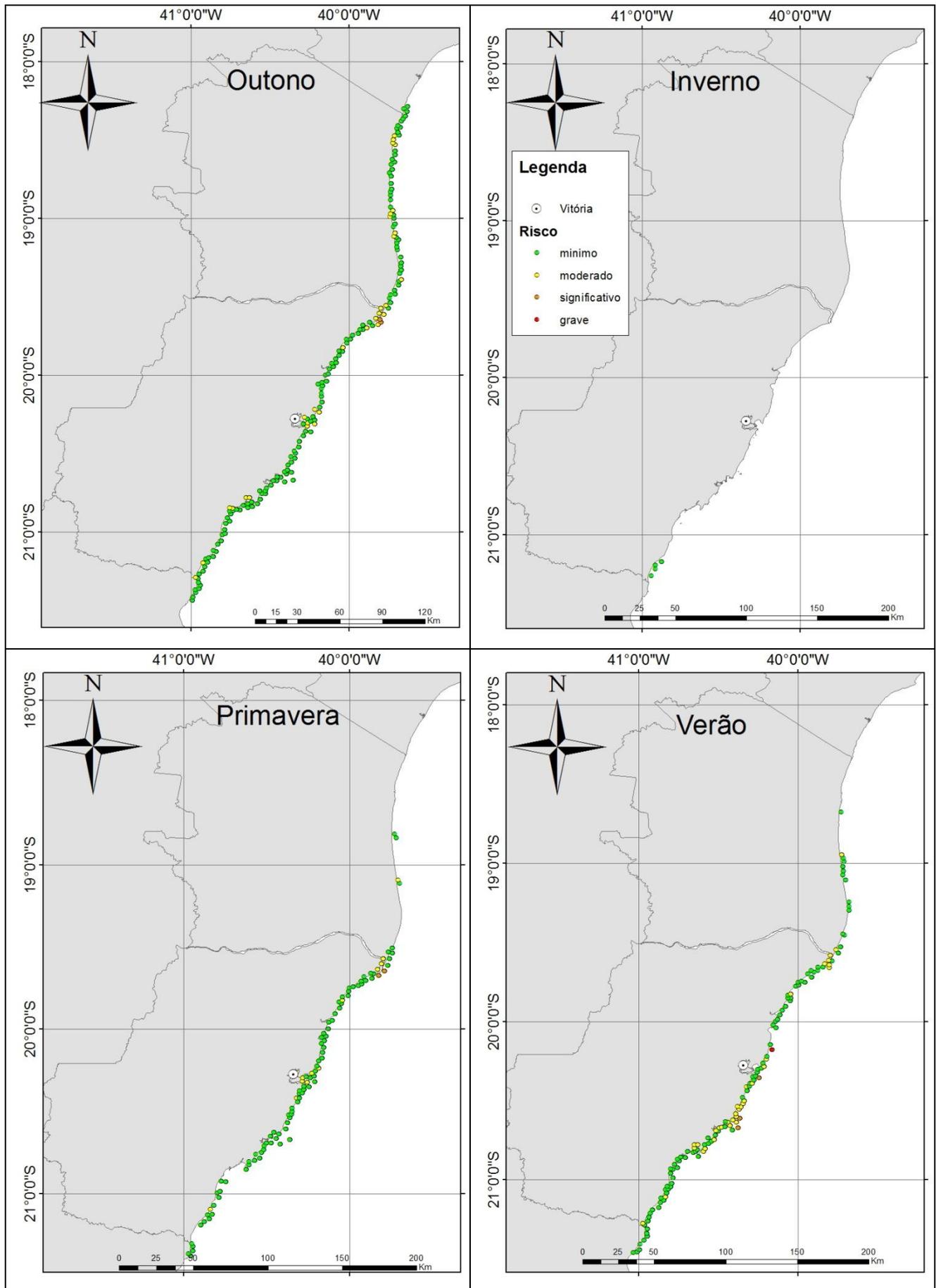


Figura 15 - Risco ponderado entre sensibilidade litoral (SL) e volume de óleo(M) para o cenário (C5), vazamento no sistema de escoamento.

No cenário C2 (Figura 12), com o maior volume vazado entre os cinco locais de vazamento, é o que apresenta o maior volume que toca a costa (Tabela 6). Foi no outono que apresentou o maior volume chegando à costa (11504m³), com mais que o dobro que qualquer outra estação do ano, perfazendo 27% do total vazado. Outono apresentou o maior risco litoral com maior número de células com risco (ponderado entre volume e SL) em nível grave, bem como extensão de danos cobrindo todo o Espírito Santo, parte da Bahia e Rio de Janeiro.

Uma grande extensão de costa atingida também ocorre no verão, porém o segundo cenário em relação à maior risco é o inverno, onde há uma boa proporção de células com classificação de risco grave, significativo e moderado. O verão fica em terceiro, devido ao equilíbrio entre extensão e gravidade de risco, e o cenário menos crítico seria na primavera, onde o tempo de toque a costa seria o menor dos 4 cenários de C2 (3,26 dias). É importante ressaltar que apesar do maior volume, o cenário C2 não é o que tem maior frequência.

Na Figura 13 é mostrado o resultado para o cenário C3. O maior volume que toca a costa (11786m³, 53% do total vazado, se aproximando da ordem dos vazamentos de C2 – exceto outono, mesmo com um vazamento total de aproximadamente 18% do volume vazado em C2) e o menor tempo de toque (2,7 dias) foi na primavera (Tabela 6), porém foi no outono onde o risco ocorreu mais expressivamente, balanceando o alcance de uma maior extensão do litoral e números de células com risco moderado, significativo e grave. A primavera viria em segundo lugar, pois apesar de menor abrangência de costa, em relação ao verão, o maior volume de óleo em proporção, causa um risco com maior número de células como moderado, significativo ou grave. Em seguida vem o verão, com maior abrangência e células com risco moderado, significativo ou grave, em relação ao inverno, que foi a estação que apresentou menor risco.

Na Figura 14 é mostrado o resultado para o cenário C4 e na Figura 15 para o cenário C5. Apesar de ser no outono que o maior volume de óleo chegaria à costa (23m³, 13,7% do total vazado, Tabela 6), seria no verão o pior caso, já que foi quando houve o maior número de células com toque. Apesar de haver toque na primavera (menor tempo para o toque, 4,5 dias) e no inverno, a quantidade que tocaria a costa provavelmente foi menor que 1 tonelada por célula (ou por Km²), e foi desconsiderada ao gerar o gráfico (conforme a orientação do método MIRA).

No cenário C5 (Figura 15), o maior volume que atingiria a costa seria no outono (1987m³, 39% do total vazado, Tabela 6), coincidiria com o pior cenário de risco. O segundo pior cenário seria o verão, apesar do segundo pior cenário em relação ao volume ser na primavera, onde ocorreria um menor tempo de toque na costa (2,9dias). A estação onde ocorreria o menor risco para o C5 é o inverno.

Também foi feito o cálculo do risco ambiental, tempo de recuperação, e frequências por célula, configurando uma análise baseada em exposição completa. Foram graficadas as frequências

acidentais por célula em cada estação do ano e por cenário (obtidas através da Equação 1), junto com os critérios de aceitação por operação de MIRA, por categoria de consequência baseada em tempo de recuperação. As classes foram assim identificadas: 1 = menor (até um ano); 2 = moderado (1 a 3 anos), 3 = significativo (de 3 a 10 anos); 4 = sério (mais que 10 anos).

Na forma gráfica, estilo matriz, os resultados podem ser avaliados quanto ao critério de aceitação (aceitável e inaceitável), por ambiente costeiro atingido. Neste estudo estes gráficos foram elaborados usando os dados de tempo de recuperação teórico e pior caso por ambiente (a célula afetada por óleo que apresenta o maior valor de frequência accidental dentre todas as células para um mesmo ambiente afetado pelo óleo). É esta célula que representará o ambiente no gráfico. Este resultado é que possibilita o licenciamento ou não de uma área de E&P, de uma forma clara, com um limite quantitativo (numérico).

Foram elaborados 20 gráficos deste tipo, 4 por cenário, 1 por estação do ano. Neste trabalho foram omitidos dois gráficos do cenário C4, de inverno e primavera, onde não ocorreu toque na costa maior que 1 tonelada por km², limite de detecção estipulado no método MIRA.

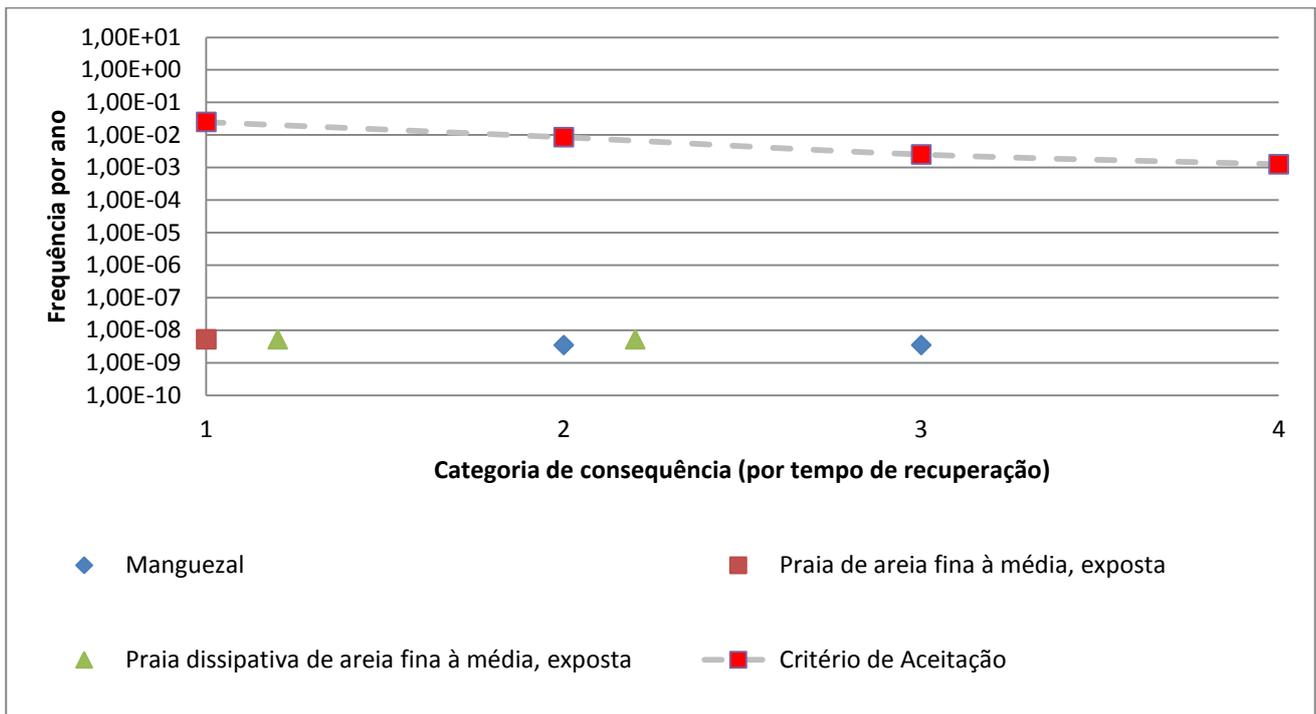


Figura 16 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral para o cenário C1 (vazamento na Base da Torre do riser) no inverno distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido.

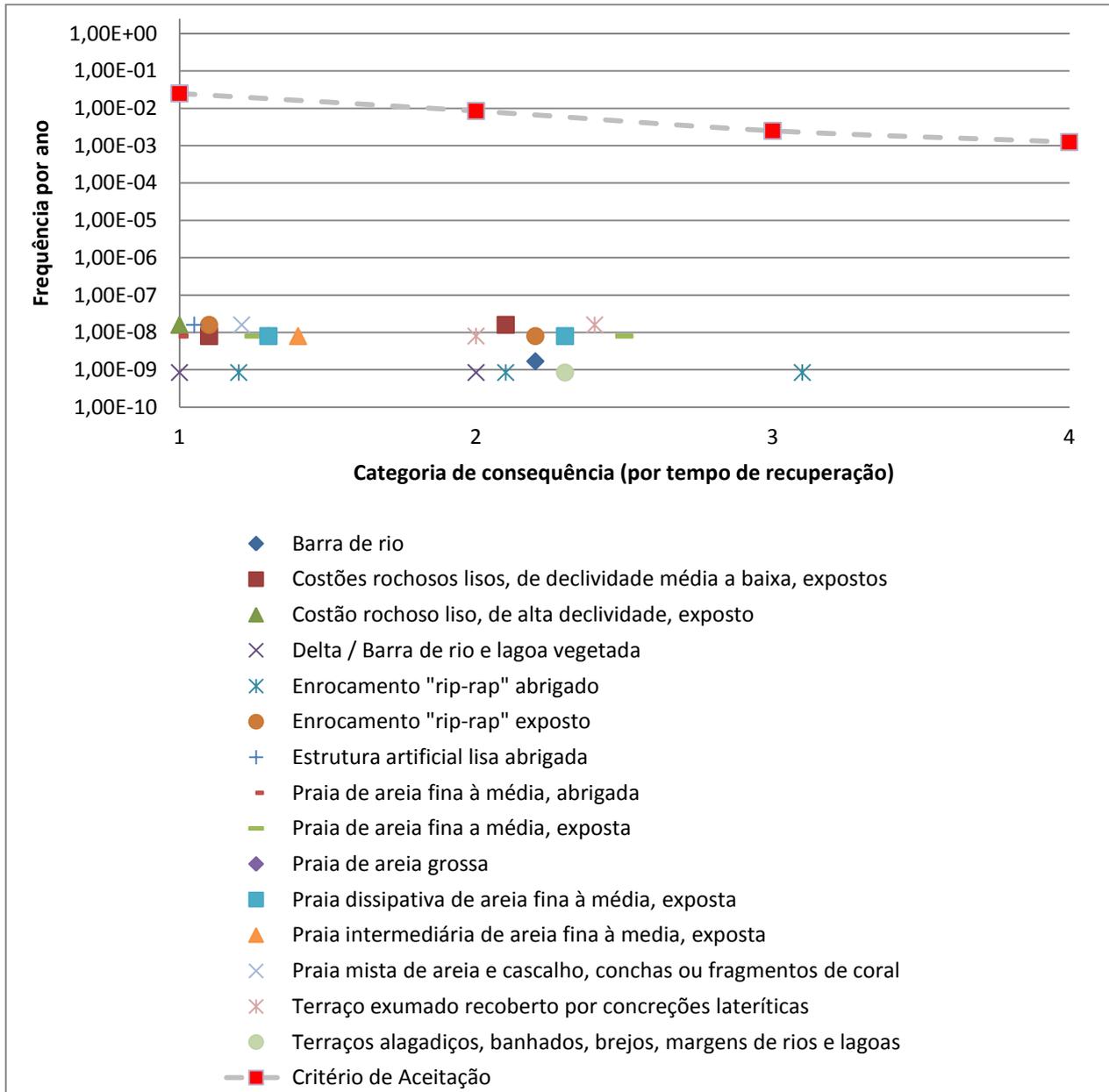


Figura 17 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C1 (vazamento na Base da Torre do riser) no outono distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

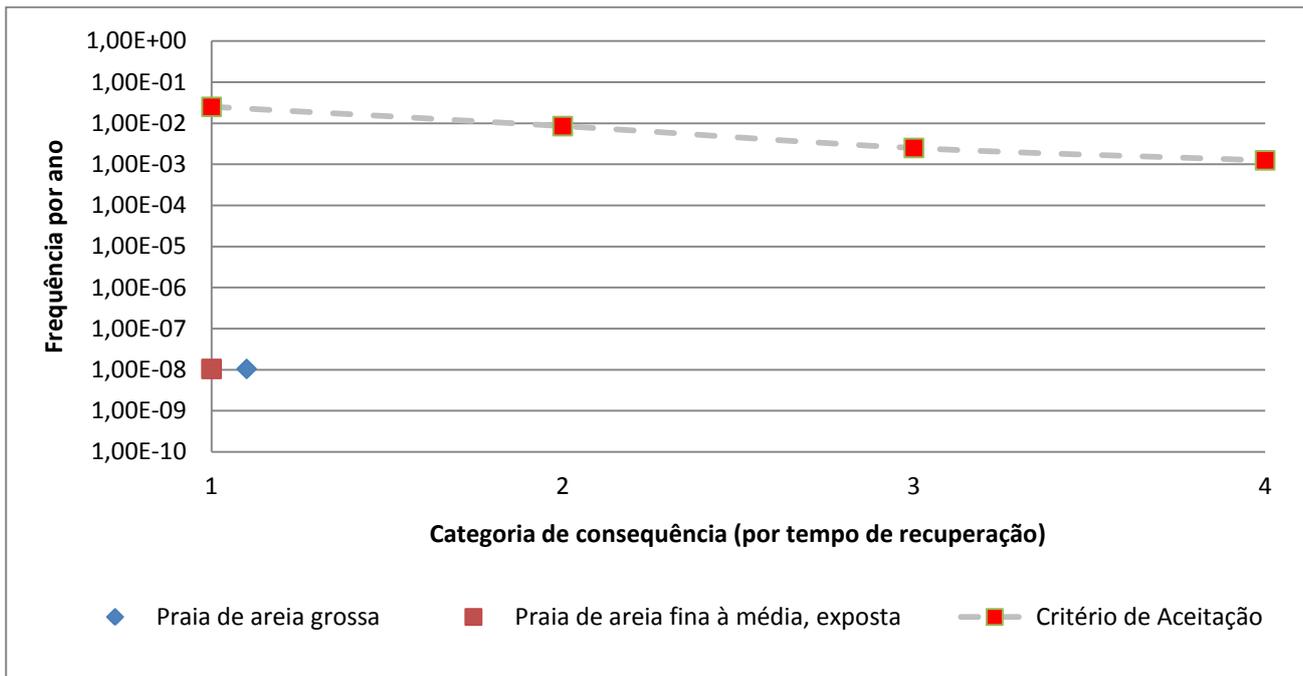


Figura 18 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C1 (vazamento na Base da Torre do riser) na primavera distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

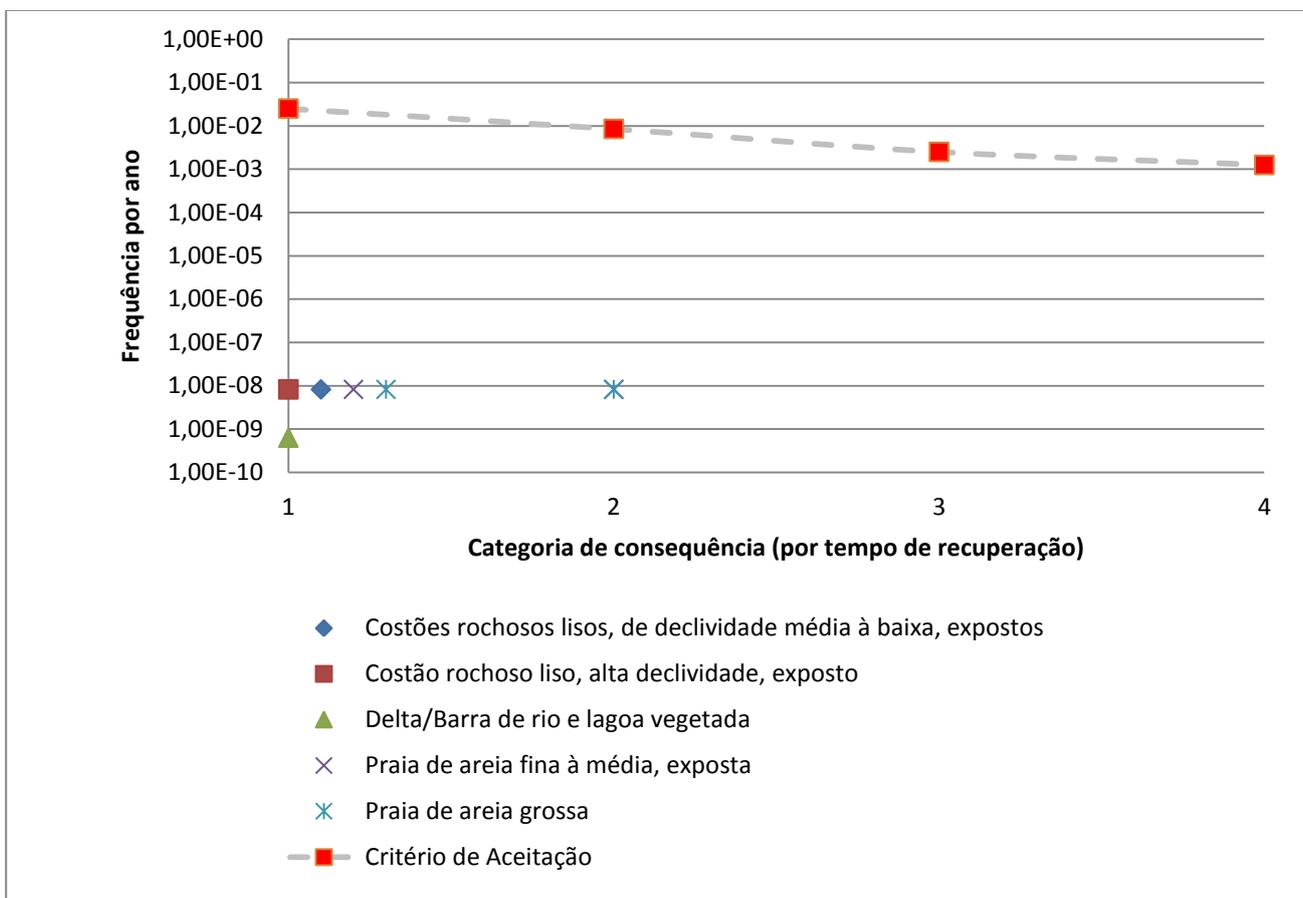


Figura 19- Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C1 (vazamento na Base da Torre do riser) no verão distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

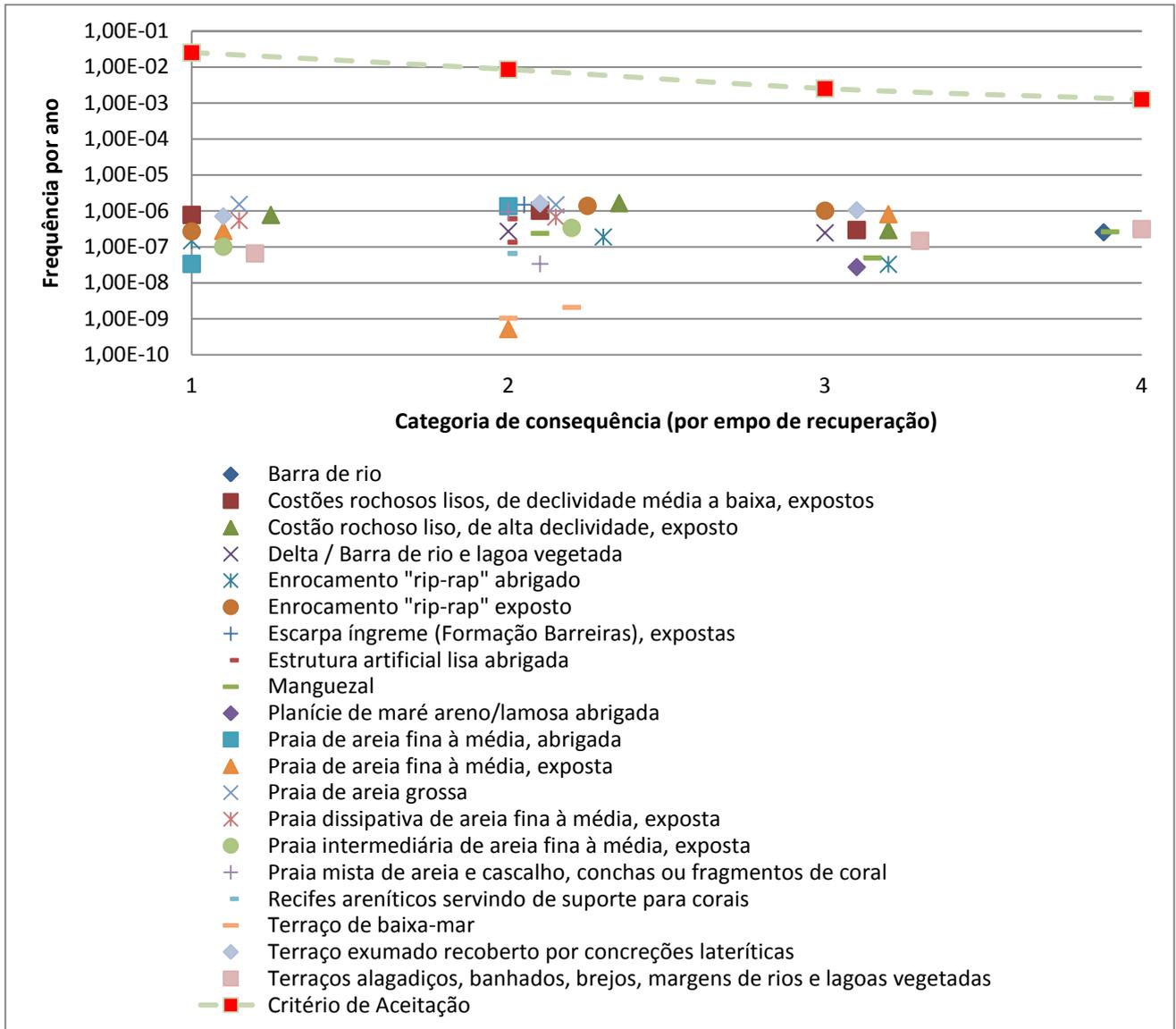


Figura 20 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C2 (Perda de controle de poço) no inverno distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

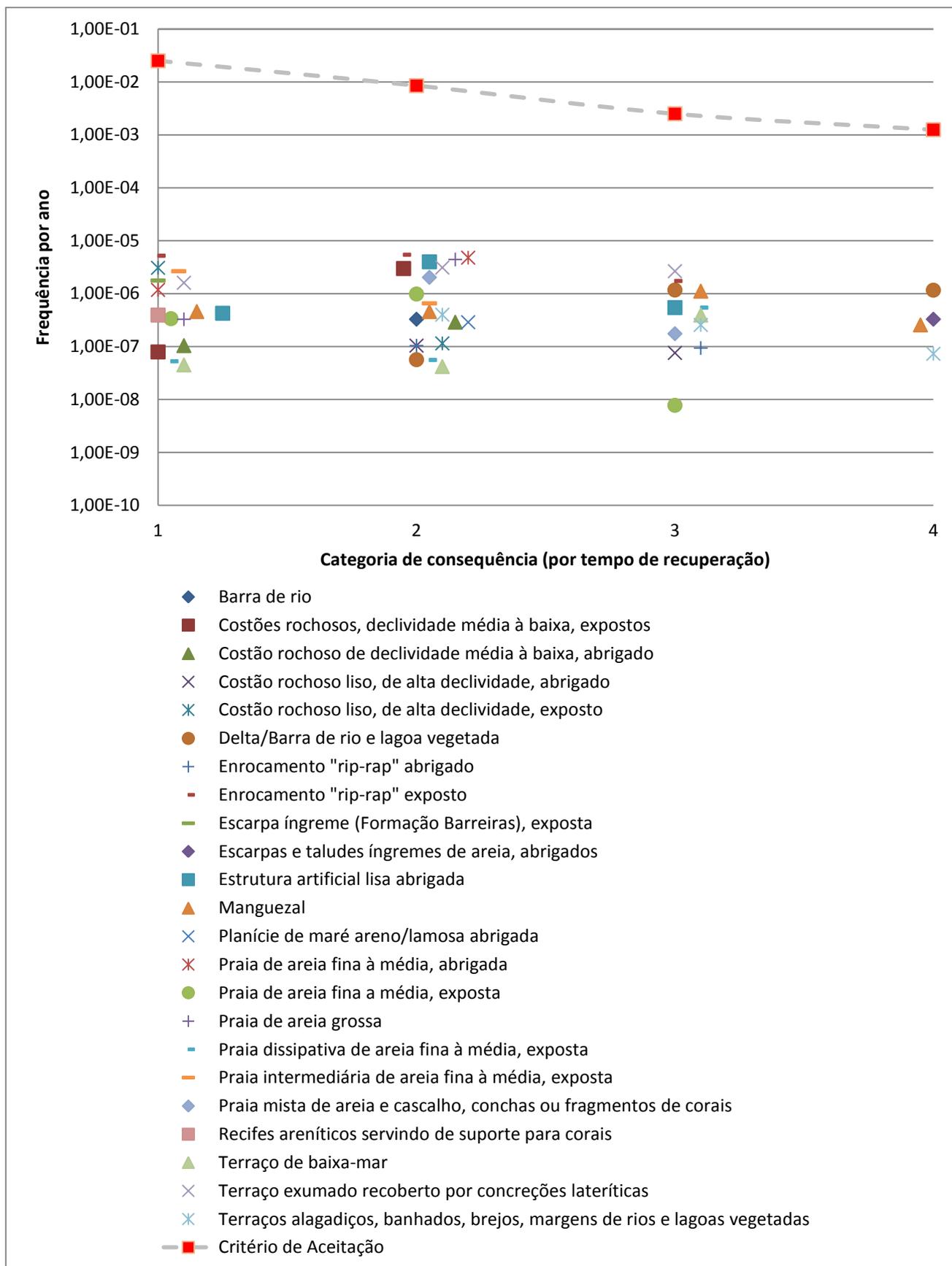


Figura 21 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C2 (Perda de controle de poço) no outono distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

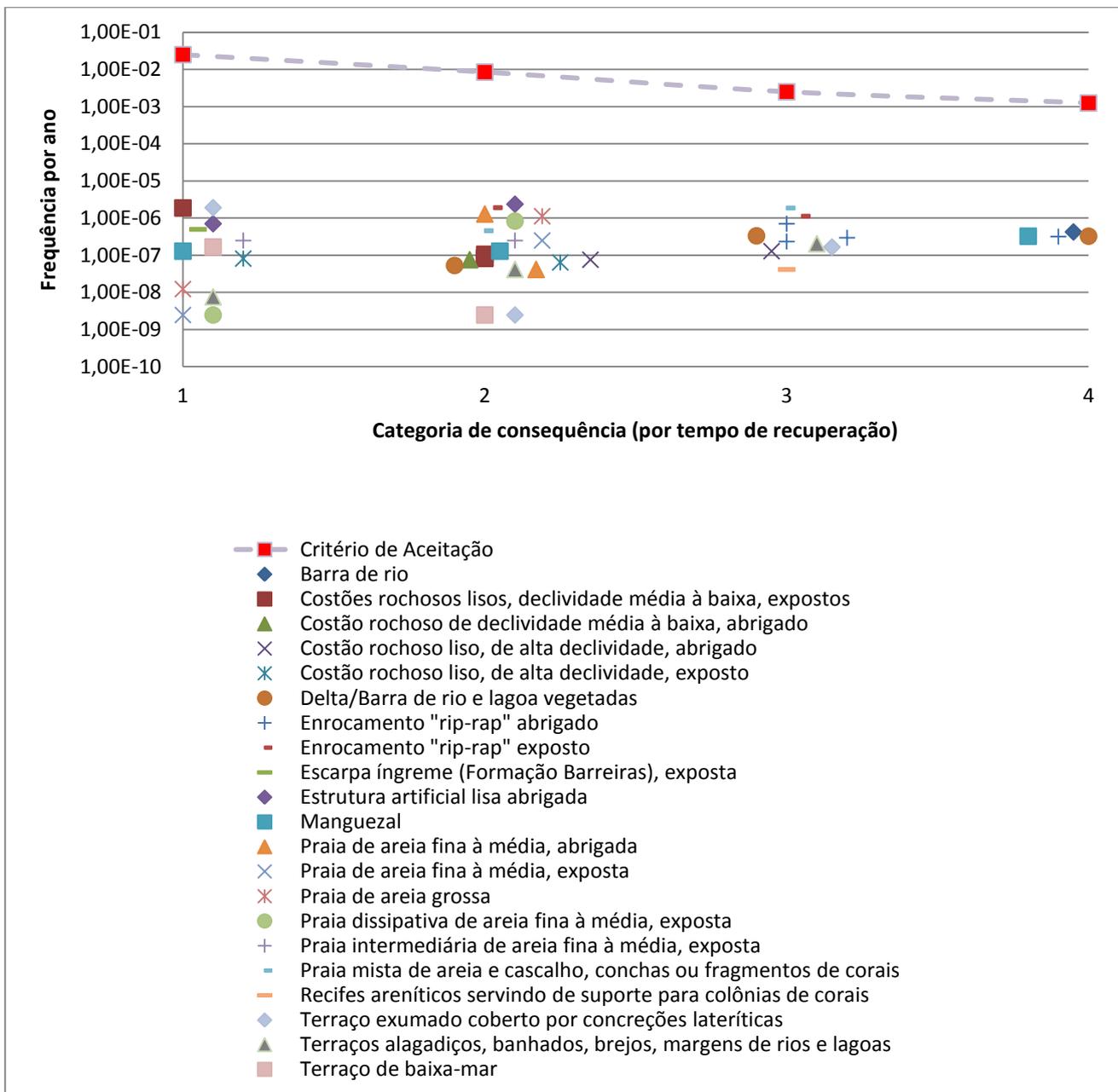


Figura 22- Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C2 (Perda de controle de poço) na primavera distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

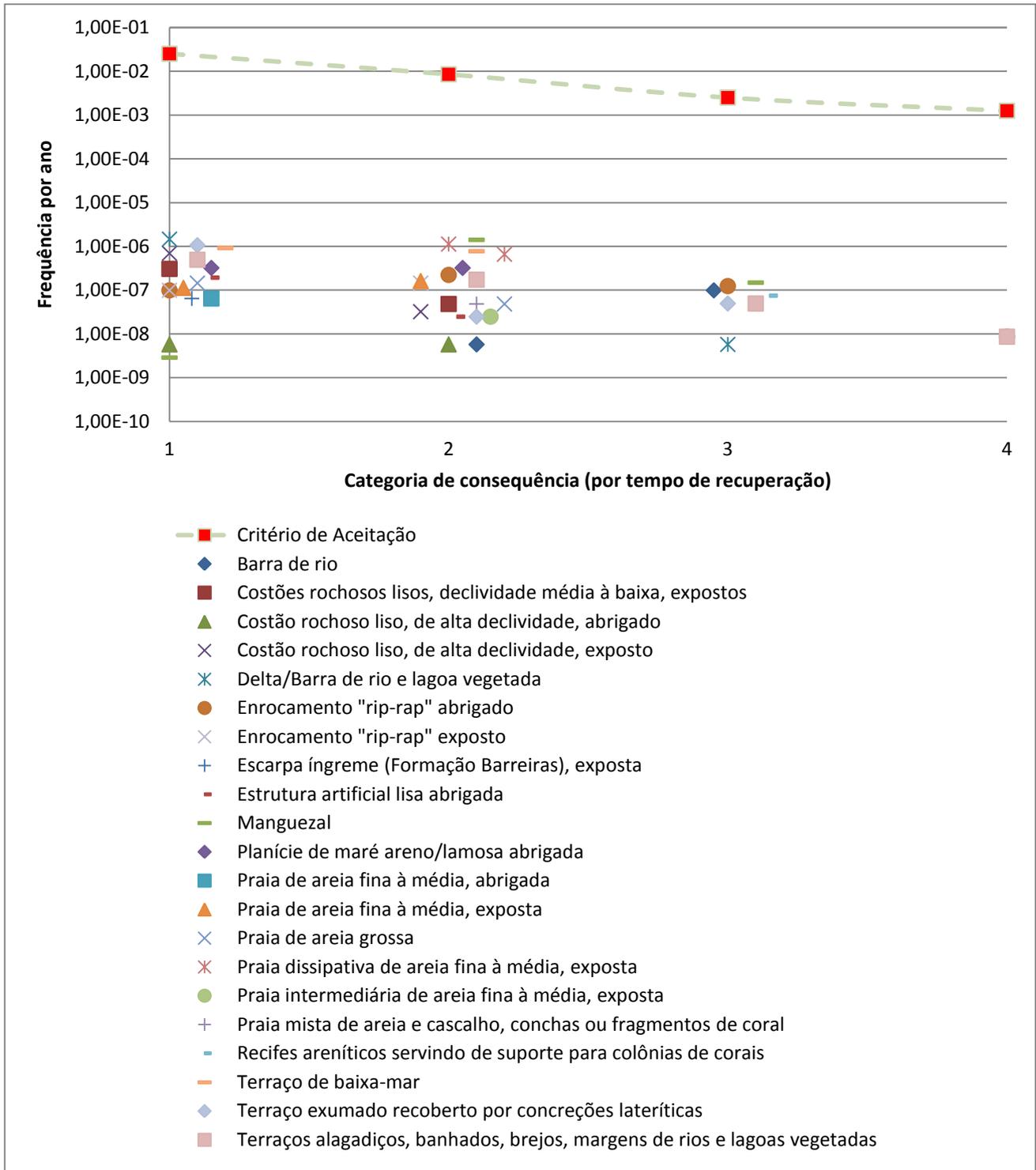


Figura 23 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C2 (Perda de controle de poço) no verão distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

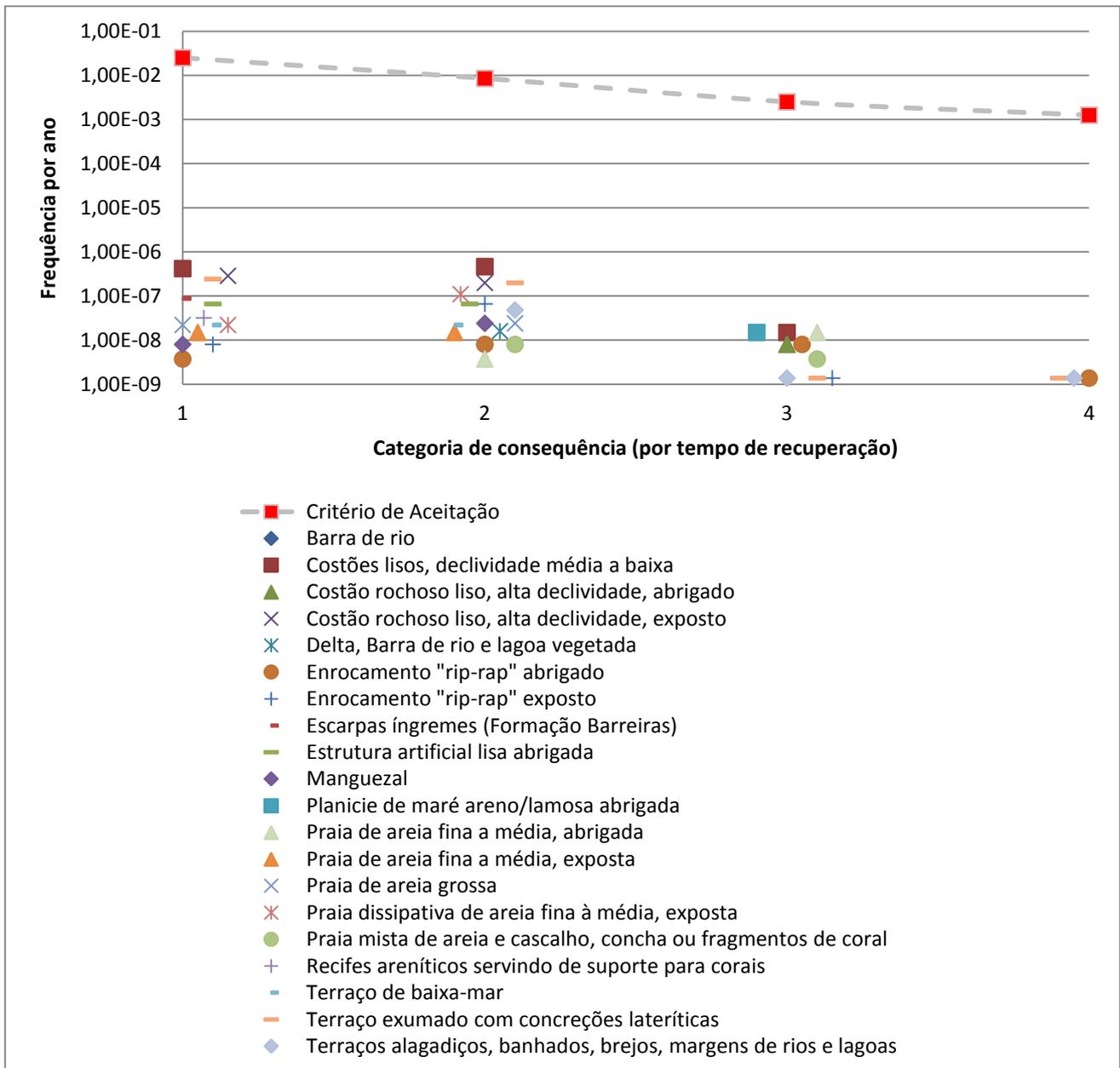


Figura 24 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C3 (vazamento no separador do primeiro estágio) no inverno distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

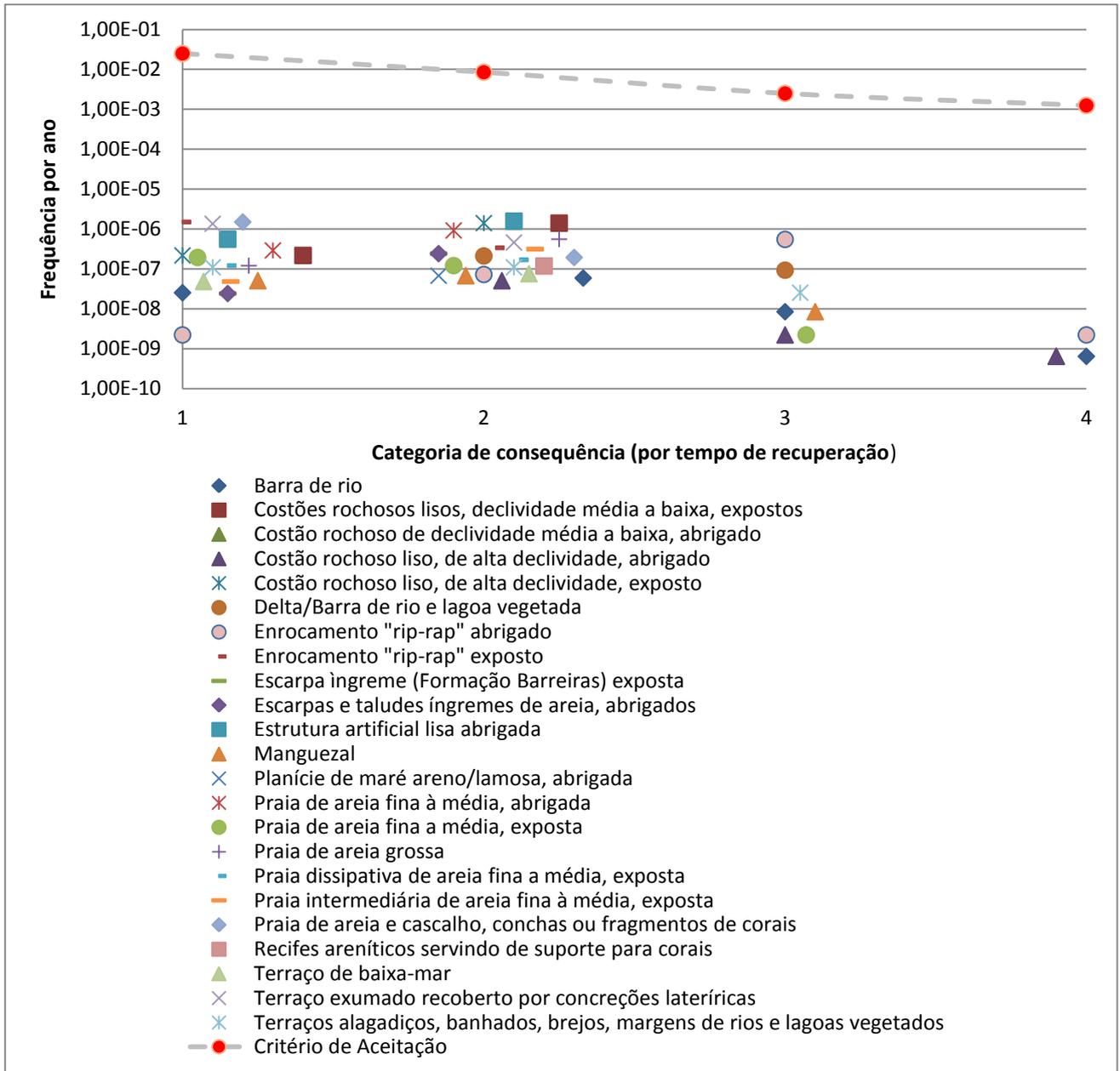


Figura 25 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C3 (vazamento no separador do primeiro estágio) no outono distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

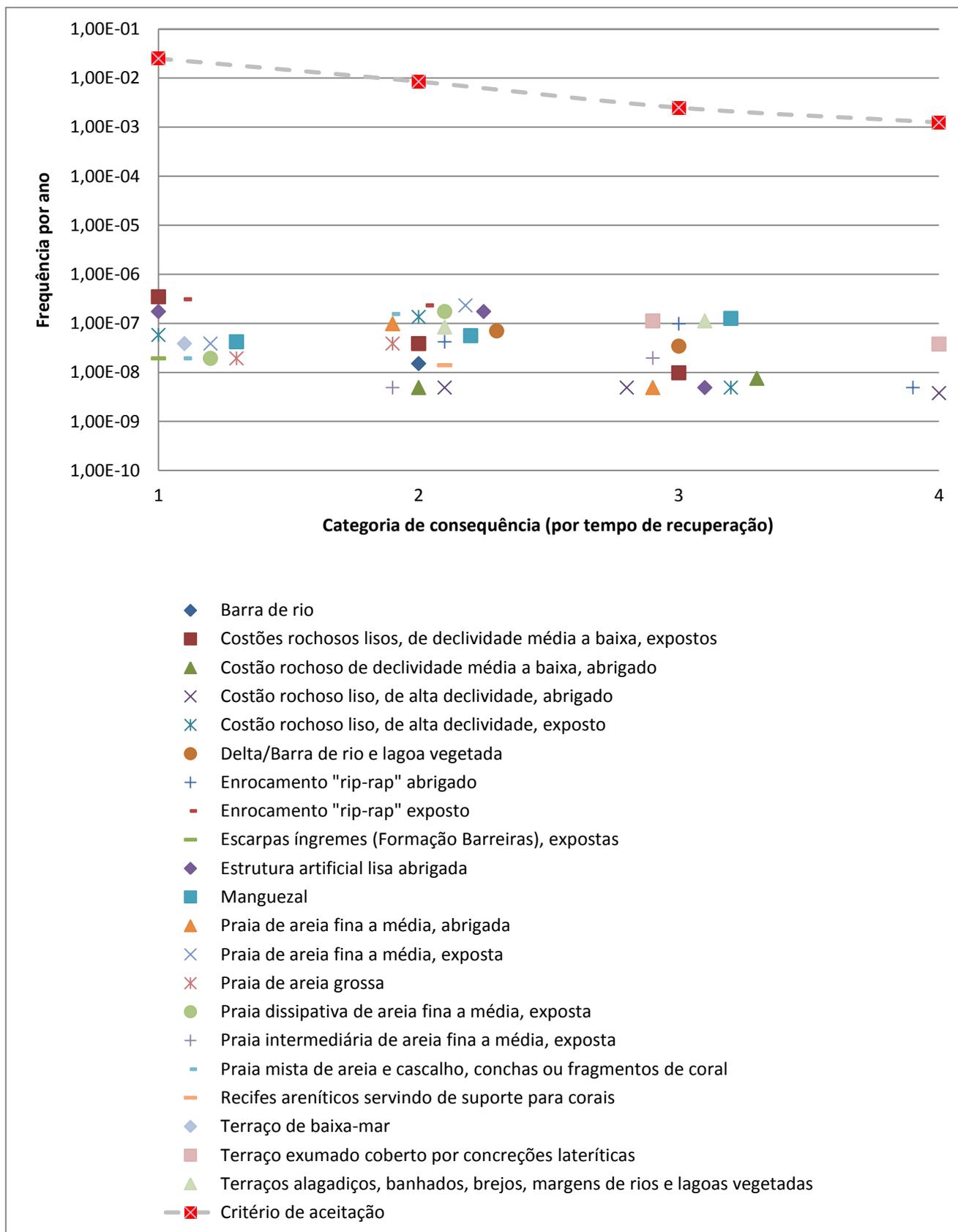


Figura 26 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C3 (vazamento no separador do primeiro estágio) na primavera distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

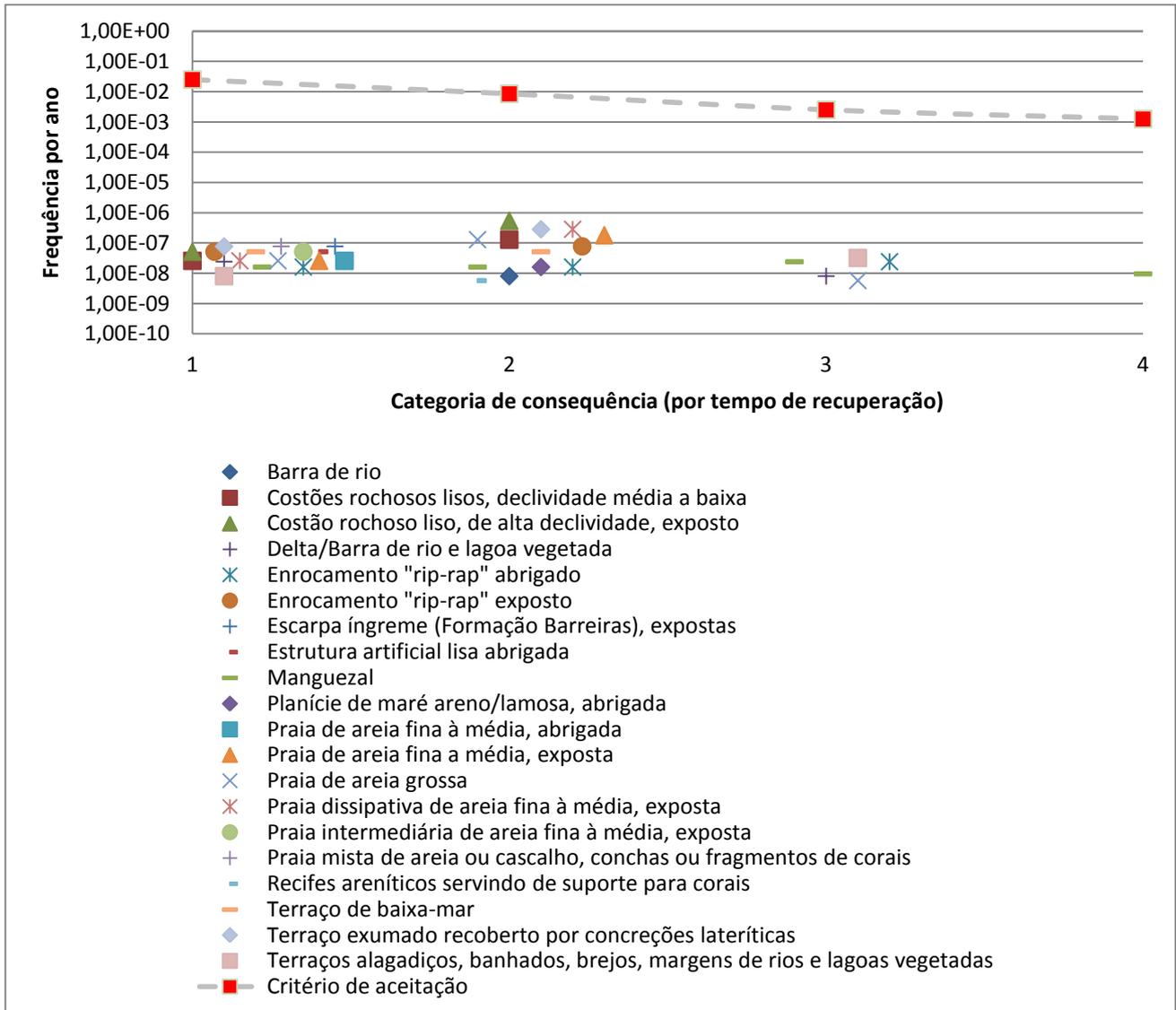


Figura 27- Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C3 (vazamento no separador do primeiro estágio) no verão distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

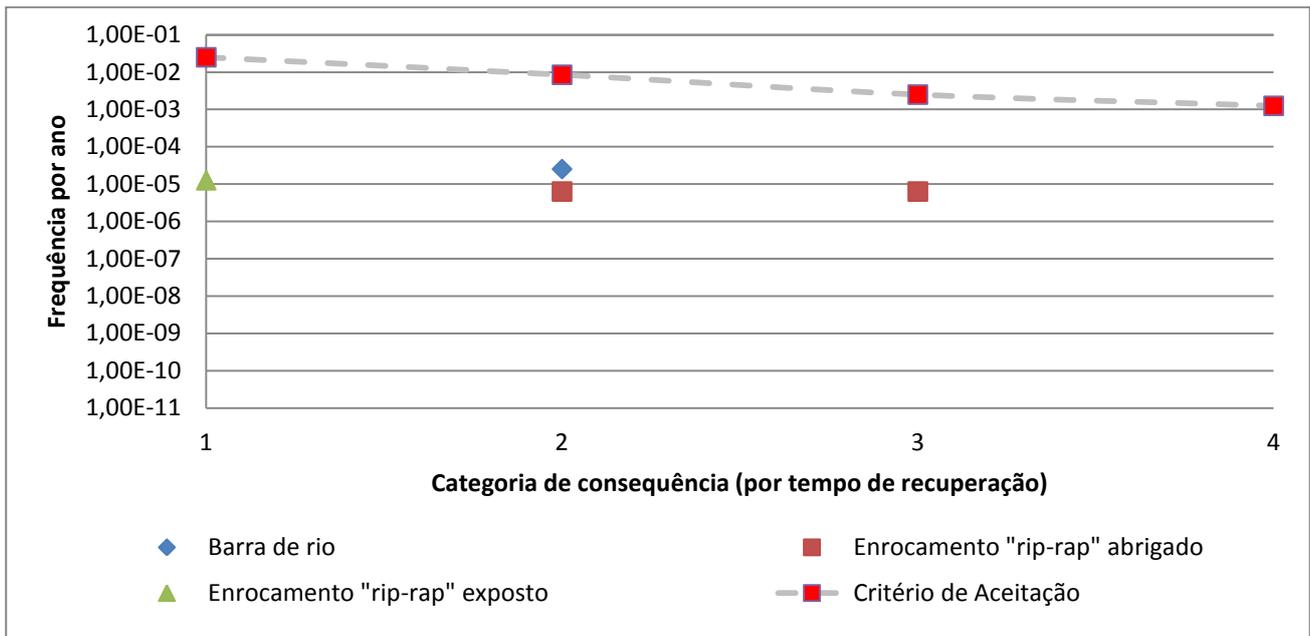


Figura 28 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C4 (vazamento na circulação de óleo) no outono distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

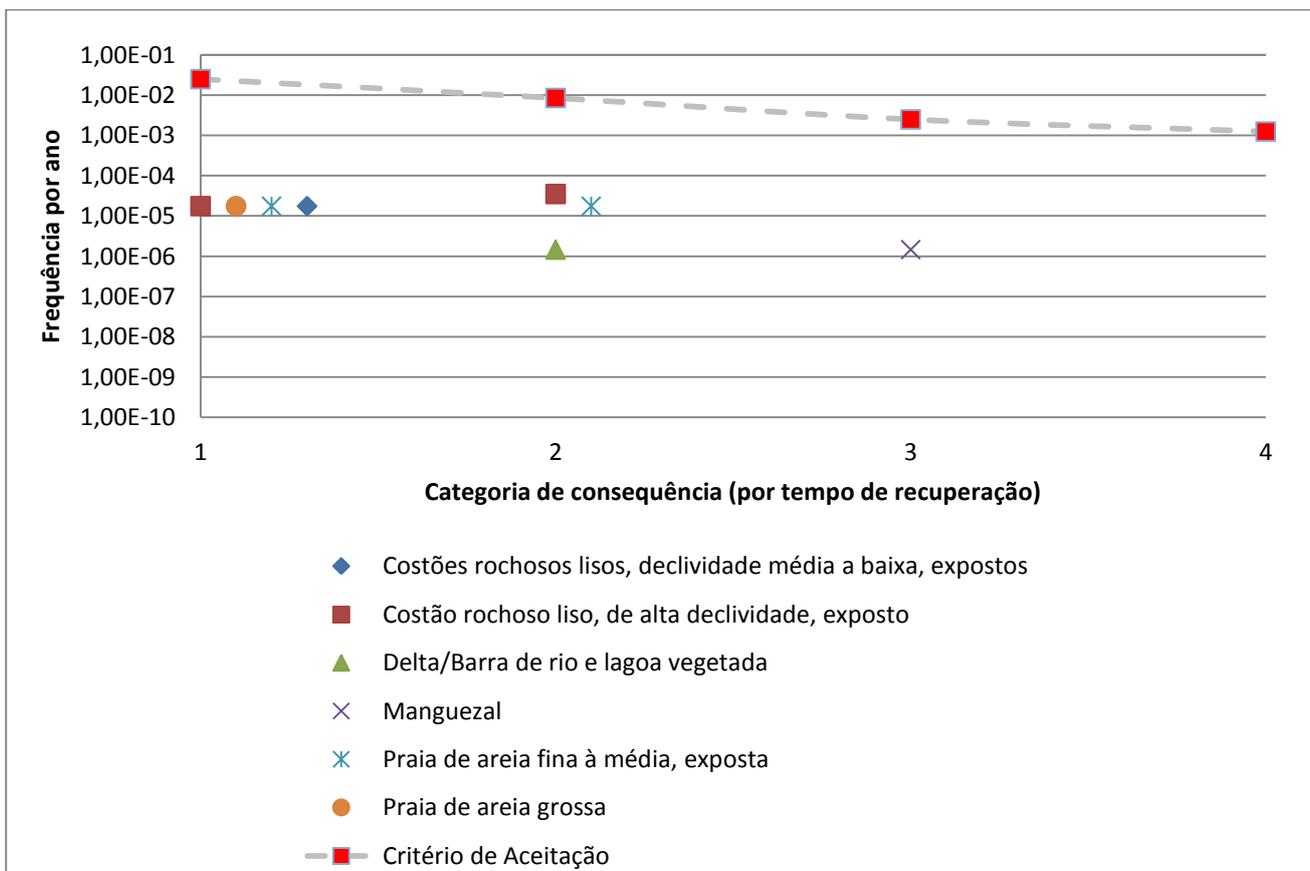


Figura 29 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C4 (vazamento na circulação de óleo) no verão distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

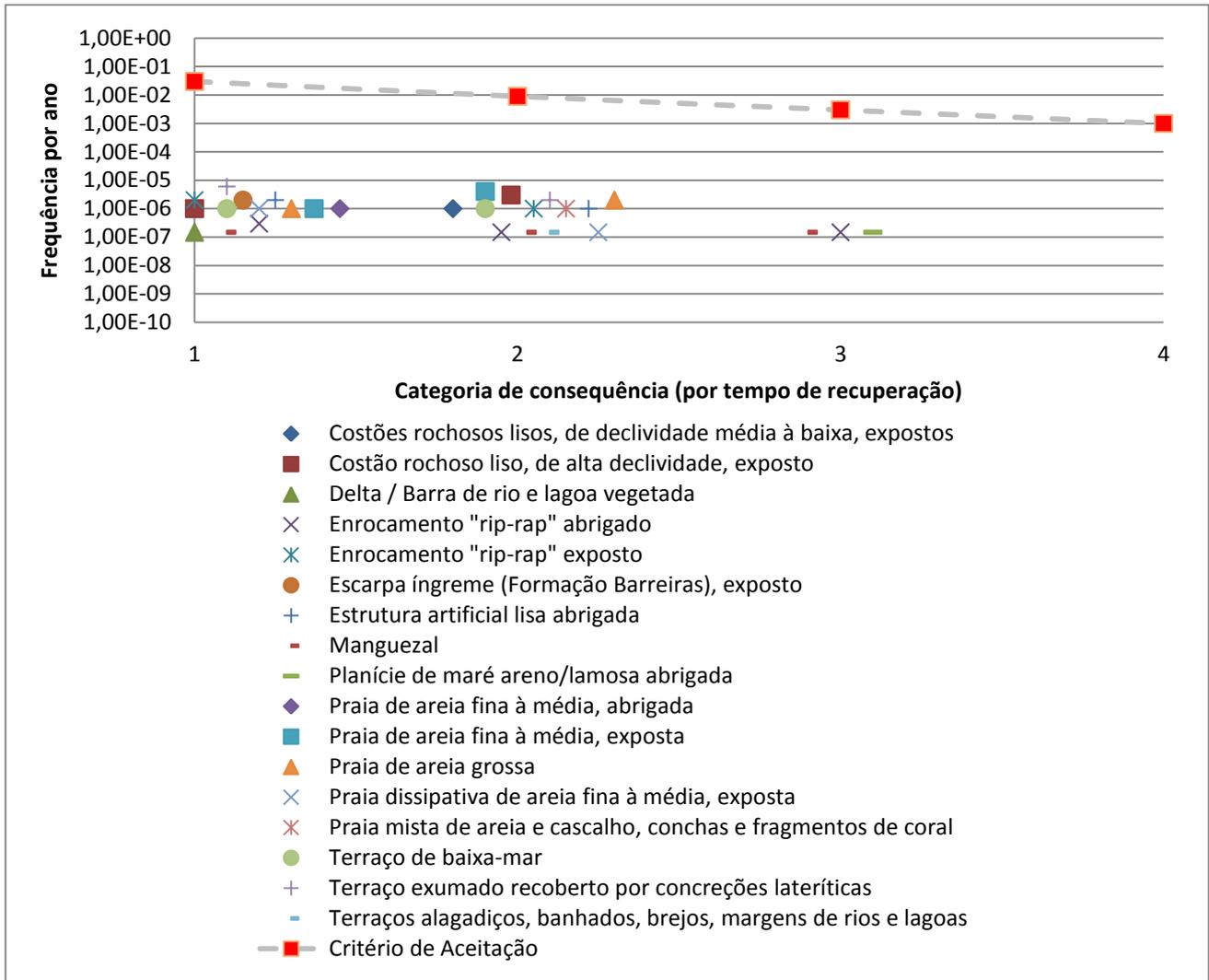


Figura 30 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C5 (vazamento no sistema de escoamento) no inverno distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

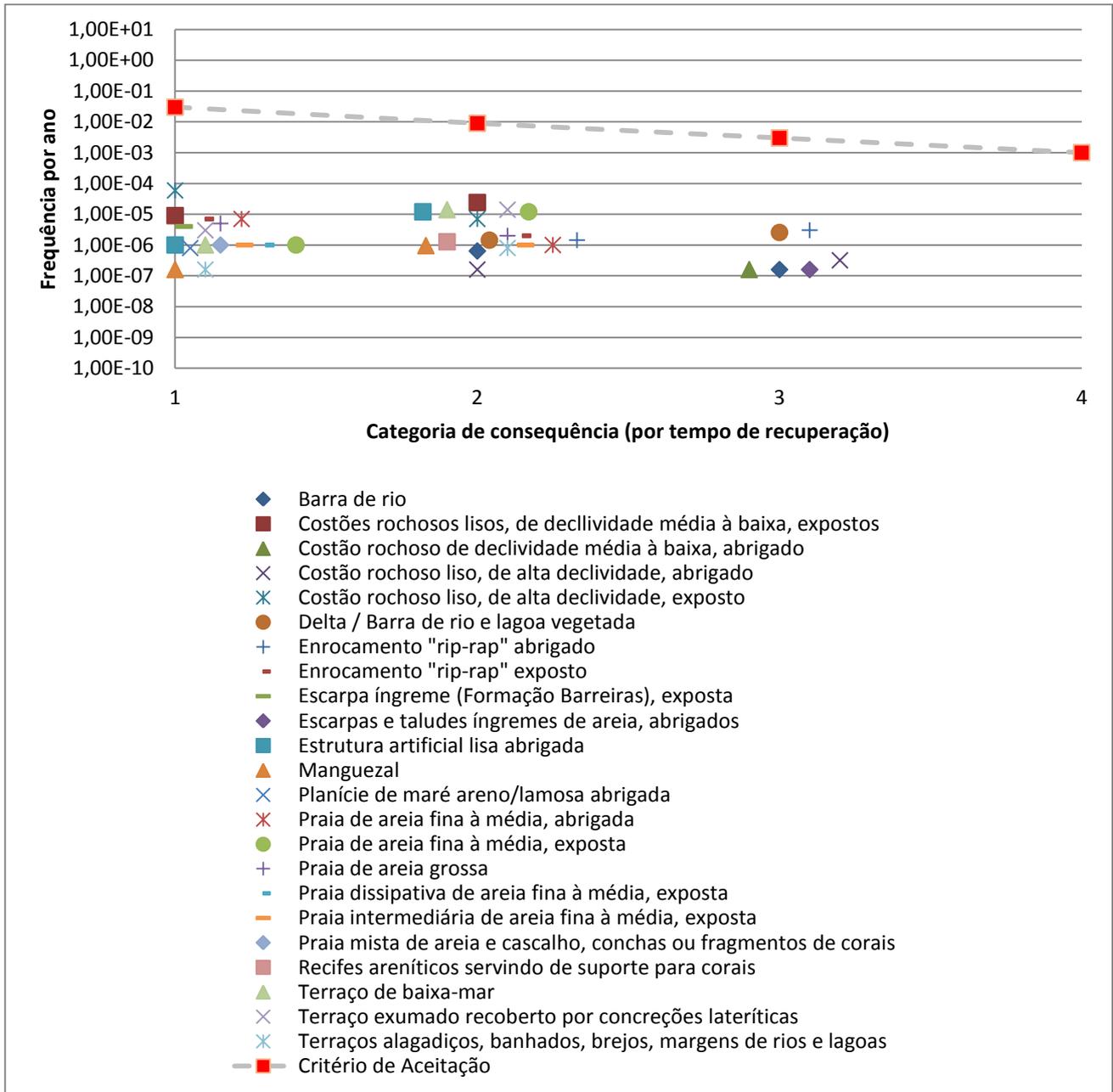


Figura 31 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C5 (vazamento no sistema de escoamento) no outono distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

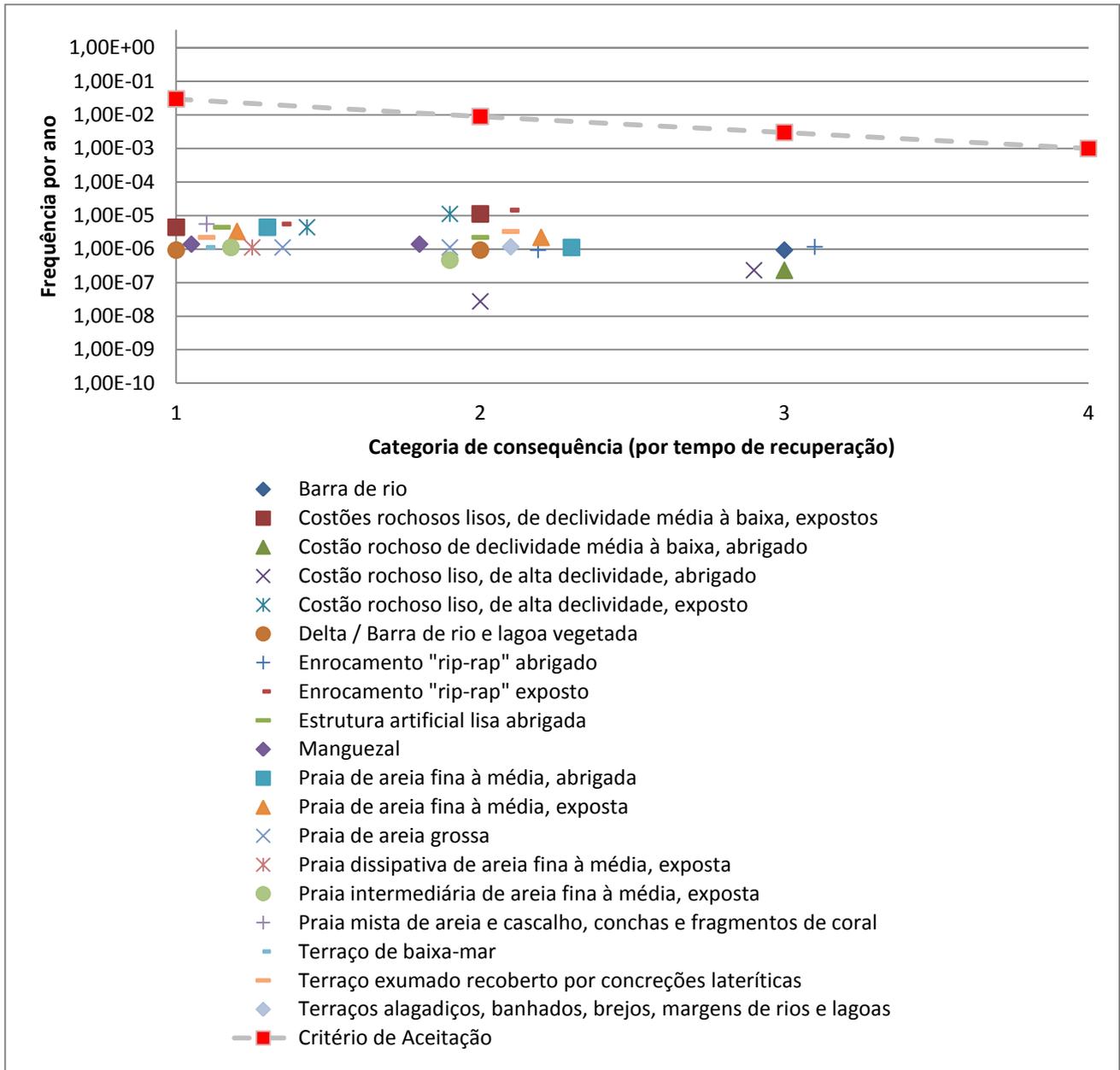


Figura 32 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C5 (vazamento no sistema de escoamento) na primavera distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

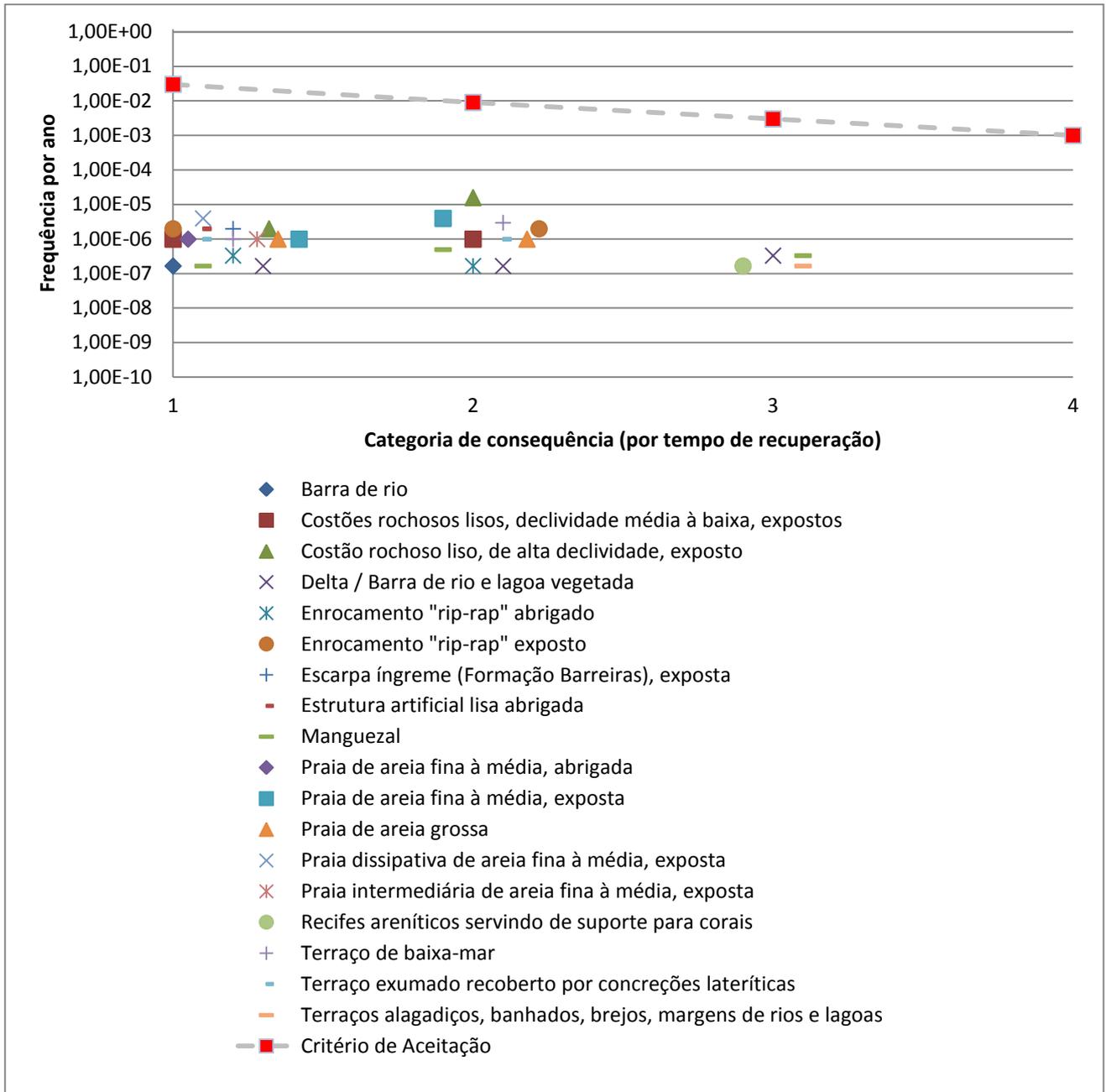


Figura 33 - Análise de frequências de risco (por ano) para os ambientes no litoral que têm probabilidade de ser atingidos por óleo para o cenário C5 (vazamento no sistema de escoamento) no verão distribuídos em categorias e comparado com o critério de aceitação escolhido. Observe que as frequências não chegam a atingir o critério de aceitação utilizado.

Os resultados das análises de frequência (Figuras 16 à 33), mostram que, as frequências dos eventos centrais (dados por cenário na Tabela 3) são dominantes na formação da frequência de risco final, a ser analisada pelo critério de aceitação. Por isso eventos com uma frequência de ocorrência muito pequena não são considerados pelo método MIRA, por mais suntuoso o montante de óleo que seja presente neste evento. O cenário C4, por exemplo, obteve uma frequência alta, apesar do pequeno volume de óleo. O mesmo ocorre para o cenário C5. Por sua baixa frequência de evento central, o cenário C1 se apresentou como o cenário que oferece menor risco.

Se analisarmos somente às frequências finais nas células de um modo geral por cenário, considerando as maiores frequências atingidas, das maiores para as menores, os cenários se organizariam da seguinte forma: C4 e C5, C2, C3 e C1. Ou seja, não necessariamente grande um volume está associado ao maior risco de prejudicar o meio ambiente, se este evento tem uma probabilidade muito pequena de acontecer, ele tem um potencial danoso menor.

O Componente de Valor Ecosistêmico (*Valued Ecosystem Component - VEC*) escolhido para análise baseada no dano foi a desova das tartarugas marinhas, baseada em sua sensibilidade em caso de derramamento e na existência de dados. Entre todas as espécies/organismos com potencial de serem afetados por um derramamento de óleo, é sobre as tartarugas que há dados de distribuição ou densidade ao longo do ano e ao longo da costa, apesar de ainda não termos os dados completos para o litoral. Porém estes dados não foram disponibilizados de uma forma a atender os requisitos do método, bem como o próprio método não possui uma chave de conversão de danos para tartarugas. Por isso a análise foi feita até o segundo nível, baseada em exposição, não sendo possível utilizar a análise baseada em danos.

Caso tivesse sido produzido o resultado com VEC ao nível de população ou espécie (como por exemplo no caso de se utilizar os dados de nidificação de tartarugas marinhas), seria possível ter uma noção de que áreas seriam mais sensíveis em termos de espécie a um vazamento de óleo no Campo de Golfinho. Uma aplicabilidade deste resultado seria proteger áreas mais sensíveis em relação ao VEC analisado em caso de ações de resposta e contingência do óleo. Não é possível se prever se esta análise embargaria o licenciamento ambiental do Campo de Golfinho sem realizá-la, mas considerando os resultados por habitats (utilizando os SL), a hipótese é que o Campo seria licenciado, talvez com alguma exigência maior na estratégia de resposta a um possível acidente para uma área com grande incidência de nidificações no litoral.

Os métodos quantitativos de riscos ambientais se mostram mais eficientes e realistas comparados aos qualitativos, utilizados no EIA/RIMA, por considerar a sensibilidade litoral e devido aos vários fatores quantitativos que são incluídos na análise qualitativa (volume de óleo que chega à costa, frequência do evento central, tempo teórico de recuperação do ambiente, sensibilidade do litoral), principalmente para se trabalhar ambientes com variadas sensibilidades litorais, sendo eficiente tanto para áreas de plataforma quanto oceano aberto desde que bem utilizada, com dados de entrada adequados, dados de entrada de modelagem de destino de óleo utilizando modelos hidrodinâmicos adequados e com resolução suficiente (quanto mais costeira a análise, maior resolução dos dados deverá ser utilizada).

Os resultados do presente estudo ratificam os do EIA, ou seja, o campo seria liberado para exploração.

Uma deficiência do método é que ele não avalia o óleo que vai para o sedimento e seu impacto

ambiental, avalia somente o óleo que chega na linha de costa e a sensibilidade ambiental avaliada é somente no litoral. Há potencial para este método ser utilizado também para destino do óleo no sedimento, desde que sejam providos os dados por célula de sensibilidade do fundo.

Outra deficiência, não se refere ao método MIRA, mas a disponibilidade de base de dados de composição dos óleos em perfurações nacionais. O Brasil possui os dados sobre cada tipo de óleo perfurado, porém estes são dados mantidos em sigilo. Para uma melhor modelagem de destino de óleo em licenciamento e para fins de pesquisas científicas estes dados deveriam ser disponibilizados. O que acontece é que como são dados sigilosos, acaba se utilizando óleos com grau API (única informação disponível ao público) aproximado, mas que não necessariamente tem constituição química parecida, o que pode gerar um comportamento hidrodinâmico e um intemperismo distinto e deveria ser levado em consideração nas modelagens de destino de óleo, principalmente para fins de licenciamento ambiental.

Outra limitação é o conhecimento sobre intemperismo de óleo para ambientes tropicais e similares, uma vez que os modelos de intemperismo de óleo atuais foram desenvolvidas para altas latitudes (regiões frias). Isto gera a necessidade do desenvolvimento de pesquisas sobre o intemperismo do óleo em regiões tropicais ou similares. Esta necessidade pode vir a ser suprida pela parceria entre o Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da UFES e a SINTEF *Applied Chemistry*.

Com relação ao presente conjunto de dados observou-se uma diferença significativa na dinâmica entre os anos de 2008 e 2009. É importante que se modele um período com maior duração. Isto é, que contemple pelo menos uma variação intradecadal. Não existem referências específicas que ratifiquem esta afirmativa, no entanto o estudo de Servino (2014) sugere que a CB possui grande variabilidade na escala interanual ao longo de toda a sua extensão.

É preciso considerar períodos que contemplem a ocorrência de eventos meteorológicos e oceanográficos de larga escala, como por exemplo os eventos de El Niño e La Niña. Estudos como o de Hameed *et al.*(2013) e Enfield *et al.* (1997) mostraram que ocorrem alterações na CB e no Giro Subtropical do Atlântico Sul, este sofrendo deslocamento ou aceleração, devido aos eventos de El Niño e La Niña. Assim, seria importante incluir nas análises anos de ocorrência de El Niño e La Niña, também seria interessante modelar o destino do óleo derramado somente em anos de ocorrência destes fenômenos ou de anos diferentes de El Niño e anos diferentes com La Niña e comparar os resultados para se constatar as diferenças entre o comportamento hidrodinâmico de um vazamento de óleo durante estes eventos de larga escala.

4 CONCLUSÃO

As modelagens realizadas no presente estudo são mais próximas à realidade, o que enfatiza a importância do uso de um melhor modelo hidrodinâmico nas simulações de destino de óleo.

Mesmo com vazamentos de menor volume em relação ao pior caso do EIA/RIMA, a abrangência do pior caso foi maior no presente estudo, atingindo mais municípios do que na modelagem do EIA/RIMA, Isso foi atribuído principalmente às características do modelo hidrodinâmico, que representa melhor a hidrodinâmica de sub e mesoescala.

É essencial que se abranja no mínimo cada uma das quatro estações do ano, e não somente os extremos estabelecidos no termo de referência, o verão e o inverno, já que estações intermediárias como o outono e primavera se mostraram potencialmente danosos para a região.

O método MIRA é perfeitamente aplicável ao licenciamento ambiental de países características subtropicais e tropicais desde que existam os dados de para recursos biológicos e socioeconômicos, principalmente com distribuição geográfica.

Comparando-se o método MIRA com o método qualitativo tradicionalmente usado no Brasil, o método MIRA produz resultados mais detalhados do que se considerar somente duas estações extremas, com resultados mais fáceis de entender, já que é aplicado um valor limite para o risco.

A partir dos resultados obtidos neste estudo, pode-se afirmar que se aplicando a análise quantitativa ao nível baseado em exposição, o campo de Golfinho estaria liberado para exploração, ratificando o resultado do EIA/RIMA.

Nem sempre áreas com maiores sensibilidades litorais serão as mais afetadas por um vazamento de óleo. Dependendo do volume que toca a costa, áreas com sensibilidade ambiental menor podem ter um maior tempo teórico de recuperação dos danos sofridos.

7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para futuros estudos, se faz necessário um levantamento de dados de socioeconomia e de distribuição de VEC's ao longo da costa, para cálculos de vulnerabilidade que envolvam socioeconomia e dados biológicos à nível de população e espécie. Isto incluirá nas análises estes quesitos que são negligenciados e que podem ser de grande importância dependendo da área de trabalho. Estes dados devem ser organizados em bancos de dados com localização, no formato similar ao que foi feito com os ISLs no Carta SÃO.

Ficou evidente a necessidade do Brasil fazer um levantamento quantitativo da distribuição populacional ao menos de algumas espécies chave para serem utilizadas neste tipo de análise de risco, uma vez que esse tipo de análise de risco comprovou ser eficiente e efetivamente reduzir o número de acidentes em outros países. Estes dados quantitativos das populações contribuem para que elas sejam ainda mais completas e mais específicas, mostrando resultados mais eficientes em nível de população ou espécie, possibilitando que o licenciamento ambiental possa estar tão atualizado quanto aos países de ponta neste tipo de tecnologia de análise, não menosprezando sua importância e evitando assim maiores prejuízos ecológicos e econômicos.

É essencial que se desenvolvam estudos de intemperismo do óleo em regiões tropicais, bem como os dados sobre a composição do óleo de cada poço perfurado seja divulgada pelo menos para fins de licenciamento ambiental e pesquisa, já que a composição do óleo é determinante no comportamento e no destino final em caso de vazamento.

Há necessidade de se modelar uma série multianual mais longa para a região de estudo, objetivando abranger as variabilidades interanuais, bem como realizar estudos relacionados aos eventos de El Niño e La Niña para melhor compreender qual a influência desses processos sobre o destino do óleo na nossa região.

Outra abordagem interessante seria aplicar o método MIRA utilizando períodos sazonais ainda menores, como por exemplo mensais, e ver se há representatividade nas modelagens resumidas em 4 estações por ano.

REFERÊNCIAS

- ARRUDA, W. Z.; CAMPOS, E. J. D.; ZHARKOV, V.; SOUTELINO, R. G.; SILVEIRA I. C. A. Events of equatorward translation of the Vitoria Eddy. **Cont. Shelf Res.**, v. 70(1), pp. 61-73. 2013.
- AVEN, T.; VINNEM, J.E. On the use of risk acceptance criteria in the offshore oil and gas industry. **Reliab. Eng. Sys. Safe.**, v.90, 1, p.15-24, 2005.
- BASTOS, C.; FERREIRA, N.J. Análise climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São Paulo, 2000.
- BELLINI, C.; MARCOVALDI, M.A.; SANCHES, T.M.; GROSSMAN, A.; SALES, G. Atol das Rocas Biological Reserve: second largest *Chelonia midas* rookery in Brazil. Marine Turtle Newsletter, n. 72, p.1-2, 1996.
- BLECK, R., ROOTH, C., HU, D. “Salinity-driven Thermocline Transients in a Wind- and Thermohaline-driven Isopycnic Coordinate Model of the North Atlantic.” J. of Phys. Oceanogr., v. 22, pp. 1486–1505, 1992.
- BRANDSAETER, A. Risk assessment in the offshore industry. **Safety Sci.**, n.40, p.231-269, 2002.
- BRUDE, O.W. **Method for environmental Risk Analysis – Revision 2007**. DNV report Nr. 2007-0063. OLF(Norwegian Oil Industry Association) and NOFO(Norwegian Clean Seas Association for Operating Companies), 2007.
- BRUDE, O.W.; ASPHOLM, O.Ø.; ANDERS, R. **Environmental Risk Analysis for offshore Oil and Gas activities**. Rio Oil e Gas Expo and Conference, 2008.
- CAMPOS, E., 2006. Equatorward translation of the Vitoria Eddy in a numerical simulation. **Geophys. Res. Lett.**, v. 33, pp. L22607.
- CARDOSO, C.; VAROVESKA, L. **Tomada de decisão para redução do risco ambiental offshore**. 4Th Latin American Conference on Process Safety, 2012.
- CEPEMAR. **EIA – Estudo de Impacto Ambiental para a Atividade de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural do Campo de Golfinho, Bacia do Espírito Santo**. Petrobrás, 2006a.
- CEPEMAR. **RIMA do Campo de Golfinho: Atividade de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural do Campo de Golfinho, Bacia do Espírito Santo**. Petrobras, 2006b.
- CHASSIGNET, E., SMITH, L. T., HALLIWEL, G. North Atlantic Simulations with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): Impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and termobaricity. **J. Phys. Oceanogr.**, v. 33, pp. 2504–2526, 2003.

- COSTA, T. P. **Existe um Vórtice de Vitória Climatológico?** Monografia de Bacharelado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 63 pp. 2007.
- CRONE, T.J.; TOLSTOY, M. Magnitude of the 2010 Gulf of Mexico Oil Leak. **Science**, n.330, p.634-643, 2010.
- ENFIELD, D.B; MAYER, D.A. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. **J. Geophys. Res.**, vol.102, n.C1, p. 929-945, 1997.
- FRAGOSO, M.R.; TORRES JR., A.R. **Estudo preliminar sobre a circulação de mesoescala na Bacia do Espírito Santo**. Relatório Técnico. Pró-Oceano. Rio de Janeiro, 2009.
- FREITAS, A.C.T. **Avaliação espaço-temporal de feições ciclônicas no Embaiamento de Tubarão (ES) através de imagens de satélite de concentração de clorofila-a**. Monografia de graduação em Oceanografia. Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- GAETA, S. A.; LORENZZETTI, J. A.; MIRANDA, L. B.; SUSINI-RIBEIRO S.; POMPEU, M.; ARAUJO, C. E. S. The Vitória Eddy and its relation to the phytoplankton biomass and primary productivity during the austral fall of 1995. **Arch. Fish.Mar. Res.**, v. 47, pp. 253–270. 1999.
- GEM/FOIG. **Environmental Risk Assessment (ERA) of exploration drilling operations in Faroeste offshore areas in 2001**. Version 01, 2001.
- GHERARDI, D.F.M.; CABRAL, A.P. **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima do Espírito Santo**. Brasília: MMA, SMCQ, 2010.
- HAAG, P.A.M.U.de; ALE, B.J.M. **Guideline for quantitative risk assessment** (“Purple book”). Publication Series on Dangerous Substances (PGS 3). Holanda, 2005.
- HAMEED, S.; SPERBER, K.R.; MEINSTER, A. Teleconnections of the Southern Oscillation in the Tropical Atlantic Sector in the OSU Coupled Upper Ocean-Atmosphere GCM. **J. Climate**, American Geophysical Society., vol.06, p. 487-498, 1993.
- HOGAN, P., 2004, **“Nested Gulf of Mexico Modeling with HYCOM”**, 8th Hybrid Coordinate Ocean Model Workshop. HYCOM NOPP GODAE meeting, October 27-29, 2004, RSMAS, Miami, FL.
- HORTON, T.W.; HOLDAWAY, R.N.; ZERBINI, A.N.; HAUSER, N.; GARRIGUE, C.; ANDRIOLO, A.; CLAPHAM, P.J. Straight as an arrow: humpback whales swim constant course tracks during long-distance migration. **Biol. letters**, v.7, n.5, p.674-670, 2011.
- HYCOM CONSORTIUM. **Hycom Overview**. Consortium for Data Assimilative Modeling. Disponível em: <<http://hycom.org/hycom/overview>>. Acesso em: 18-05-2015.
- ICMBio (Instituto Chico Mendes)/MMA(Ministério do Meio Ambiente). Plano de Ação Nacional para Conservação das Tartarugas Marinhas. Série Espécies Ameaçadas, nº25, 2011.

ITOPF. **Clean-Up Techniques: Containment and Recovery of Floating Oil**, 2009a. Disponível em: <<http://www.itopf.com/spill%2Dresponse/>>. Acesso em: 19 de setembro de 2013.

LIBRE, J-M.; PLISSON-SAUNE, S.; QUINIOU, V.; TOTAL E&P; NISSEN-LIE, T.R.; VANDENBUSSCHE, V.; BRUDE, O.W.; RUDBERG, A.; BATT3UT, M.; DNV. **Pilot Study of Environmental Risk Analysis Methodology Applied to Angolan Dalia FPSO**. SPE/APPEA International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Perth, Australia, 2012.

LIMA, L.N.; LENTINI, C.A.D. **Variabilidade sazonal da profundidade da camada de mistura na região do Complexo recifal de Abrolhos e da Cadeia Vitória-Trindade baseada em dados de vento derivados do satellite QuikSCAT**. In: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p.6533-6540, 2009.

MARCOVALDI, M.A.; VIEITAS, C.F.; GODFREY, M.H. Nesting and conservation management of haeskill turtles (*Eretmochelys imbricate*) in northern Bahia, Brazil. **Chelonian Conserv. and Bi.** Massachusetts, v.3, n.2, p.301-307, 1999.

MARTINS, T.R. **A Corrente do Brasil no Embaiamento de Tubarão - Oceano Atlântico Sudoeste**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental, UFES, 2014.

MELCHERS, R.E. On the ALARP approach to risk management. **Reliab. Eng. Sys. Safe.**, 71, p.201-208, 2001.

MMA. **Panorama da Conservação dos Ecossistemas Costeiros e Marinhos no Brasil**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Gerência de Biodiversidade Aquática e Recursos Pesqueiros. Brasília, 2010.

MOURA, R.; SECCHIN, N.A.; AMADO-FILHO, G.M.; FRANCINI-FILHO, R.B.; FREITAS, M.O.; MINTE-VERA, C.V.; TEIXEIRA, J.B.; THOMPSON, F.L.; DUTRA, G.F.; SUMIDA, P.Y.G.; GUTH, A.Z.; LOPES, R.M.; BASTOS, A.C. Spatial patterns of benthic megahabitats and conservation planning in the Abrolhos Bank. **Continental Shelf Res.**, 70, p.109-117, 2013.

NISSEN-LIE, T.R.; ASPHOLM, O.Ø. **Method for Environmental Risk Analysis of Marine Terminals, Process Industry Terminals, Pipelines and Shipping Lanes**. Rio Oil e Gas, Expo and Conference, 2008.

NOAA. **Environmental Sensitivity Index Guidelines** version 2.0. Seattle, Washington, 1997.

OFFSHORE TECHNOLOGY. **Golfinho Field**. Disponível em: <<http://www.offshore-technology.com/projects/golfinhofieldespirit/>>. Acesso em 18 de agosto de 2013.

OLF/ NOFO. **Method for Environmental Risk Analysis (MIRA)**. Versão 2007.

ORNITZ, B. E.; CHAMP, M.A. **Oil Spills First Principles: Prevention & Best Response**. Elsevier, Oxford, 653p. 2001.

PEREIRA-FILHO, G.H.; AMADO-FILHO, G.M.; MOURA, R.L. de; BASTOS, A.C.; GUIMARÃES, S.P.B.; SALGADO, L.T.; FRANCINI-FILHO, R.B.; BAHIA, R.G.; ABRANTES, D.P.; GUTH, A.Z.; BRASILEIRO, P.S. Extensive rhodolith beds cover the summits of Southwestern Atlantic Ocean Seamounts. **J. Coastal Res.**, 28, 1, p.261-269, 2012.

PETROBRÁS. **Campo de Golfinho: esclarecimento sobre a matéria da Folha de São Paulo**. Disponível em: <<http://fatosedados.blogspot.com.br/2011/10/31/campo-de-golfinho-esclarecimento-a-folha/>>. Acesso em: 12 de agosto de 2013. Publicado em 31 de outubro de 2011.

PIMENTEL, F.P. **A Corrente do Brasil e a Corrente de Contorno Intermediária na Região da Cadeia Vitória Trindade**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

PINHEIRO, H.T.; MAZZEI, E.; MOURA, R.L.; AMADO-FILHO, G.M.; CARVALHO-FILHO, A.; BRAGA, A.C.; COSTA, P.A.S. FERREIRA, B.P.; FERREIRA, C.E.L.; FLOETER, S.R.; FRANCINI-FILHO, R.B.; GASPARINI, J.L.; MACIEIRA, R.M.; MARTINS, A.S.; OLAVO, G.; PIMENTEL, C.R.; ROCHA, L.A.; SAZIMA, I.; SIMON, T.; TEIXEIRA, J.B.; XAVIER, L.B.; JOYEUX, J.C. Fish biodiversity of the Vitória-Trindade Seamount Chain, Southwestern Atlantic: An updated Database. **PLoS ONE** 10(3): e0118180. Doi: 10.1371/journal.pone.0118180. 2015.

REED, M.; RYE, H.; DURGUT, I.; JOHANSEN, Ø.; BRÖNNER, U.; HETLAND, B.; DITLEVSEN, M. K.; ARSLANOĞLU, Y.; RØNNINGEN, P.; NEPSTAD, R.; DAAE, R. L.; HØVERSTAD, B. **MEMW Users Manual Version 6.2**. Marine Environmental Modeling Workbench: OSCAR and DREAM Models. SINTEF Materials and Chemistry. Marine Environmental Technology, 2012.

SCHMID, C.; SCHAFER, H.; PODESTÁ, G.; ZENK, W. The Vitoria Eddy and Its Relation to the Brazil Current. **J. Phys. Oceanogr.**, v. 25, pp. 2532-2546, 1995.

SCHOFIELD, S. Offshore QRA and the ALARP principle. **Reliab. Eng. Sys. Safe.**, n.61, p.31-37, 1998.

SANTOS, F.T. dos. **Variação espaço-temporal da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) entre os paralelos de 10°S e 25°S**. Monografia de Graduação. Departamento de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

SERVINO, R.N. **Variabilidade interanual das propriedades dinâmicas da Corrente do Brasil e sua relação com o ENSO**. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais, Departamento de Oceanografia e Ecologia, 2011.

SERVINO, R.N. **A bifurcação da Corrente do Brasil no Embaiamento de Tubarão e seu papel na formação de vórtices ciclônicos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental, 2014.

SILVEIRA, **O sistema Corrente do Brasil na Bacia de Campos, RJ**. Tese de livre docência. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

SEAPOP. **Offshore spills of crude oil 2001-2011.** Disponível em: http://www.seapop.no/opencms/export/sítios/SEAPOP/no/files/pdf/seapop-seminar-2013/01-Anker-Nilssen_Introduksjon_SEAPOP_seminar_2013.pdf. Acesso em: 24 de agosto de 2013.

SIEDLER, G.; ZENK, W. **WOCE Südatlantik** 1991, 30.12.1990-23.03.1991. v.15, Institut für Meereskund der Universiät Hamburg, Leitstelle METEOR, 1992.

SKOGDALEN, J.E.; VINNEM, J.E. Quantitative risk analysis offshore – Human and organizational factors. **Reliab. Eng. Sys. Safe.**, n.96, p.468-479, 2011.

SKOGDALEN, J.E.; VINNEM, J.E. Quantitative risk analysis of oil and gas drilling, using Deepwater Horizon as case study. **Reliab. Eng. Sys. Safe.**, 100, p.58-66, 2012a.

SKOGDALEN, J.E.; VINNEM, J.E. Combining precursor incidents investigations and QRA in oil and gas industry. **Reliab. Eng. Sys. Safe.**, n.101, p.48-58, 2012b.

SØRGÅRD, E.; JØDESTOL, K.; HOELL, E.; FREDHEIM, B. **A Stepwise Methodology for Quantitative Environmental Risk Analysis of Offshore Petroleum Activities.** SPE/UKOOA European Environmental Conference, Aberdeen, Scotland, 1997.

THACKER, W., LEE, S., HALLIWELL, G. J. Assimilating 20 years of Atlantic XBT Data into HYCOM: a first look. **Ocean Model.**, v. 7(1-2), pp. 183–210, 2004.

VALENTIN, J.L. **Características hidrobiológicas da região Central da Zona Econômica Exclusiva Brasileira** (Salvador, BA, ao Cabo de São Tomé, RJ). Brasília, Ideal Editora, 2007.

VAROVESKA, L.; CARDOSO, C.; LOPES, L. **Spatial distribution of the risk and accidental scenarios evaluation for decision making in order to reduce the offshore environmental risk.** Rio Oil e Gas Expo and Conference, 2012.

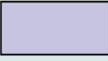
VINNEM, J.E. Evaluation of methodology for QRA in offshore operations. **Reliab. Eng. Sys. Safe.**, n.61, p.39-52, 1998.

ZERBINI, A.N.; ADRIOLO, A.; HEIDE-JØRGENSEN, M.P.; PIZZORNO, J.L.; MAIA, Y.G.; VANBLARICON, G.R.; DEMASTER, D.P.; SIMÕES-LOPES, P.C.; MOREIRA, S.; BETHLEM, C. Satellite-monitored movements of humpback whales *Megaptera novaeangliae* in the Southwest Atlantic Ocean. **Mar. Ecol-Progr. Ser.**, v.313: 295-304, 2006.

ZERBINI, A.N.; ANDRIOLO, A.; HEIDE-JØRGENSEN, M.P.; MOREIRA, S.; PIZZORNO, J.L.; MAIA, Y.G.; VANBLARICOM, G.R.; DEMASTER, D.P. Migration and summer destinations of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in the western South Atlantic Ocean. *J. Cetacean Res. Manag. (Special Issue 3)*, p.113-118, 2011.

ANEXO I

Tabela A.1 – Descrição dos ISL (Índices de Sensibilidade Litoral) originárias do Cartas SAO (GHERARDI e CABRAL, 2010).

COR	ÍNDICE	CÓDIGO			TIPOS DE COSTA
		R	G	B	
	ISL 1	119	38	105	<ul style="list-style-type: none"> – Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos – Falésias em rochas sedimentares, expostas – Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostas
	ISL 2	174	153	191	<ul style="list-style-type: none"> – Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos – Terraços ou substratos de declividade média, expostos (terraço ou plataforma de abrasão, terraço arenítico exumado bem consolidado, etc.)
	ISL 3	0	151	212	<ul style="list-style-type: none"> – Praias dissipativas de areia média a fina, expostas – Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo “long beach”) – Escarpas e taludes íngremes (formações do grupo Barreiras e Tabuleiros Litorâneos), expostos – Campos de dunas expostas
	ISL 4	146	209	241	<ul style="list-style-type: none"> – Praias de areia grossa – Praias intermediárias de areia fina a média, expostas – Praias de areia fina a média, abrigadas
	ISL 5	152	206	201	<ul style="list-style-type: none"> – Praias mistas de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais – Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação – Recifes areníticos em franja
	ISL 6	0	149	32	<ul style="list-style-type: none"> – Praias de cascalho (seixos e calhaus) – Costa de detritos calcários – Depósito de tálus – Enrocamentos (“rip-rap”, guia corrente, quebra-mar) expostos – Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)
	ISL 7	214	186	0	<ul style="list-style-type: none"> – Planície de maré arenosa exposta – Terraço de baixa-mar
	ISL 8	225	232	0	<ul style="list-style-type: none"> – Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada – Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada – Escarpas e taludes íngremes de areia, abrigados – Enrocamentos (“rip-rap” e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados
	ISL 9	248	163	0	<ul style="list-style-type: none"> – Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas – Terraço de baixa-mar lamoso abrigado – Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais
	ISL 10	214	0	24	<ul style="list-style-type: none"> – Deltas e barras de rio vegetadas – Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas – Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado, apicum – Marismas – Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)

ANEXO II

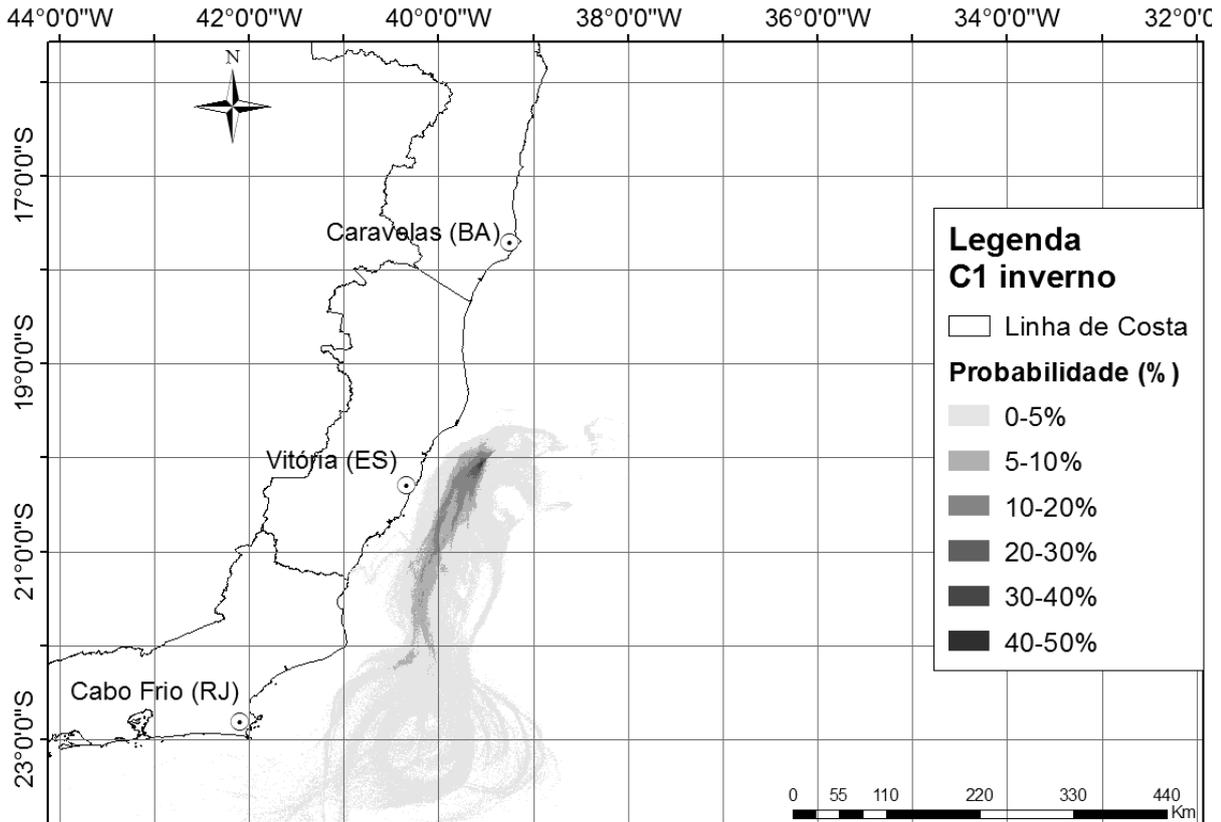


Figura A.I.I.1- Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C1 no inverno.

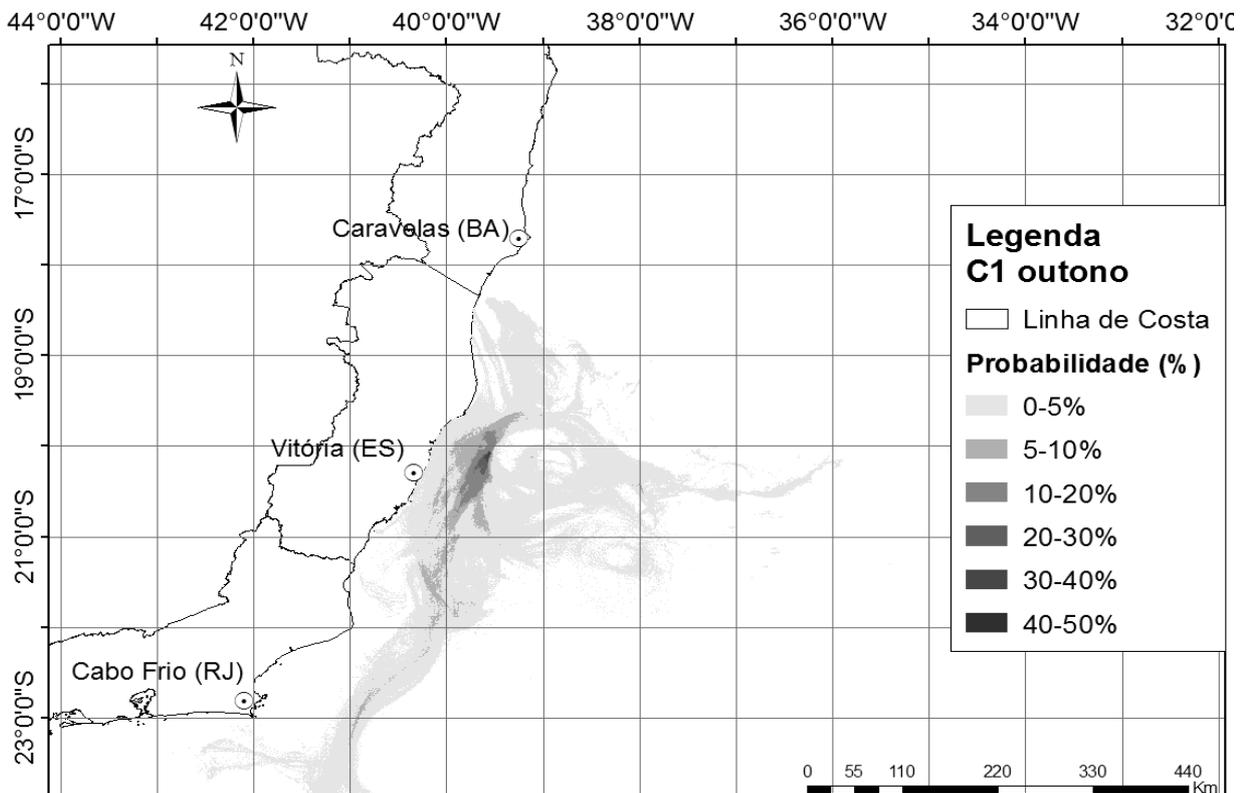


Figura A.I.I.2- Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C1 no outono.

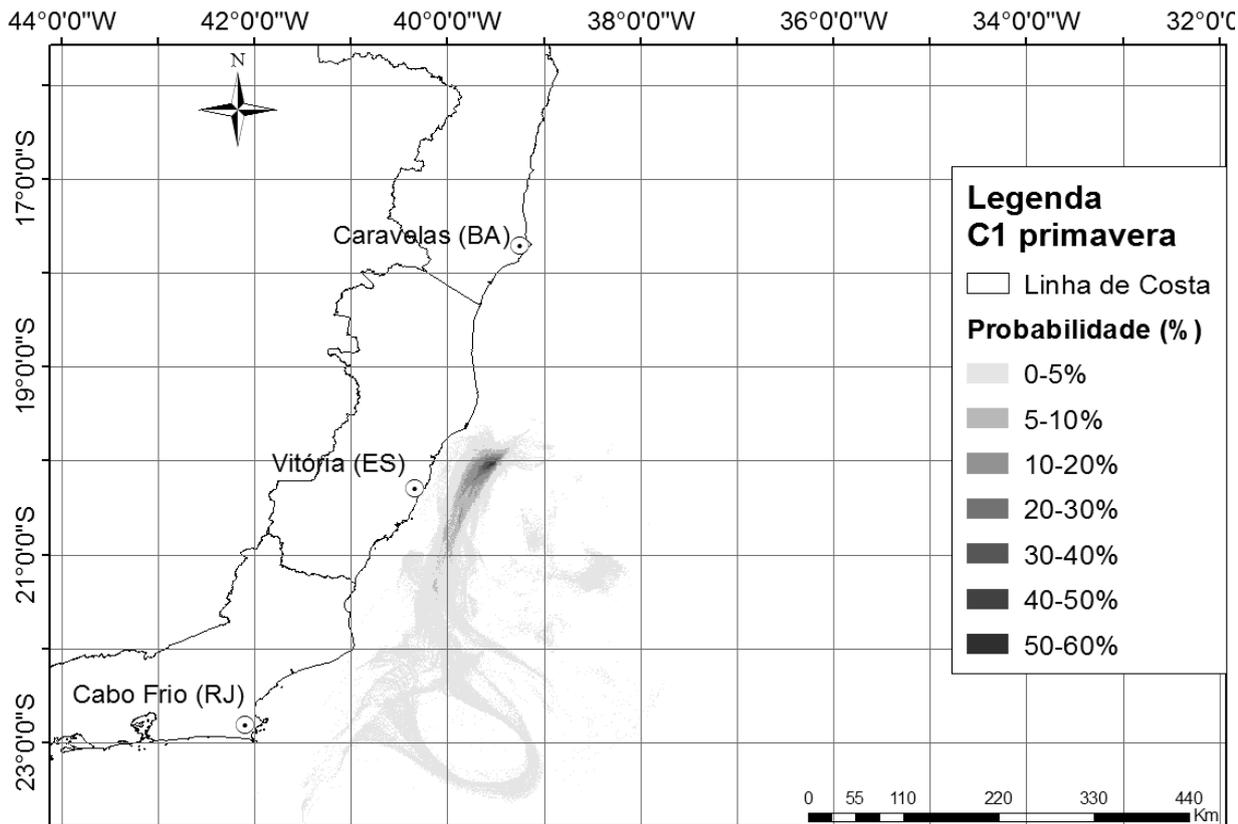


Figura A.I.I.3 - Distribuição sazonal da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C1 na primavera.

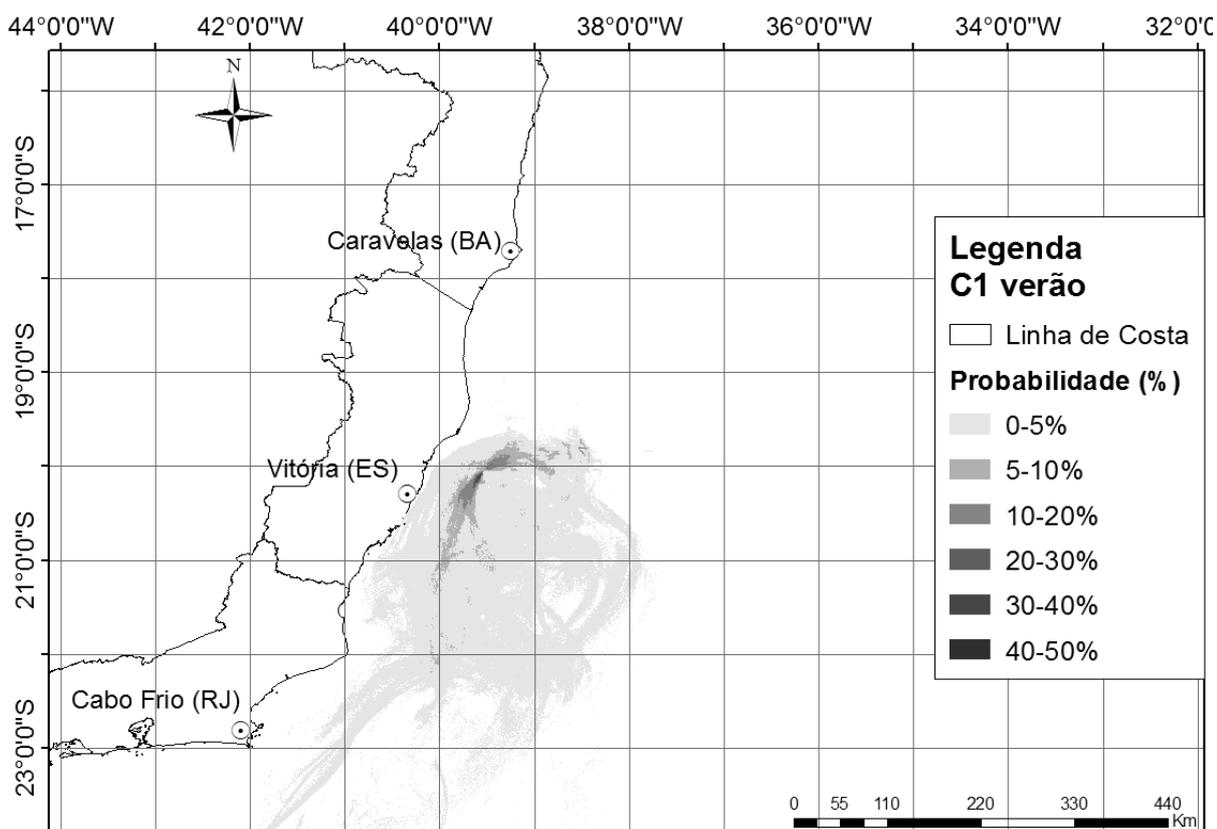


Figura A.I.I.4 - Distribuição sazonal da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C1 no verão.

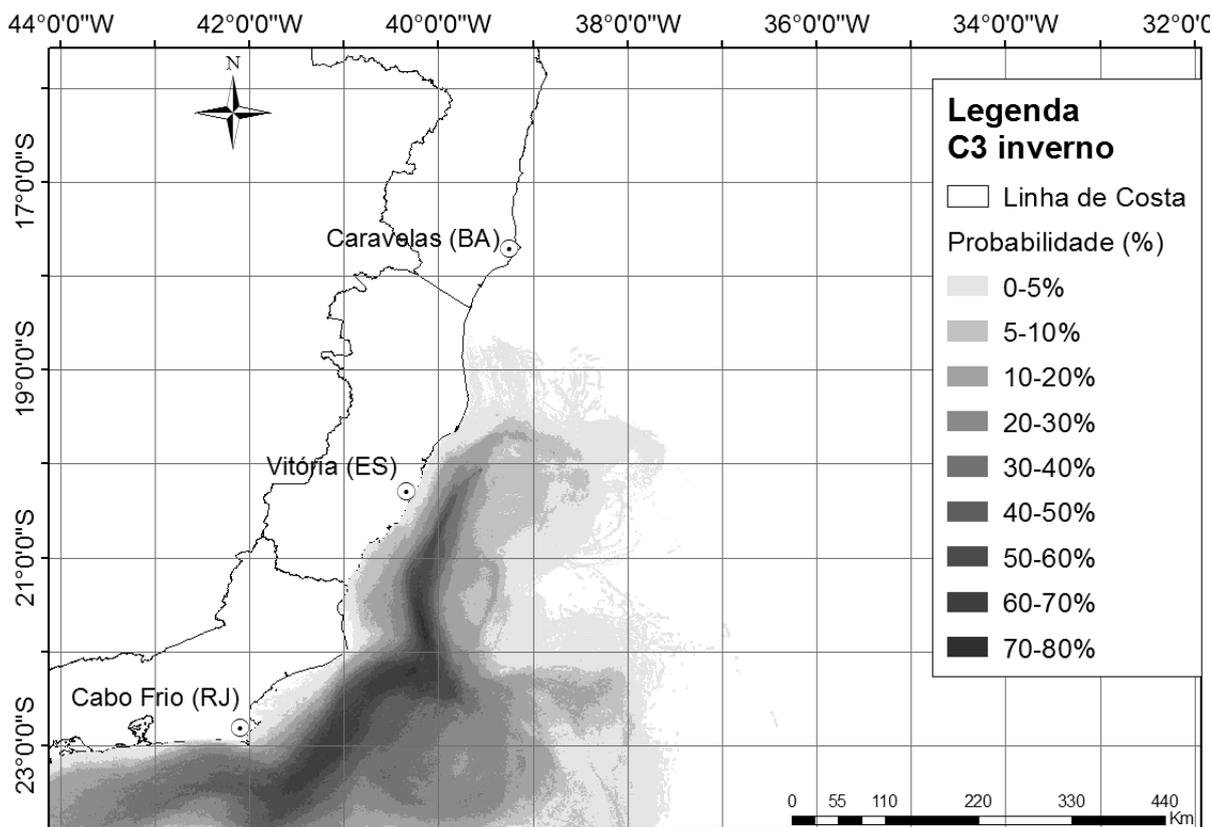


Figura A.I.I.5 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C3 no inverno.

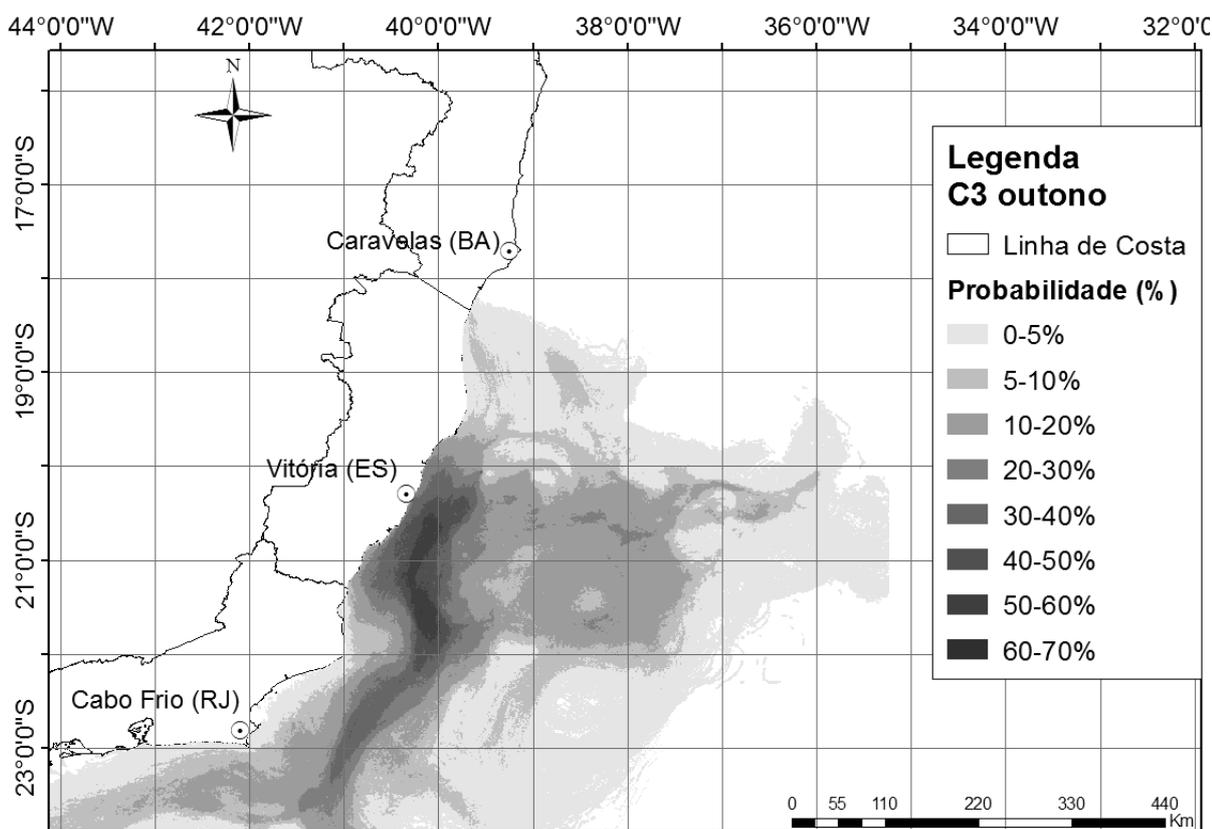


Figura A.I.I.6 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C3 no outono.

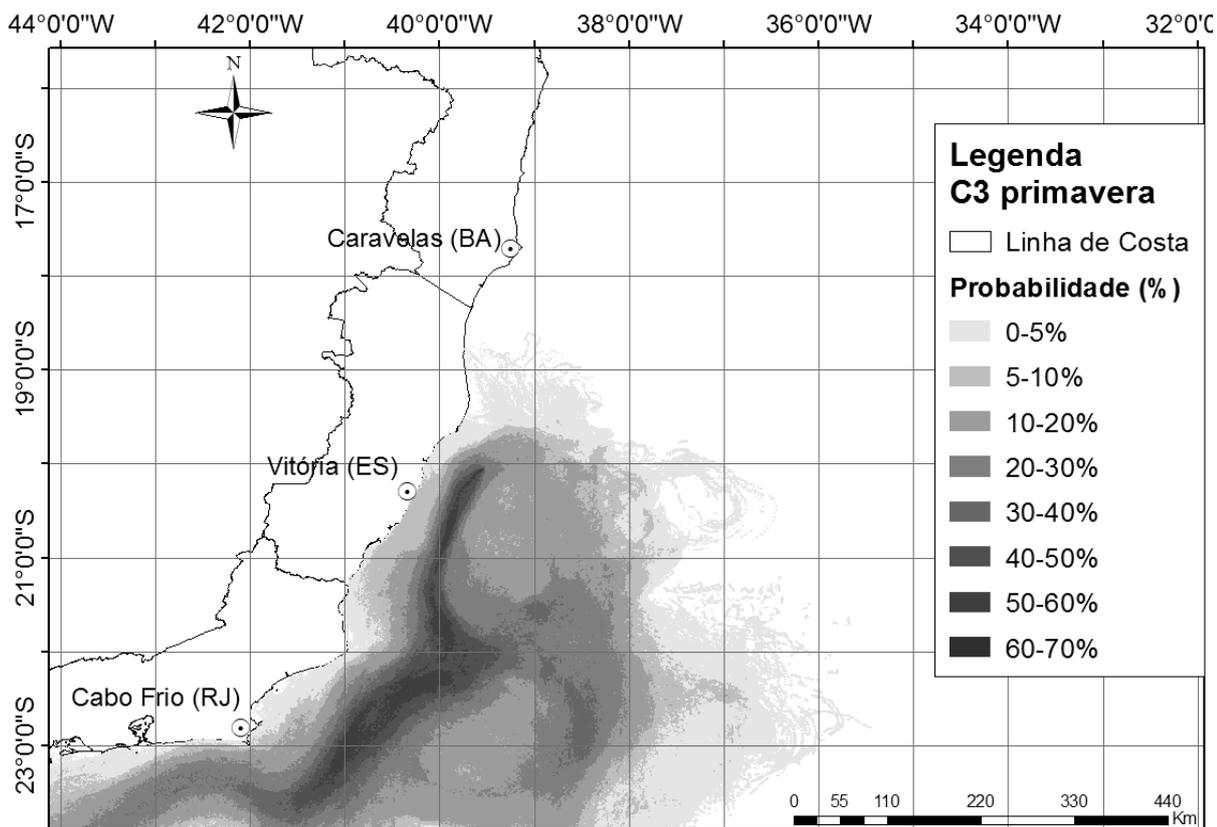


Figura A.I.I.7 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C3 na primavera.

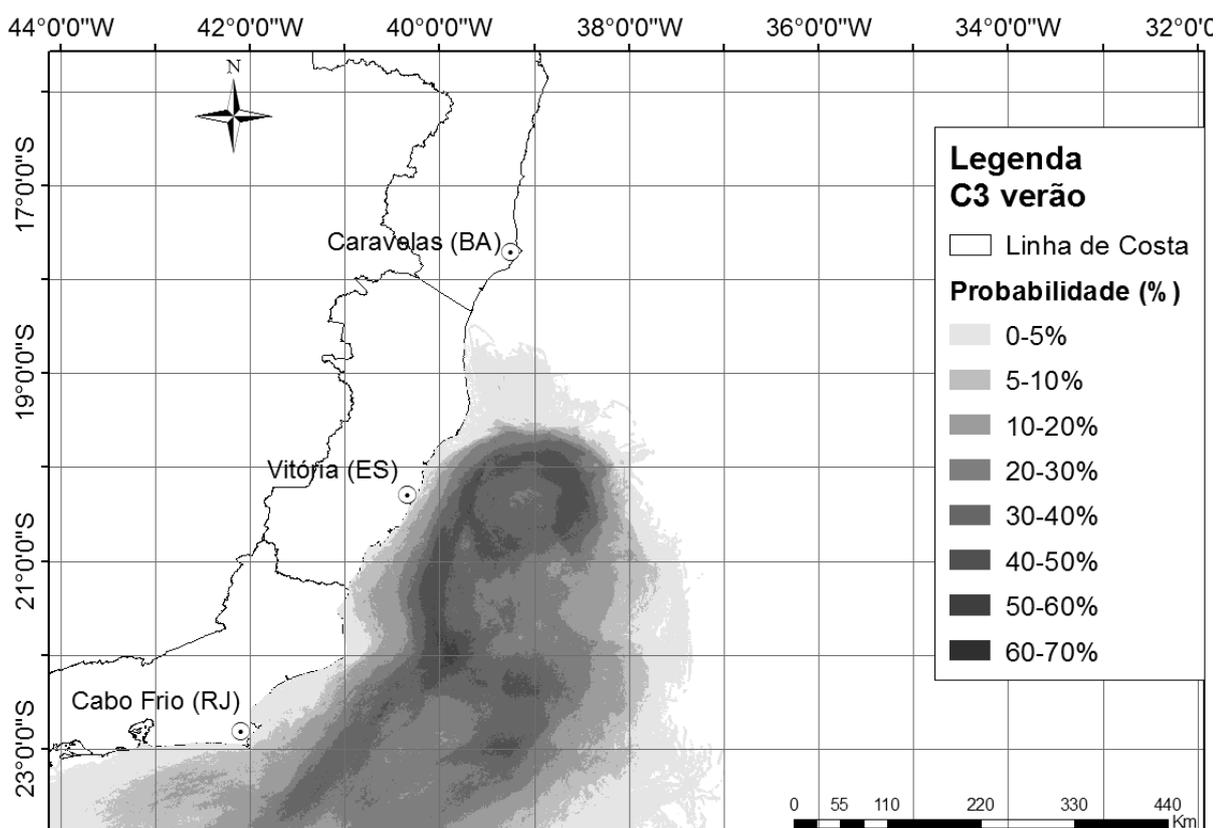


Figura A.I.I.8 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C3 no verão.

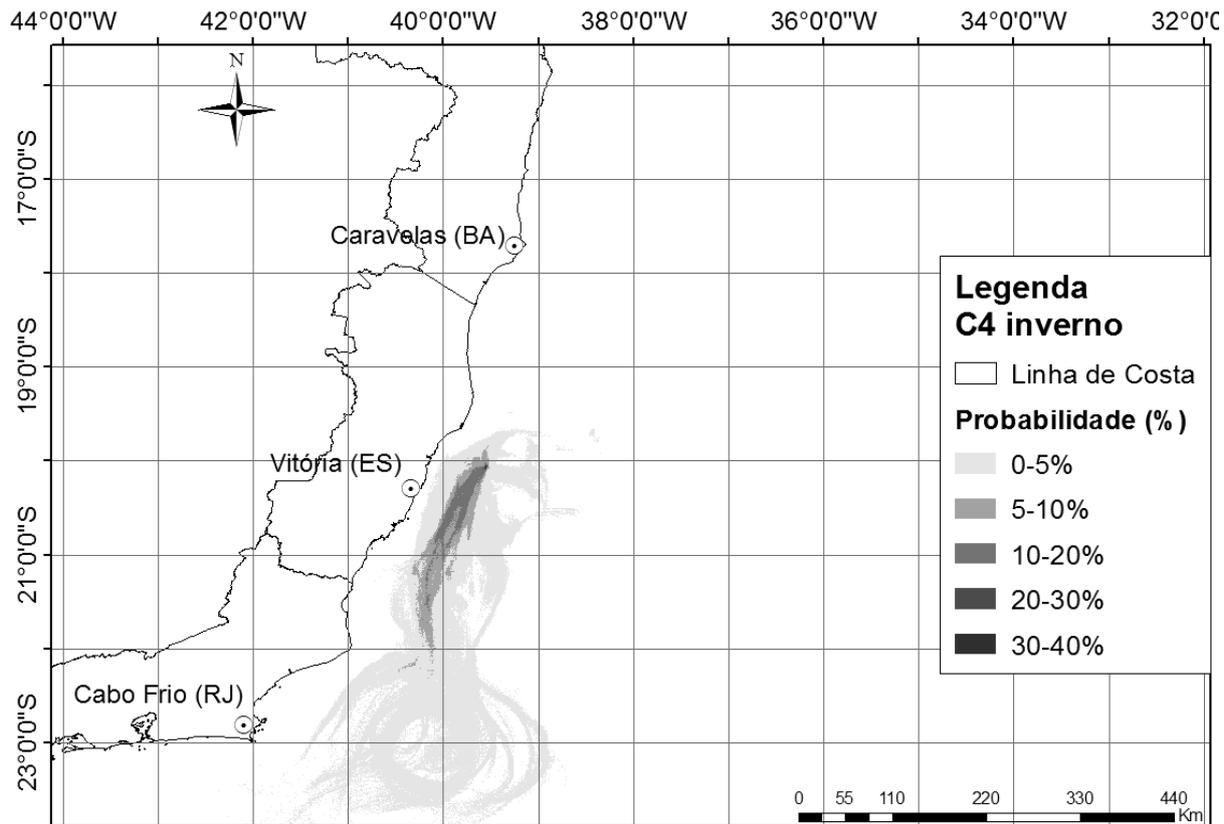


Figura A.I.I.9 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C4 no inverno.

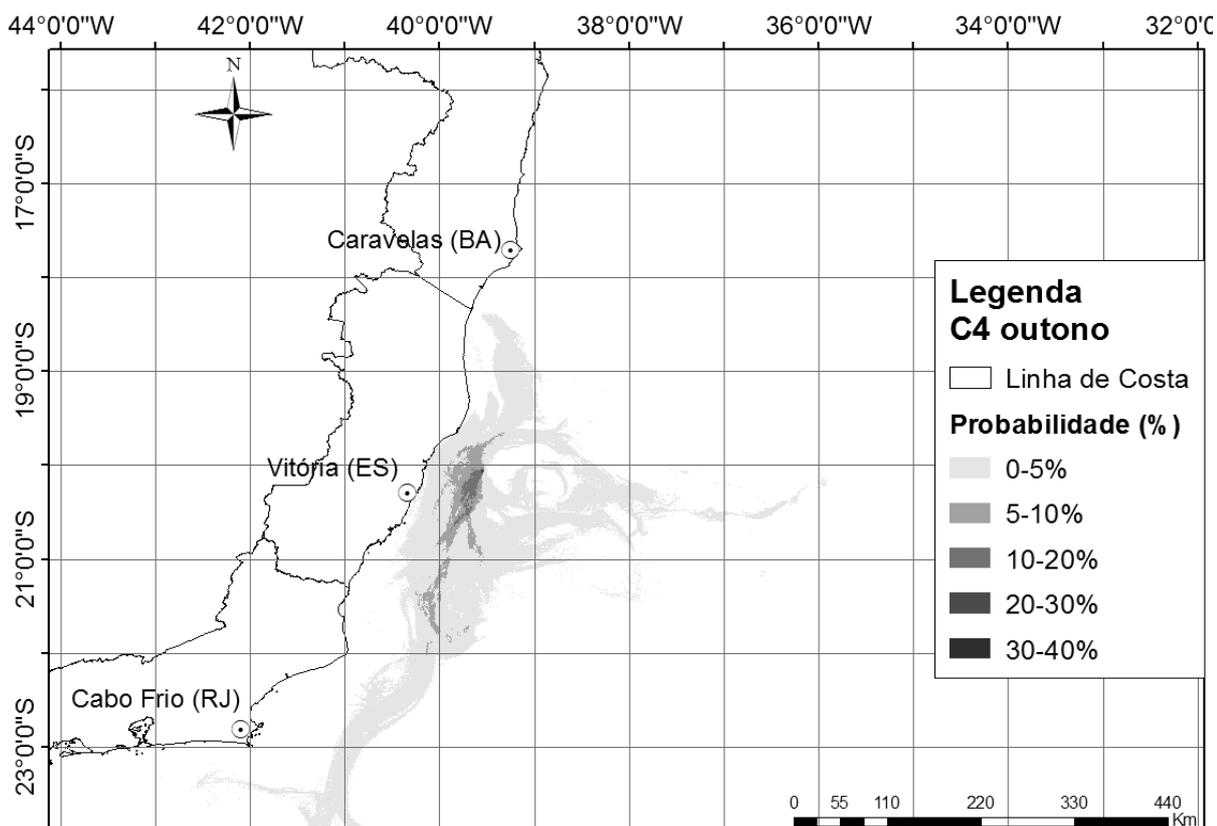


Figura A.I.I.10 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C4 no outono.

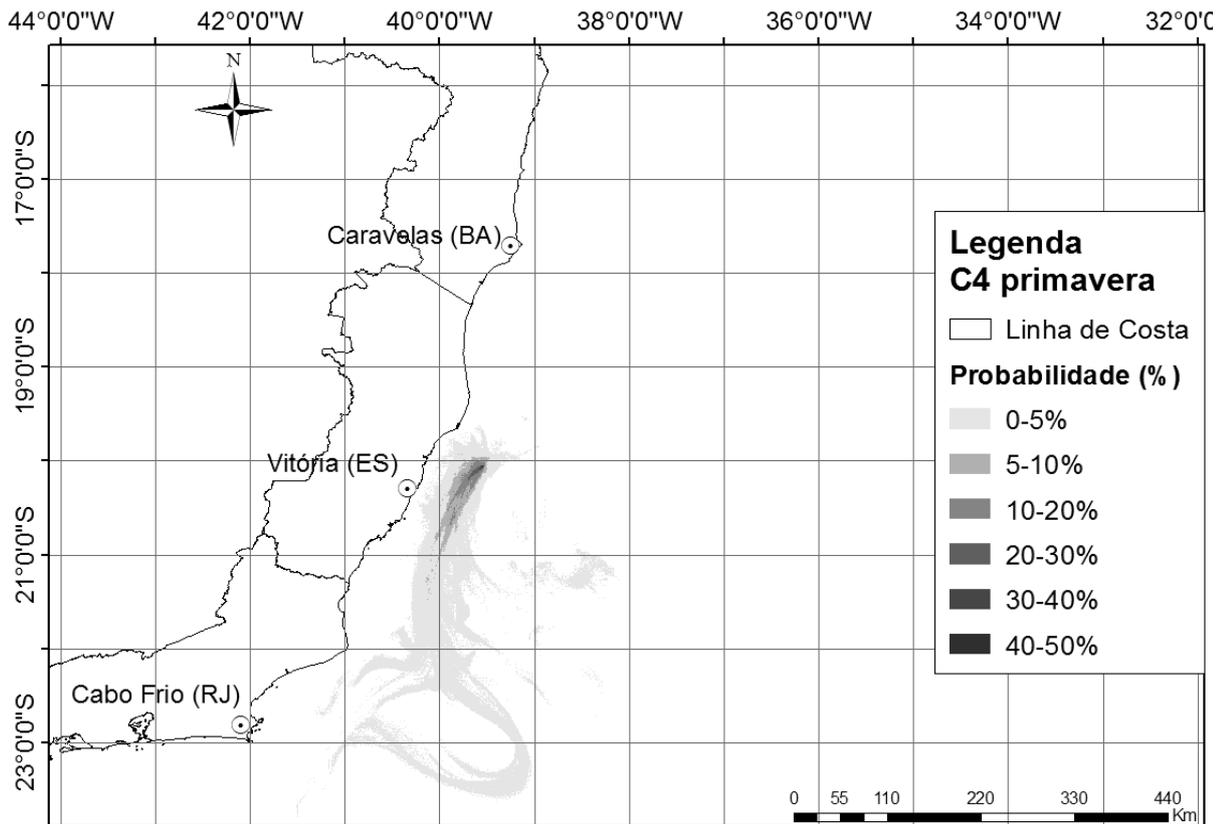


Figura A.I.I.11 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C4 na primavera.

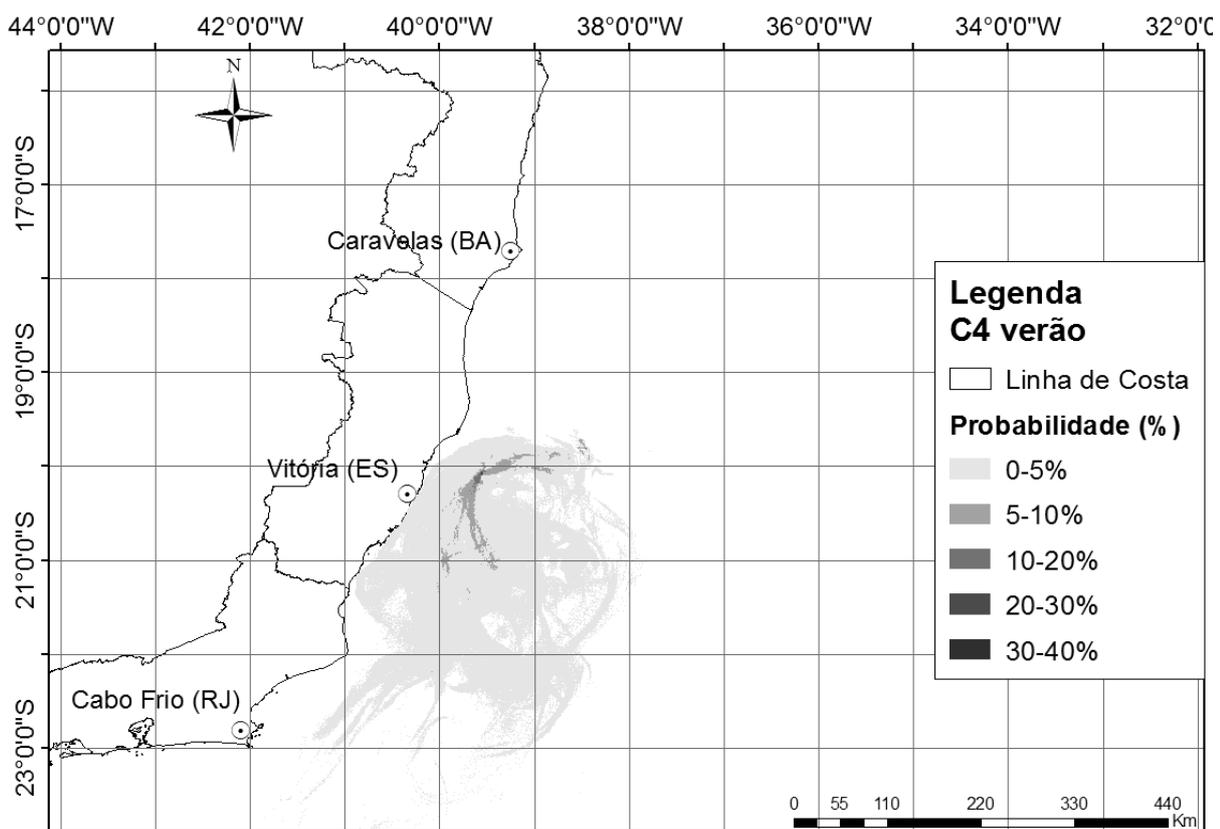


Figura A.I.I.12 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C4 no verão.

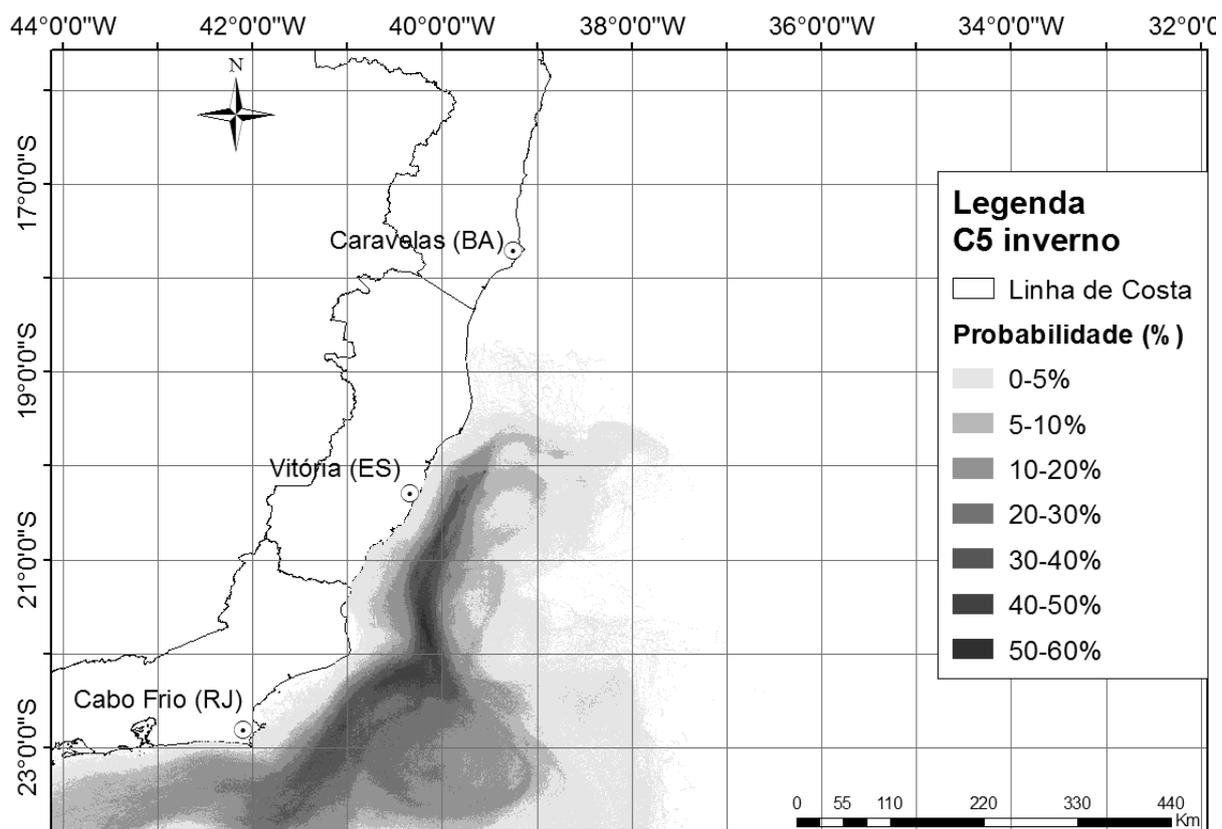


Figura A.I.I.13 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C5 no inverno.

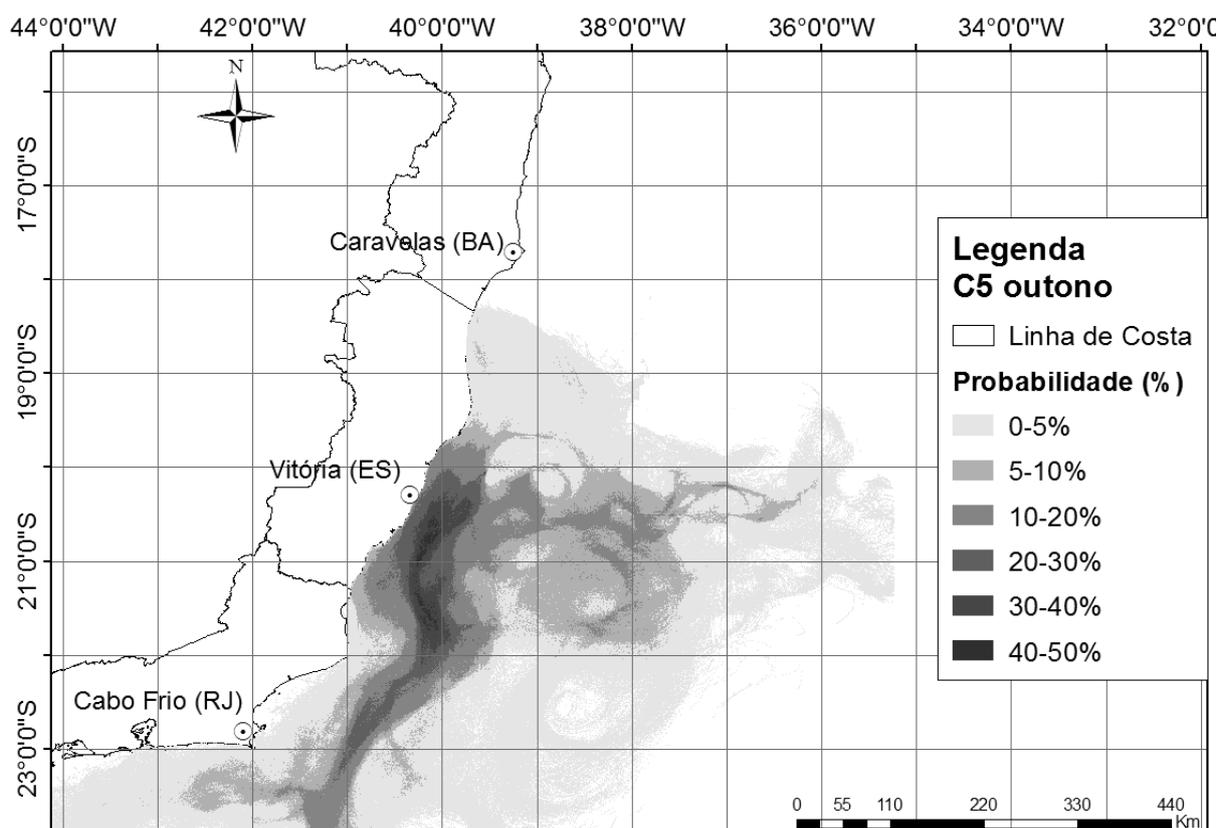


Figura A.I.I.14 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C5 no outono.

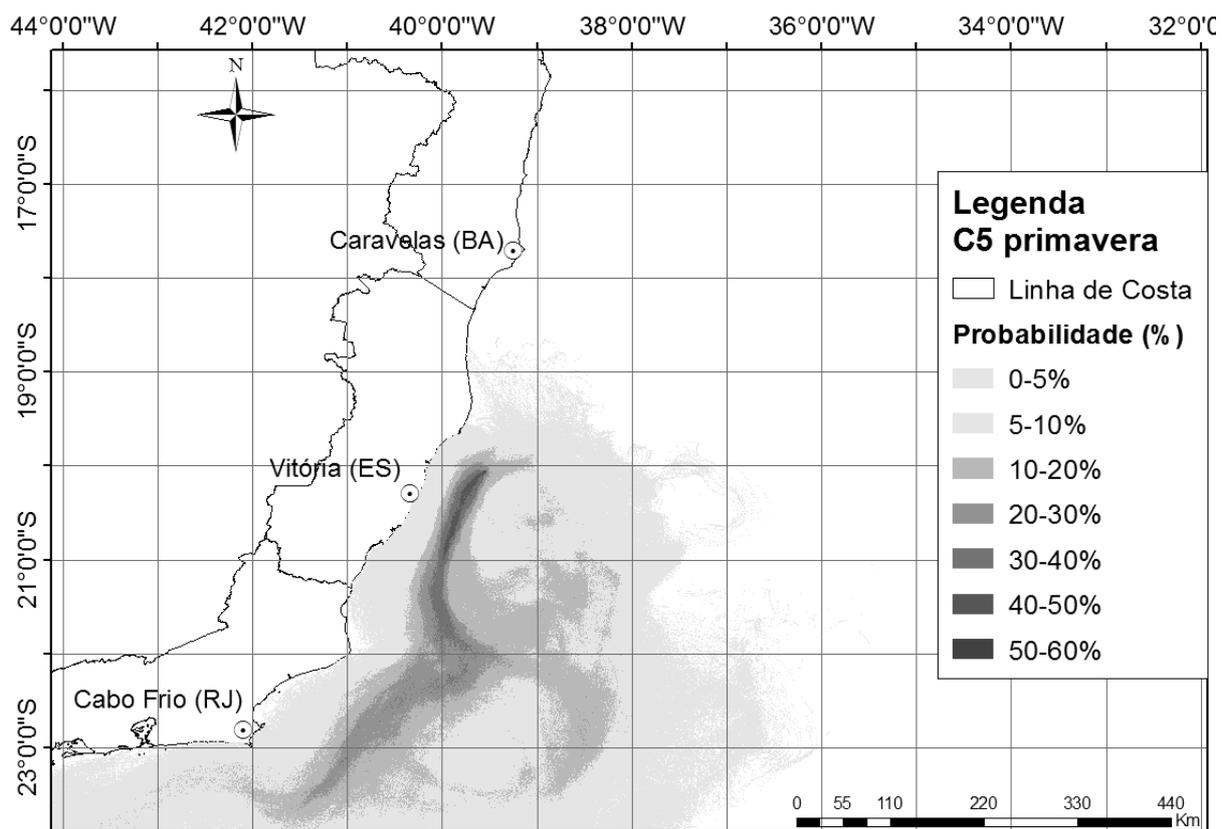


Figura A.I.I.15 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C5 no outono.

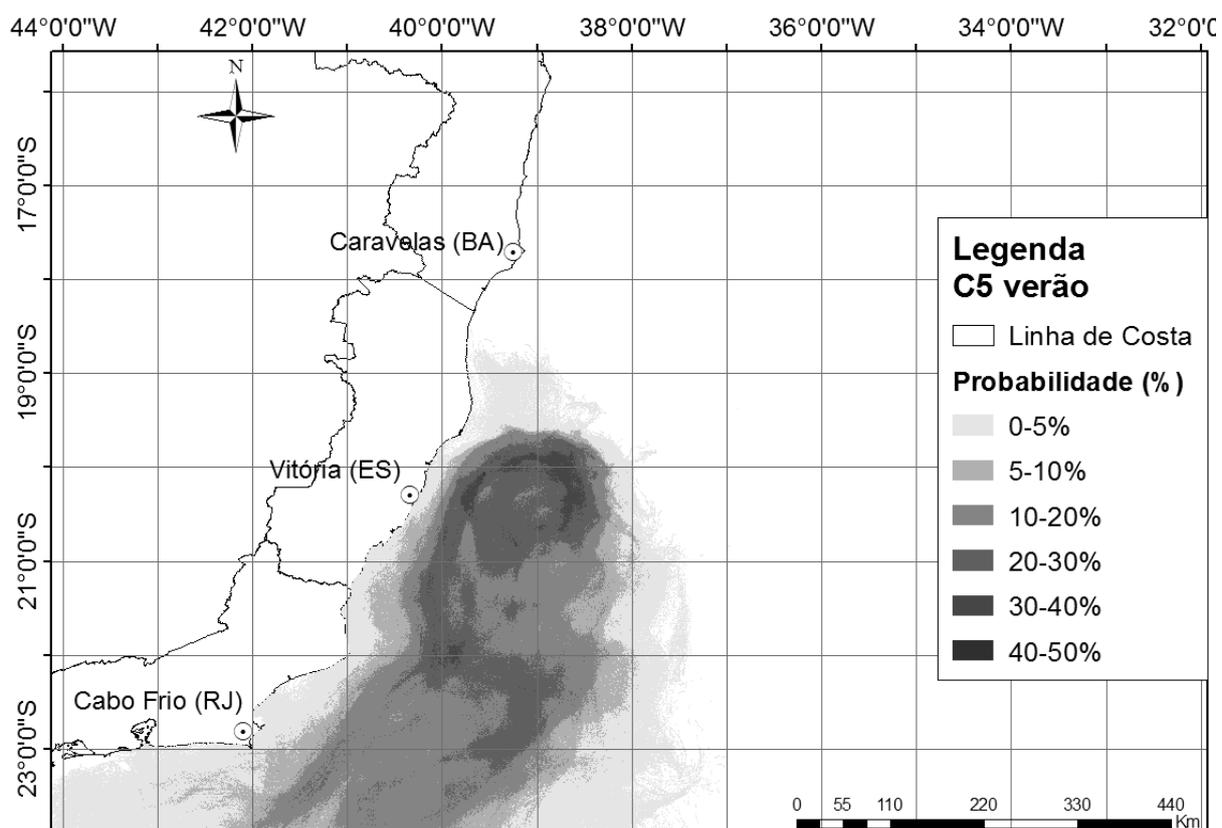


Figura A.I.I.16 - Distribuição da probabilidade de presença de óleo na região de estudo associado ao cenário de vazamento C5 no verão.