



ESCOLA NAVAL

ta sainte  bi-faire



Tiago Ferreira Batista

Modelo de Gestão Hidrográfica para o Porto de Lisboa

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Marinha**



**Alfeite
2023**



ESCOLA NAVAL



Tiago Ferreira Batista

Modelo de Gestão Hidrográfica para o Porto de Lisboa

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na
especialidade de Marinha.**

Orientação de: CTEN M Gerales Dias

Co-orientação de: CMG M Santos Martinho

O Aluno Mestrando

O Orientador

ASPOF M Ferreira Batista

CTEN M Gerales Dias

Alfeite

2023



EPÍGRAFE

“I seem to have been only like a boy playing on the seashore, and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me”

- Isaac Newton



DEDICATÓRIA

Quero dedicar esta dissertação às pessoas que tornaram esta jornada possível. Aos meus pais, Ana e António, e ao meu irmão Alexandre, pelo apoio inabalável e pela motivação fornecida durante estes anos desafiadores. Aos meus tios Cristina e Ricardo, por incutirem em mim o estilo de vida militar e por todo o apoio oferecido no início da minha carreira. À minha avó Teresa, agradeço pela amizade e por estar sempre do meu lado.

Todos vocês contribuíram de maneira significativa para esta conquista.



AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer ao meu orientador, CTEN Geraldês Dias, pelo seu apoio e disponibilidade. A sua orientação, paciência e conhecimento na área foram fundamentais para me guiar ao longo deste trabalho. As suas sugestões perspicazes e feedback construtivo enriqueceram substancialmente este trabalho. Agradeço assim pela sua disponibilidade demonstrada, pelas reuniões realizadas e pelo apoio contínuo que me proporcionou durante toda a pesquisa.

Gostaria também de expressar a minha gratidão ao CFR Videira Marques, chefe da Divisão de Hidrografia do Instituto Hidrográfico, e a toda a Divisão de Hidrografia pelo fornecimento de dados essenciais para esta dissertação. Agradecer também ao Centro Geoespacial Meteorológico e Oceanográfico Marítimo, pelo fornecimento de dados AIS, que se provaram vitais para este trabalho.

Por fim, dedico um agradecimento especial a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para este estudo. Esta dissertação não seria possível sem a colaboração e o apoio de todos vós.



RESUMO

A importância das cartas náuticas para garantir a segurança da navegação encontra-se ligada à confiabilidade dos dados nelas contidos. De forma a manter a segurança nos canais de navegação tipicamente usados, é necessário priorizar zonas de forma a rentabilizar os levantamentos realizados. Para cumprir com este objetivo é necessário identificar zonas críticas e definir as necessidades que cada zona apresenta, relativamente à ordem e frequência de levantamentos hidrográficos.

Neste trabalho foi adaptado o *Hydrographic Health Model*, utilizado pela NOAA, que tem como objetivo maximizar o retorno hidrográfico dos levantamentos, permitindo uma melhor gestão dos meios hidrográficos. O trabalho centrou-se no porto de Lisboa, composto por vários terminais de carga, de cruzeiros e de ferries, apresentando também duas barras de entrada. Inicialmente, foi realizada uma análise a dados obtidos por *Automatic Identification System*, que permitiu a criação de um mapa de densidades e um mapa onde é possível localizar as zonas onde os navios navegam com menor resguardo ao fundo, identificando desta forma zonas críticas para a segurança da navegação. Foram depois efetuadas análises ao modelo batimétrico da área de estudo, a todos os levantamentos realizados pelo Instituto Hidrográfico na área, às zonas de confiança em vigor nas cartas eletrónicas de navegação, e por último à natureza do fundo. Todas estas análises serviram como base para o cálculo do *Hydrographic Gap*, um método capaz de medir as diferenças entre a distribuição espacial ideal das zonas de confiança e a distribuição espacial existente. Este cálculo teve como *inputs* a idade dos levantamentos, bem como o coeficiente de decaimento. Não tendo estes valores, foi necessário estimar um valor que nos permitisse identificar o decaimento da área. Deste modo, foi criado um modelo, utilizando os levantamentos realizados pelo Instituto Hidrográfico na Barra Sul do Rio Tejo, que permitisse a medição das alterações do fundo. Com este cálculo realizado foi criado um mapa, que permite a visualização do *Hydrographic Gap* na área de estudo.

Com todas estas informações foi realizada uma análise crítica dos dados recolhidos, sendo posteriormente realizadas recomendações acerca do tempo útil das zonas de confiança, bem como as zonas que poderiam beneficiar de uma ordem de levantamento superior.

Palavras-chave: Análise Multicritério, Cartas Eletrónicas de Navegação, Levantamento Hidrográfico, Segurança da Navegação.



ABSTRACT

The importance of nautical charts in ensuring navigation safety is closely tied to the data's reliability. To maintain safety in commonly used navigation channels, it is necessary to prioritize areas to optimize the surveys conducted. To achieve this goal, it is essential to identify critical zones and define the specific requirements for each zone concerning the order and frequency of hydrographic surveys.

In this study, the Hydrographic Health Model, as utilized by NOAA, was adapted to maximize the hydrographic return on surveys, thereby enabling better management of hydrographic resources. The focus of this work was on the port of Lisbon, which comprises multiple cargo terminals, cruise terminals, and ferry terminals, as well as two entrance bars. Initially, an analysis was conducted using data obtained from the Automatic Identification System, which facilitated the creation of a density map and a map pinpointing areas where vessels navigate with less clearance to the seabed, thus identifying critical zones for navigation safety. Subsequent analyses were carried out on the bathymetric model of the study area, all surveys conducted by the Hydrographic Institute in the area, the existing confidence zones in electronic navigation charts, and finally, the nature of the seabed. All these analyses served as the foundation for calculating the Hydrographic Gap, a method capable of measuring the differences between the ideal spatial distribution of confidence zones and the existing spatial distribution. This calculation incorporated the age of the surveys as well as the decay coefficient. In the absence of these values, it was necessary to estimate a value to identify the decay in the area. Consequently, a model was created using surveys conducted by the Hydrographic Institute in the South Bar of the Tagus River, allowing for the measurement of seabed changes. With this calculation completed, a map was generated, enabling visualization of the Hydrographic Gap in the study area.

Based on all this information, a critical analysis of the collected data was conducted, followed by recommendations regarding the effective lifespan of confidence zones and the zones that could benefit from a higher survey priority.

Keywords: Electronic Navigational Charts, Hydrographic Survey, Multicriteria Analysis, Navigation Safety.



ÍNDICE GERAL

EPÍGRAFE.....	V
DEDICATÓRIA	VII
AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT.....	XIII
ÍNDICE GERAL	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
ÍNDICE DE EQUAÇÕES.....	XXI
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA	5
1.2. OBJETIVOS	5
1.3. ESTRUTURA.....	6
2. FORMULAÇÃO TEÓRICA	7
2.1. LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS	7
2.1.1. TIPO DE SONDADORES UTILIZADOS EM LEVANTAMENTOS	7
2.1.2. ORDEM DE LEVANTAMENTOS	8
2.2. ZONAS DE CONFIANÇA	10
2.3. HYDROGRAPHIC HEALTH E HYDROGRAPHIC GAP	11
2.4. AIS	15
2.5. DEFINIÇÃO DE TERMOS UTILIZADOS.....	16
3. DADOS E ÁREA DE ESTUDO.....	19
3.1. ÁREA DE ESTUDO	19
3.2. FONTES DE DADOS	21
3.2.1. BASE DE DADOS AIS.....	22
3.2.2. MODELO BATIMÉTRICO.....	26
3.2.3. LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS REALIZADOS	28
3.2.4. LEVANTAMENTOS REALIZADOS NA BARRA SUL.....	28
3.2.5. CATZOCS EM VIGOR	29
3.2.6. NATUREZA DO FUNDO	30
4. MÉTODOS	33
4.1. DENSIDADE DE TRÁFEGO	33
4.2. DETERMINAÇÃO DE RESGUARDO AO FUNDO.....	36
4.3. DETERMINAÇÃO DO DECLIVE DO FUNDO.....	38

4.4.	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DECAIMENTO.....	39
4.5.	JUNÇÃO DE CAMADAS.....	42
4.5.1.	MAPA DE DENSIDADES E CATZOC.....	42
4.5.2.	ANO DE LH E CATZOC.....	43
4.5.3.	RESGUARDO AO FUNDO E CATZOC	45
4.6.	CÁLCULO DO HYDROGRAPHIC GAP	46
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
5.1.	ANÁLISE CRÍTICA	56
5.2.	RECOMENDAÇÕES RELATIVAS AO PLANEAMENTO	57
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
6.1.	ANÁLISE DO TRABALHO REALIZADO E DOS DADOS OBTIDOS.....	59
6.2.	OPORTUNIDADES DE MELHORIA DO MODELO.....	60
6.3.	TRABALHO FUTURO	61
	BIBLIOGRAFIA.....	63
	APÊNDICE A – FUNÇÕES UTILIZADAS NO CAPÍTULO 3	67
	APÊNDICE B - FUNÇÕES UTILIZADAS NO CAPÍTULO 4 E MAPAS RESULTANTES.....	70
	ANEXO A.....	75



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tráfego Marítimo Global, em Tempo Real (retirado de (Marine Traffic, 2023)).....	1
Figura 2 - Metodologia Adotada	4
Figura 3 – Diferença entre sondadores de feixe simples (esquerda) e multifeixe (direita) (retirado de (Chrishan Fonseca, 2017)	8
Figura 4 - Visualização de Termos Náuticos utilizados	17
Figura 5 - Barras de Acesso ao Porto de Lisboa (carta 26303, retirado de www.geomar.hidrografico.com).....	19
Figura 6 - Limites da área de estudo	20
Figura 7 - Zonas de grande importância para a dissertação	21
Figura 8 - Método Utilizado para a Análise da Base de Dados AIS	22
Figura 9 - Base de dados AIS em Ficheiro .csv	23
Figura 10 - Modelo utilizado para o cálculo de navios por mês	24
Figura 11 - Número de navios por mês.....	24
Figura 12 - Outliers identificados	25
Figura 13 – Base de dados AIS pós limpeza	26
Figura 14 - Modelo batimétrico do estuário do Rio Tejo.....	27
Figura 15 - Levantamentos hidrográficos realizados pelos IH	28
Figura 16 - CATZOC em vigor no Rio Tejo	30
Figura 17 - Natureza do fundo	31
Figura 18 - Mapa de Densidade AIS	34
Figura 19 - Mapa de Densidade AIS, sem ferries	35
Figura 20- Locais onde existe menor resguardo ao fundo.....	37
Figura 21 - Declive do fundo	38
Figura 22 - Áreas onde foi determinado o Coeficiente de Decaimento	40
Figura 23 - Tempo de vida útil para uma CATZOC	42
Figura 24 - Sobreposição CATZOC e Mapa de Densidades	43
Figura 25 - Sobreposição dos anos e ordens de LH's e CATZOCs.....	44
Figura 26 - Sobreposição de Resguardo ao Fundo e CATZOC.....	46
Figura 27 - Valores obtidos de ISS.....	47
Figura 28 - Inserção da Equação para o Cálculo do PSS.....	48
Figura 29 - Valores obtidos de PSS.....	49

Figura 30 - Valores obtidos de DSS	50
Figura 31 - Hydrographic Gap	50
Figura 32 - Gráfico com Percentagens referentes ao Hydrographic Gap	54
Figura 33 - Resultado do modelo utilizado para determinar o mês com maior número de navios	67
Figura 34 - Remoção de outliers	67
Figura 35 - Transformação do modelo batimétrico de raster para vetorizado	68
Figura 36 - Modelo batimétrico vetorizado	68
Figura 37 - Atribuição do valor de profundidade aos navios	69
Figura 38 - Função utilizada para a criação do mapa de densidades	70
Figura 39 - Criação do campo "Águas Livres" para determinação do resguardo ao fundo	70
Figura 40 - Seleção das posições onde o resguardo se encontra entre -1 e 1	71
Figura 41 - Navios com resguardo entre 1 e 5 metros	71
Figura 42 - Função utilizada para calcular o declive do fundo	72
Figura 43 - Função "Raster Volume Calculator" (Yang, 2023) utilizada para medir a diferença de batimetria entre dois levantamentos	72
Figura 44 - Sobreposição dos levantamentos realizados entre 2010 e 2020 e CATZOC em vigor	73
Figura 45 - Sobreposição dos levantamentos realizados entre 2000 e 2010 e CATZOC em vigor	74
Figura 46 - Tipo de fundo (retirado de (Santos , Aurora , & Quartau, 2018))	75



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das ordens dos LH (adaptado de (OHI, 2020)).....	9
Tabela 2 – Classificação categórica da confiança da informação das CEN (adaptado de (OHI, Norma S-67, 2020)).....	11
Tabela 3 - Valores de DSS atribuído a cada CATZOC.....	13
Tabela 4 - Valores de DSS atribuído à distância de resguardo ao fundo	13
Tabela 5 - Valores atribuídos a cada tipo de LH inicial	14
Tabela 6 - Valores atribuídos à densidade de tráfego	14
Tabela 7 - Frequência de transmissões AIS (adaptado de (IMO, 2015)).....	16
Tabela 8 - Alteração do fundo ao longo dos anos.....	41
Tabela 9 - Áreas referentes ao Hydrographic Gap.....	54
Tabela 10 - Desvio padrão das camadas relativas à diferença entre dois levantamentos.....	73



ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Hydrographic Health	12
Equação 2 - Hydrographic Gap.....	12
Equação 3 - Hydrographic Risk.....	12
Equação 4 - Present Survey Score	12



LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AIS - Automatic Identification System

CATZOC - Category of Zone Of Confidence

CEN - Carta Eletrónica de Navegação

CN - Carta Náutica

CSV - comma separated values

DSS - Desired Survey Score

GPS - Global Positioning System

HHM - Hydrographic Health Model

IH - Instituto Hidrográfico

IMO - International Maritime Organization

ISS - Inicial Survey Score

MP - Marinha Portuguesa

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

OE - Objetivo específico

OG - Objetivo geral

OHI - Organização Hidrográfica Internacional

PSS - Present Survey Score

ZOC - Zona de Confiança

1. Introdução

A navegação tem sido uma atividade que tem vindo a sofrer inúmeras alterações ao longo da história tendo, desde o tempo das primeiras embarcações, desempenhado um papel crítico para o desenvolvimento da humanidade e da economia global (Ojala, 2017).

Nos dias de hoje, a navegação tornou-se a espinha dorsal do comércio internacional de mercadorias, sendo responsável por mais de 95% do comércio global (Chiltern Maritime, 2022), facilitando o transporte de grandes cargas por longas distâncias, possibilitando assim o acesso a recursos distantes e a interligação de economias por todo o mundo.

É importante destacar que a evolução da navegação também trouxe problemas e desafios, como a segurança da navegação, a ameaça à vida marinha e a gestão dos recursos oceânicos (Sulemane, 2015). As necessidades das populações estão a aumentar, obrigando à criação de mais e maiores navios, existindo milhares de navios a navegar os mares, como ilustrado na figura 1, e assim, canais de navegação com maior dimensão. A manutenção e mapeamento destes canais torna-se assim indispensável, podendo um pequeno erro causar uma quebra na economia mundial, como observado no encalhe do navio Ever Given, no canal do Suez (Meirinho, 2021).

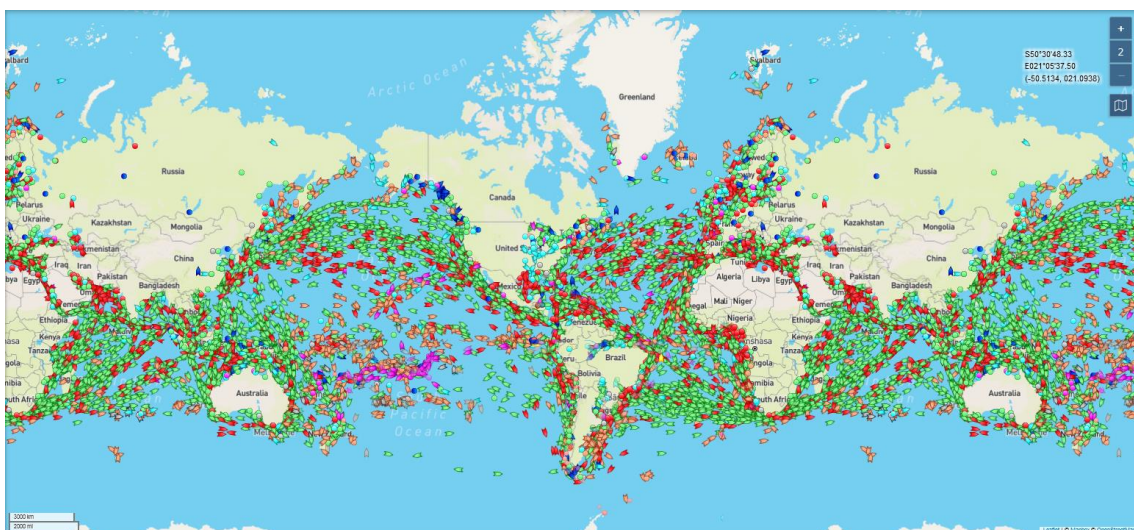


Figura 1 - Tráfego Marítimo Global, em Tempo Real (retirado de (Marine Traffic, 2023))



A Hidrografia é o ramo da ciência que se foca na medição e descrição das características físicas dos oceanos, mares, lagos e rios, além de prever as suas mudanças ao longo do tempo (OHI, Hydrographic Dictionary, 2023). O seu principal objetivo é a segurança da navegação e o apoio a todas as outras atividades marítimas, sendo considerada a sua base (International Hydrographic Bureau, 2005).

Os levantamentos hidrográficos (LH) desempenham um papel fundamental no mapeamento e compreensão do fundo marinho. Estes têm como objetivo a obtenção de informações detalhadas acerca da topografia subaquática, do tipo e configuração do fundo, entre outros elementos relevantes. Estes dados, depois de processados, revistos e validados, são transformados em cartas náuticas (CN), um mapa utilizado por todos os navegantes, que contém informações de batimetria, localização de perigos para a navegação, entre outros (NOAA, 2023).

A realidade retratada nas CN não é estática, sofrendo alterações devido a ocorrências naturais, tal como a sedimentação e as correntes, e ainda, a existência de meios artificiais como a colocação de um cabo submarino ou de uma nova boia. Devido a estas mudanças constantes, as CN necessitam de atualizações frequentes, sendo estas fundamentais para garantir a segurança da navegação (Dias, 2021).

Em Portugal, a responsabilidade de editar e atualizar as CN recai sobre o Instituto Hidrográfico (IH). Este tem ao seu dispor um conjunto de meios navais, equipados com sondadores de feixe simples e multifeixe, capazes de efetuar levantamentos portuários, costeiros e oceânicos (Instituto Hidrográfico, 2019).

Portugal apresenta das maiores zonas económicas exclusivas (ZEE) do mundo, estendendo-se por 1,7 milhões de Km^2 e 2 500 Km de costa (Diário da República, 2021), tornando a atualização das CN uma tarefa interminável. É portanto necessário existir uma priorização de levantamentos, baseada numa análise de risco hidrográfico, capaz de identificar quais os locais onde os levantamentos necessitam ser atualizados com maior frequência.



Atualmente, encontra-se em vigor o projeto SEABED 2030, uma iniciativa da *Nippon Foundation* e da *General Bathymetric Charts of the Oceans*, com o objetivo de mapear todo o fundo dos oceanos até ao ano de 2030. Este projeto foi iniciado no ano de 2017, com 94% do fundo dos oceanos por mapear, sendo que no ano de 2020 já se apresentava com uma percentagem de 81% de fundo por mapear (*General Bathymetric Chart of the Oceans*, 2020). O projeto SEAMAP 2030 do IH, visa contribuir para a iniciativa anterior, completando o mapeamento de elevada resolução do fundo marinho nacional até ao ano de 2030 (*Instituto Hidrográfico*, 2020), sendo que no ano de 2020 a ZEE continental, a ZEE da Madeira e a ZEE dos Açores apresentavam percentagens de cobertura de 78%, 69% e 39%, respetivamente.

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um Modelo de Gestão Hidrográfica para o porto de Lisboa, de forma a priorizar os LH. Este porto encontra-se localizado no estuário do rio Tejo e apresenta uma área com cerca de 32 mil hectares e uma profundidade mínima de 16,5 metros no seu canal principal, sendo capaz de receber navios de grande porte. No ano de 2019, este porto recebeu um total de 2 595 navios. Destes, 1 856 apresentam um deslocamento superior a 5 000 toneladas, tornando essencial a manutenção e o mapeamento do fundo deste porto (*Terminais Portuários e Logística*, 2019).

Para a criação deste modelo foi adaptado o *Hydrographic Health Model* (HHM), utilizado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (NOAA, 2016) para analisar quais as zonas onde os LH são prioritários. Deste modo, foram analisadas várias fontes de dados, com o propósito de localizar as zonas críticas no porto de Lisboa, para a segurança da navegação, e posteriormente foi efetuada uma análise multicritério (Cuofano, 2023), por forma a analisar a necessidade de alteração de ordem e regularidade dos levantamentos que se encontram a ser efetuados.

A metodologia adotada para esta dissertação encontra-se ilustrada na seguinte figura:

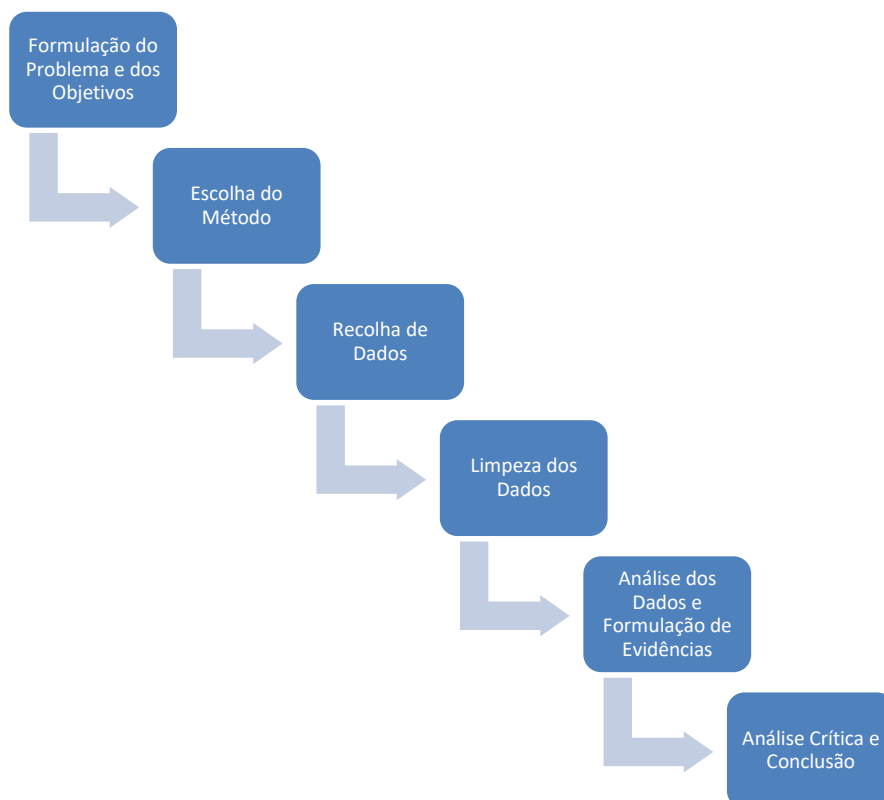


Figura 2 - Metodologia Adotada

Numa fase inicial desta dissertação, foi realizada uma pesquisa para determinar a relevância do tema, nos dias de hoje, e determinar quais os objetivos finais para a mesma. De seguida, foi determinado o método a usar, de forma a completar o objetivo geral. A partir deste momento, foi iniciada a recolha dos dados relevantes para este estudo.

Após a obtenção dos dados a utilizar, foi necessário efetuar a respetiva limpeza e validação. Posteriormente, foram criados vários mapas, que continham informação sobre a identificação de zonas críticas na área de estudo.

De seguida, foi realizada uma medição da alteração do fundo, na Barra Sul do Porto de Lisboa, de forma a realizar o cálculo do *Hydrographic Gap*, que nos permite quantificar a diferença entre as *Categories of Zone Of Confidence* (CATZOC) ideais e as CATZOC atualmente presentes nas cartas eletrónicas de navegação (CEN).



Posto isto, foi executada uma análise a todos os mapas construídos, de forma a compilar toda a informação e assim formular evidências. E por último, foi efetuada uma análise crítica do método criado, propondo recomendações para a otimização dos LH realizados.

1.1. Relevância do Tema

Como foi referido anteriormente, o crescimento das necessidades globais traz grandes perigos à segurança da navegação. Assim, a manutenção dos LH permite não só aos navios a escolha da rota mais segura, como também permite aos meios de resgate a criação de estratégias de resgate mais eficazes, por forma a minimizar o risco.

Em adição, o mapeamento atempado dos fundos nos portos não serve apenas para a maximização da segurança, mas também para identificar zonas propensas à erosão e ao assoreamento. Isto permite uma avaliação do risco num futuro próximo, bem como a identificação de medidas que poderão mitigar as situações de risco identificadas.

Atualmente, existe uma quantidade de dados relacionados com a navegação tão grande que se torna difícil a transformação de todos estes dados em informação relevante. Assim sendo, este trabalho visa a compilação de várias fontes de dados distintas e, posteriormente, a realização de uma análise multicritério, com o objetivo de fornecer ao IH um modelo replicável, capaz de priorizar levantamentos.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo geral (OG) criar um modelo de gestão hidrográfica para o Porto de Lisboa, baseado no HHM da NOAA, para determinar áreas prioritárias e assim permitir uma gestão mais eficiente dos recursos do IH, de forma a conceder uma maior confiabilidade nas zonas críticas.

Com esta meta em mente, foram determinados os seguintes objetivos específicos (OE):



OE1: Identificar áreas críticas para a segurança da navegação no estuário do Tejo, utilizando dados *Automatic Identification System* (AIS) para a determinação dos padrões de navegação.

OE2: Calcular a evolução batimétrica do fundo, de forma a estimar o coeficiente de decaimento.

OE3: Calcular o *Hydrographic Gap*, tendo como referência o HHM da NOAA.

OE4: Analisar os resultados de forma a recomendar uma priorização no planeamento de LH.

1.3. Estrutura

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos diferentes. No primeiro capítulo, intitulado “Introdução”, é feito um breve enquadramento do tema escolhido, referindo a importância do mesmo na atualidade e quais os objetivos para este trabalho. O segundo capítulo consiste numa revisão dos conceitos teóricos mais importantes para este trabalho, como os LH e as zonas de confiança. O terceiro capítulo, denominado de “Dados e Área de Estudo”, divide-se em duas partes, a primeira parte apresenta todos os dados utilizados nesta dissertação, juntamente com o eventual pré-processamento, a segunda parte consiste na descrição da área de estudo, isto é, o Porto de Lisboa. No quarto capítulo encontra-se descrito os métodos utilizados na análise dos dados, tal como, a análise visual da densidade de tráfego no Porto de Lisboa, a determinação do coeficiente de decaimento, o resguardo e declive ao fundo, e ainda, o cálculo do *Hydrographic Gap*. Posteriormente no quinto capítulo, foi efetuada uma análise crítica dos resultados obtidos e efetuadas recomendações relativas ao planeamento. Por fim, a conclusão apresenta uma análise do trabalho realizado e dos dados obtidos, juntamente com as dificuldades sentidas durante a realização do mesmo e a proposta de trabalhos futuros, por forma a aprofundar o tema desta dissertação.



2. Formulação Teórica

Neste capítulo, foi realizada uma revisão abrangente de todos os tópicos abordados nesta dissertação. Inicialmente, foram explorados os procedimentos para realizar os LH, de acordo com as normas definidas pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI). De seguida, foi examinada a metodologia utilizada na avaliação da confiabilidade das CEN e investigado em detalhe o funcionamento do HHM, elucidando a sua operação.

Dada a importância do sistema AIS para esta pesquisa, foi conduzida uma análise sucinta para compreender o seu funcionamento. Por fim, foram recapitulados alguns dos termos utilizados ao longo deste estudo.

2.1. Levantamentos Hidrográficos

A precisão e a qualidade dos LH são essenciais para garantir a segurança da navegação, mas nem todos os locais têm de ser sondados com o mesmo grau de incerteza. Atualmente, o IH utiliza sondadores acústicos de feixe simples ou sondadores acústicos multifeixe para a medição da profundidade, que por sua vez utilizam sistemas de navegação por satélite para posicionamento das medições (Instituto Hidrográfico, 2018).

2.1.1. Tipo de Sondadores Utilizados nos Levantamentos

O sondador de feixe simples é o transdutor mais simples dos sondadores previamente mencionados, medindo apenas a profundidade na vertical da plataforma de sondagem. Deste modo não existe cobertura completa do fundo, apresentando incerteza nas zonas entre fiadas de sondagem.

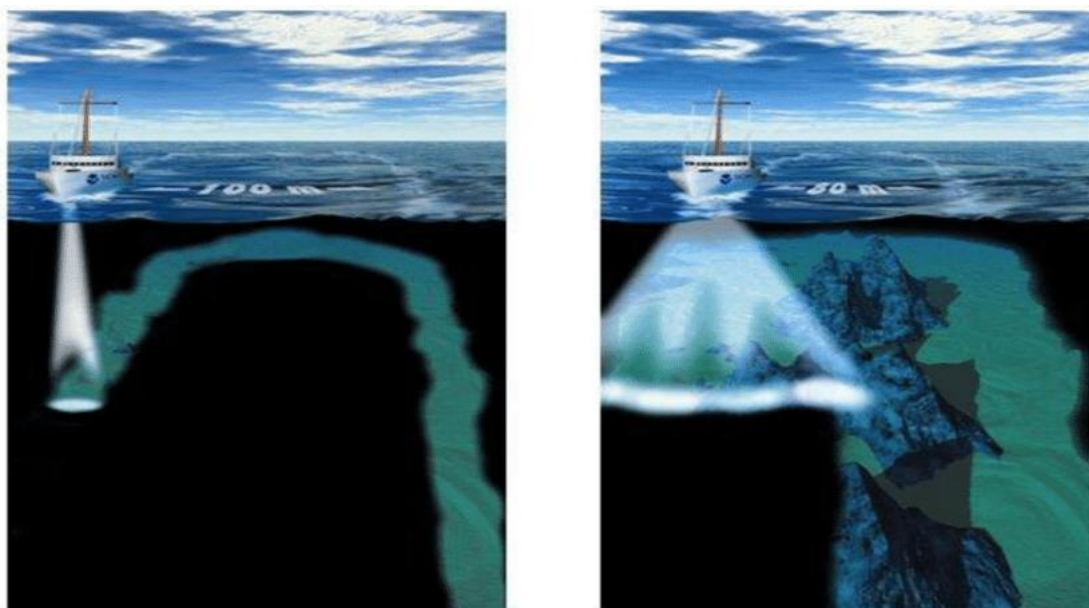


Figura 3 – Diferença entre sondadores de feixe simples (esquerda) e multifeixe (direita) (retirado de (Chrisnan Fonseca, 2017))

Por sua vez, os sistemas multifeixe adquirem os dados de profundidade ao longo de uma faixa transversal à plataforma, permitindo assim a medição de uma grande área e a cobertura completa do fundo. Podemos visualizar a diferença entre estes dois sistemas na figura 3.

2.1.2. Ordem de Levantamentos

De forma a definir as especificações dos levantamentos para segurança da navegação, foram criadas cinco ordens de levantamentos, cada uma projetada para atender a uma variedade de necessidades (OHI, 2020). A escolha destas varia com a profundidade, o tipo de navegação esperado na zona e o resguardo ao fundo dos navios com maior calado.

A Ordem menos restritiva designa-se de Ordem 2. Esta destina-se a áreas onde a profundidade é tão grande que basta apenas ter uma perceção geral do fundo, sendo recomendada em áreas onde a profundidade excede os 200 metros.

A Ordem 1b destina-se a áreas onde o resguardo do navio ao fundo não é considerado um problema, sendo utilizada em áreas onde se considera que a probabilidade de existir uma estrutura que cause perigo à navegação seja baixa.

A Ordem 1a, destina-se a áreas em que se considera que a existência de estruturas subaquáticas possam causar constrangimentos para a navegação, mas onde se considera que o resguardo ao fundo não é considerado crítico.

Passando para áreas em que a distância ao fundo começa a ser crítica, a Ordem Especial é utilizada em áreas como zonas de atracação, portos e canais de navegação. Em zonas com estruturas subaquáticas potencialmente perigosas para navegação é utilizada a Ordem Exclusiva. Esta é uma extensão da Ordem Especial, mas com requisitos mais exigentes em relação à incerteza das medições. Esta ordem requer uma cobertura de 200% do fundo, o que significa que todo o fundo é sondado duas vezes.

Cada uma destas ordens apresenta requisitos mínimos para estar conforme a norma S-44 (OHI, 2022), atualmente em uso pelo IH. Na tabela 1 estão representados todos os requisitos para cada uma das ordens previamente apresentadas.

Tabela 1 - Classificação das ordens dos LH (adaptado de (OHI, 2020))

Critérios	Ordem 2	Ordem 1b	Ordem 1ª	Ordem Especial	Ordem Exclusiva
Incerteza Horizontal	20 m + 10% da profundidade	5 m + 5% da profundidade	5 m + 5% da profundidade	2 m	1 m
Incerteza Vertical $\sqrt{a^2 + (b \times prof.)^2}$	a = 1.0 m b = 0.023	a = 0.5 m b = 0.013	a = 0.5 m b = 0.013	a = 0.25 m b = 0.0075	a = 0.15 m b = 0.0075
Deteção de objetos	Não especificado	Não especificado	Cubo > 2 m (prof. < 40 m) Cubo > 10 %(prof.) (prof. > 40 m)	Cubo > 1 m	Cubo > 0.5 m
Busca por objetos	Recomendado, mas não exigido	Recomendado, mas não exigido	100%	100%	200%
Cobertura Batimétrica	5%	5%	≤ 100%	100%	200%



2.2. Zonas de Confiança

De forma a classificar a precisão e confiança dos LH utilizados nas CEN é utilizado o termo *Category of Zone of Confidence* (CATZOC) (OHI, 2020). Esta classificação abrange todas as áreas das CEN, sem nunca se sobrepor, e baseia-se nos três pontos seguintes:

- Incerteza horizontal;
- Incerteza vertical;
- Cobertura batimétrica.

As CATZOC são geralmente representadas por símbolos específicos e dividem-se em seis níveis, discriminados nos quatros grupos seguintes:

- Alta confiabilidade (ZOC A1 e A2), representados por um triângulo invertido com seis e cinco estrelas, respetivamente;
- Confiabilidade média (ZOC B), representado por um triângulo invertido com quatro estrelas;
- Baixa confiabilidade (ZOC C e D), representados por três e duas estrelas, respetivamente;
- Zona não sondada ou não avaliada (ZOC U), representados pela letra U.

Na tabela 2 estão descritos quais os intervalos de incerteza horizontal e vertical e a cobertura batimétrica, para todas as ZOC.

Tabela 2 – Classificação categórica da confiança da informação das CEN (adaptado de (OHI, 2020))

ZOC	Incerteza Horizontal	Incerteza Vertical	Cobertura batimétrica
A1	$\pm 5 \text{ m} + 5\%$ da profundidade	$0.5 \text{ m} + 1\%$ da profundidade	Busca total do fundo, com deteção de características significativas do fundo.
A2	$\pm 20 \text{ m}$	$1 \text{ m} + 2\%$ da profundidade	
B	$\pm 50 \text{ m}$	$1 \text{ m} + 2\%$ da profundidade	Busca parcial do fundo, não sendo esperados objetos relevantes para a segurança da navegação.
C	$\pm 500 \text{ m}$	$2 \text{ m} + 5\%$ da profundidade	Busca parcial do fundo, sendo esperados objetos relevantes para a segurança da navegação.
D	Pior do que a ZOC C		Busca parcial do fundo, sendo esperados grandes objetos relevantes para a segurança da navegação
U	Zona não sondada/avaliada		

Podemos assim concluir que a principal diferença entre uma CATZOC e uma ordem de um LH reside na sua natureza: a CATZOC é uma classificação que indica a confiança da informação presente numa CEN, podendo decair com o tempo, enquanto uma ordem de um LH é uma especificação técnica que estabelece orientações para a realização e classificação de LH em áreas e condições particulares. Quando os LH são realizados existe uma equivalência entre ordem e CATZOC, porém com a passagem do tempo a ordem do levantamento mantém-se, sendo que a CATZOC deve decair.

2.3. Hydrographic Health e Hydrographic Gap

Visto não existir uma metodologia padrão para priorizar a execução de LH, ou definir frequências mínimas de execução de LH em áreas específicas, a NOAA criou um modelo denominado de HHM (NOAA, 2016) (Bongiovanni, 2021). Este baseia-se na realização de uma análise de risco que visa avaliar a validade da informação batimétrica presente nas CEN, tornando assim possível a calendarização de futuras necessidades hidrográficas.

O HHM tem como *inputs* dados AIS, as CATZOC e a idade dos levantamentos, a identificação de zonas críticas e por último a identificação de acontecimentos naturais que podem comprometer as áreas sondadas, como correntes e furacões.

As equações utilizadas para fazer este cálculo são as seguintes:

Equação 1 - Hydrographic Health

$$HYDROGRAPHIC\ HEALTH = HYDROGRAPHIC\ GAP^2 \times HYDROGRAPHIC\ RISK$$

Equação 2 - Hydrographic Gap

$$HYDROGRAPHIC\ GAP = DESIRED\ SURVEY\ SCORE - PRESENT\ SURVEY\ SCORE$$

Equação 3 - Hydrographic Risk

$$HYDROGRAPHIC\ RISK = \Sigma (CONSEQUENCE \times PROBABILITY)$$

Equação 4 - Present Survey Score

$$PSS = ISS \times e^{-(\text{coeficiente de decaimento}) \times (\text{idade do levantamento})}$$

Como podemos ver na primeira equação, o *Hydrographic Health* é resultado da multiplicação entre o *Hydrographic Gap* e o *Hydrographic Risk*, sendo o *Hydrographic Gap* caracterizado pela diferença entre o nível de confiança pretendida e o nível de confiança atual e o *Hydrographic Risk* (como apresentado na equação 3), um valor modelado para representar o risco que a zona representa para a segurança da navegação.

O valor do *Present Survey Score* (PSS) e do *Desired Survey Score* (DSS) é um número de 0 a 100, diretamente relacionado com as CATZOC utilizadas pela OHI, como podemos ver na tabela seguinte.

Tabela 3 - Valores de DSS atribuído a cada CATZOC

DESIRED SURVEY SCORE (DSS)	
Valores entre 0 e 100	
DSS=100	CATZOC A1 e A2
DSS=80	CATZOC B
DSS=30	CATZOC C
DSS=10	CATZOC D

Sendo a segurança da navegação uma prioridade, o DSS foi modelado de forma a dar aos navios uma maior segurança a navegar em áreas onde o resguardo ao fundo é menor. Dessa forma, é atribuído um DSS maior em zonas onde o resguardo é menor e um DSS menor em zonas onde o resguardo não constitui risco para a navegação. Para além do resguardo existe também outra variável que altera o DSS, sendo esta a complexidade do fundo. Devido à área de estudo desta dissertação se localizar na foz e estuário de um rio, serão apenas apresentados os intervalos do DSS utilizados para quando o fundo marítimo é complexo. A NOAA considera um fundo como complexo quando a média do desvio padrão de uma área de 5 milhas náuticas¹ é superior a 0,15. Podemos ver quais os intervalos utilizados pela NOAA para determinar o DSS quando os fundos são complexos na tabela 4. De referir que o resguardo poderá ser negativo quando o navio só navega com determinada altura de maré.

Tabela 4 - Valores de DSS atribuído à distância de resguardo ao fundo

DESIRED SURVEY SCORE DEFINIDO PELO RESGUARDO AO FUNDO	
DSS=100	RESGUARDO ENTRE -1 E 1 METROS
DSS=80	RESGUARDO ENTRE 1 E 40 METROS
DSS=30	RESGUARDO ENTRE 40 E 100 METROS
DSS=10	RESGUARDO SUPERIOR A 100 METROS

O cálculo do PSS, apresentado na equação 4, é um pouco mais complexo, sendo este a combinação do tipo de levantamento feito inicialmente (ISS (Inicial Survey Score)), o coeficiente de decaimento do fundo e a idade do levantamento. Os valores

¹ Uma milha náutica equivale a 1852 metros.

do ISS apresentam uma equivalência com ordem dos levantamentos, e os valores atribuídos a estes pode ser observado na tabela 5.

Tabela 5 - Valores atribuídos a cada tipo de LH inicial

TIPO DE LEVANTAMENTO (ISS) Valores entre 0 e 110	
ISS=110	COBERTURA COMPLETA DO FUNDO E DETEÇÃO DE OBJETOS
ISS=100	COBERTURA COMPLETA DO FUNDO
ISS=80	COBERTURA PARCIAL DO FUNDO
ISS=30	COBERTURA INSUFICIENTE DO FUNDO
ISS=0	LEVANTAMENTO NÃO REALIZADO

O cálculo do Coeficiente de Decaimento utilizado pela NOAA não é aplicável para o seguinte estudo, pois estima este coeficiente com base em valores de tempestades, detritos humanos e correntes. Nos capítulos seguintes, encontra-se demonstrado qual o método utilizado de forma a estimar o coeficiente de decaimento, no Porto de Lisboa.

Por sua vez, o cálculo do *Hydrographic Risk* é uma medida de perigo que se baseia na multiplicação entre a consequência que uma ação representa e a probabilidade de esta acontecer. As consequências utilizadas pela NOAA para calcular o HHM não são adaptáveis ao porto de Lisboa, pelo que não irão ser descritos nesta dissertação. Consequentemente, não irá ser calculado o *Hydrographic Risk*, pois seria necessária a identificação, a classificação e a quantificação de todos os perigos presentes na área de estudo.

O cálculo da probabilidade, por outro lado, passa pelo estudo da densidade de antigos acidentes, que ocorreram na zona, e pela densidade de tráfego. Os valores dados à variável da densidade de tráfego são os descritos na tabela 6:

Tabela 6 - Valores atribuídos à densidade de tráfego

PROBABILIDADE DENSIDADE DE TRÁFEGO	
1	Nenhum dado AIS
2	1 Navio
3	2 a 10 navios



4	11 a 100 navios
5	+100 navios

A presente dissertação pretende assim adaptar este modelo às necessidades do Porto de Lisboa, de forma a calcular o *Hydrographic Gap* e assim permitir um melhor planeamento e gestão de futuros levantamentos hidrográficos.

2.4. AIS

O AIS é um sistema utilizado por navios e estações costeiras, principalmente utilizado para identificação e troca de informação entre navios (P. A. Lessing, 2006). Sendo que, este sistema permite a identificação de navios, para além do horizonte e para além do alcance dos radares. Em adição, o AIS permite a troca de três tipos de informações diferentes:

- Estática, que inclui o nome do navio, o tipo do navio, as características do navio, entre outros;
- Dinâmica, como a localização, o ângulo de guinada e a velocidade;
- Informação relacionada com a viagem, como o porto de destino e o tempo estimado de chegada.

Como todos os sistemas, o AIS apresenta problemas (Sousa, 2018). O primeiro problema deve-se a erros humanos, aquando da inserção de dados nestes sistemas, que pode levar à disseminação de informações erradas e assim confundir outros utilizadores e posteriores análises. O segundo problema identificado foi a enorme quantidade de dados que são necessários analisar e validar, de forma a retirar informação proveitosa.

De acordo com a Resolução A.1106(29) da *International Maritime Organization* (IMO, 2015), a frequência de envio de dados AIS varia de 2 segundos a 3 minutos, dependendo do estado do navio e da sua velocidade. Por este motivo, a base de dados analisada, na sua totalidade, apresenta aproximadamente 43 milhões de entradas de

transmissões de navios, divididos por nove meses, desde janeiro até setembro de 2022.

Tabela 7 - Frequência de transmissões AIS (adaptado de (IMO, 2015))

Tipo de Navio	Frequência de Envio
Navio atracado ou fundeado, com velocidade inferior a 3 nós	3 minutos
Navio atracado ou fundeado, com velocidade superior a 3 nós	10 segundos
Navio com velocidade até 14 nós	10 segundos
Navio com velocidade até 14 nós e a guinar	3 segundos
Navio com velocidade entre 14 e 23 nós	6 segundos
Navio com velocidade entre 14 e 23 nós e a guinar	2 segundos
Navio com velocidade superior a 23 nós	2 segundos
Navio com velocidade superior a 23 nós e a guinar	2 segundos

2.5. Definição de Termos Utilizados

Durante esta dissertação irão ser utilizados termos como águas livres, resguardo ao fundo ou calado. Serve assim este subcapítulo para efetuar uma breve explicação destes termos.

Como podemos visualizar na figura 4, o calado de um navio é a distância apresentada desde a linha de água até ao ponto mais fundo do navio, tipicamente a quilha. Os termos águas livres e resguardo ao fundo são termos idênticos. Ambos se identificam como a distância desde o ponto mais profundo do navio até ao fundo.

O estudo feito nesta dissertação não tem em conta a altura de maré, sendo que as medições de resguardo serão feitas considerando como plano de referência o zero hidrográfico, o plano ao qual estão referidas as sondas e as linhas isobatimétricas representadas nas CN (IH, 2023).

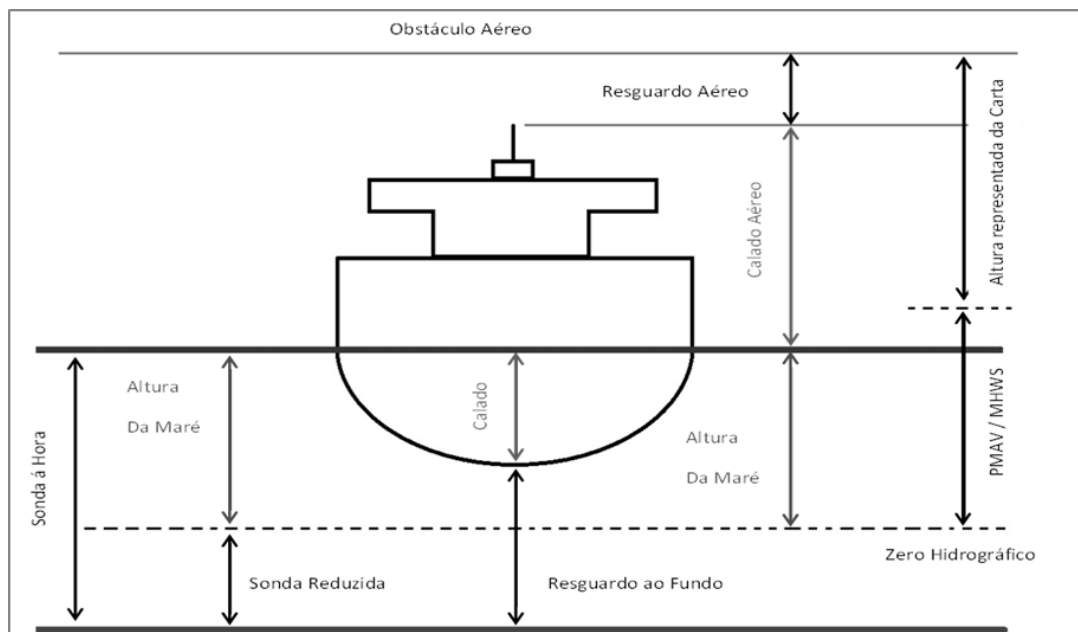


Figura 4 - Visualização de Termos Náuticos utilizados



A área de estudo desta dissertação estende-se desde o início da Barra Norte e da Barra Sul e estende-se até à Ponte Vasco da Gama, incluindo assim os terminais e as docas do Porto de Lisboa, a Base Naval de Lisboa e os terminais de ferry, que ligam a margem norte e a margem sul do rio, até montante da ponte Vasco da Gama, conforme ilustrado na figura 6.



Figura 6 - Limites da área de estudo

Este porto é composto por vários terminais de cargas, estando alguns destes capacitados para receber cargas perigosas como combustíveis ou gases inflamáveis, por terminais de cruzeiros e por docas de navios de recreio. Em adição a estes, no estuário do Tejo está também a Base Naval de Lisboa, sendo que nesta estão localizados a maioria dos navios da Marinha Portuguesa (MP). A figura 7 identifica, para referência futura, áreas específicas do porto de Lisboa que irão ser referidas ao longo desta dissertação.



Figura 7 - Zonas de grande importância para a dissertação

3.2. Fontes de Dados

As fontes de dados utilizadas nesta dissertação foram as seguintes:

- Ficheiro csv, contendo dados AIS, fornecidos pelo Centro Meteorológico e Oceanográfico Naval, desde janeiro de 2022 até setembro de 2022;
- Shapefile com o Modelo Batimétrico do Estuário do Rio Tejo, retirado do portal Hidrografico+, do IH, com resolução de 25 m;
- Shapefile com todos os LH realizados na área de estudo até ao ano de 2022, fornecida pela Divisão de Hidrografia do IH;
- Shapefile com as CATZOCS das CEN em vigor, fornecida pela Divisão de Hidrografia do IH;

- Shapefile que contem a natureza do fundo, extraído das CEN, fornecida pela Divisão de Hidrografia do IH;
- Shapefile dos LH da Barra Sul e do Cachopo Norte, desde 2018 até 2022, também fornecido pela Divisão de Hidrografia do IH.

3.2.1. Base de Dados AIS

Como foi referido anteriormente, um dos grandes problemas em analisar dados AIS traduz-se na quantidade de dados a analisar. A seguinte figura descreve quais os passos tomados nesta análise.



Figura 8 - Método Utilizado para a Análise da Base de Dados AIS

Esta base de dados foi fornecida num conjunto de nove pastas, uma para cada mês, sendo que cada uma destas continha cinco a seis ficheiros .csv², cada um com cerca de 800 mil entradas de transmissões AIS. Cada uma destas entradas apresenta os seguintes campos, ilustrados na figura 9:

- Identificação do Navio – Número identificador do navio, número *Maritime Mobile Service Identity*, número IMO, *callsign* e nome do navio;
- Informação Temporal – Ano, mês, dia e hora;
- Localização – Latitude e longitude, ângulo de guinada, proa e velocidade;
- Caracterização da Navegação – Tipo de navio e Tipo de navegação.

² Arquivos de texto, com valores separados por vírgulas.

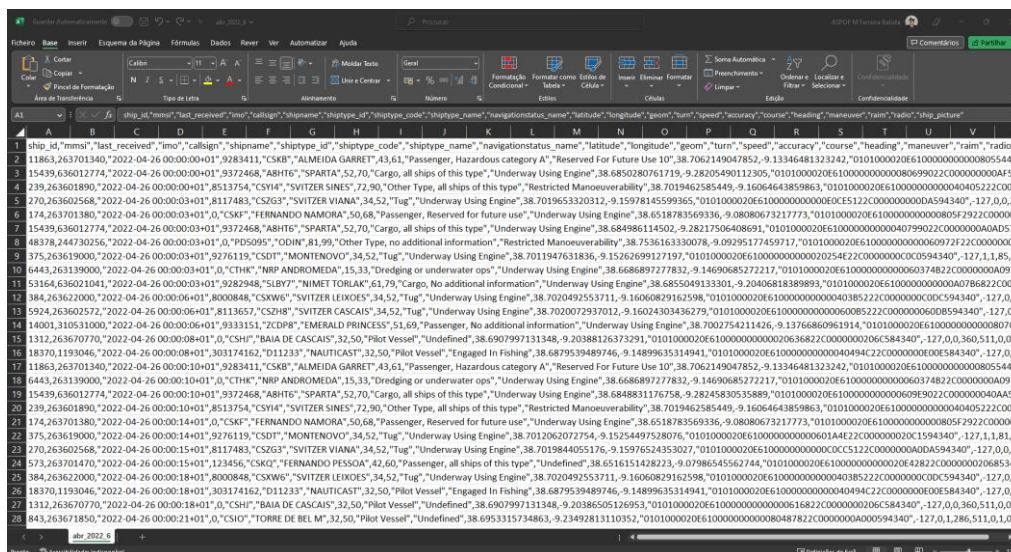


Figura 9 - Base de dados AIS em Ficheiro .csv

A análise completa destes dados demanda um considerável investimento em termos de processamento, pelo que foi necessário reduzir a quantidade de dados a processar.

Com este objetivo em mente, foi necessário escolher qual o mês que apresenta maior número de navios a navegar na área de estudo. Foi selecionado o número de navios como critério de escolha, ao invés de números de entradas AIS, pois considerou-se que navios que menos navegam neste rio representam um risco maior para a segurança da navegação, devido a não conhecerem a zona.

Assim, foi empregue o software Orange (Demsar, et al., 2013)3.34.0, de forma a filtrar o volume de navios por mês na área, como exemplificado na figura 10. Como podemos observar na figura 11, o mês de abril regista o maior número de navios.

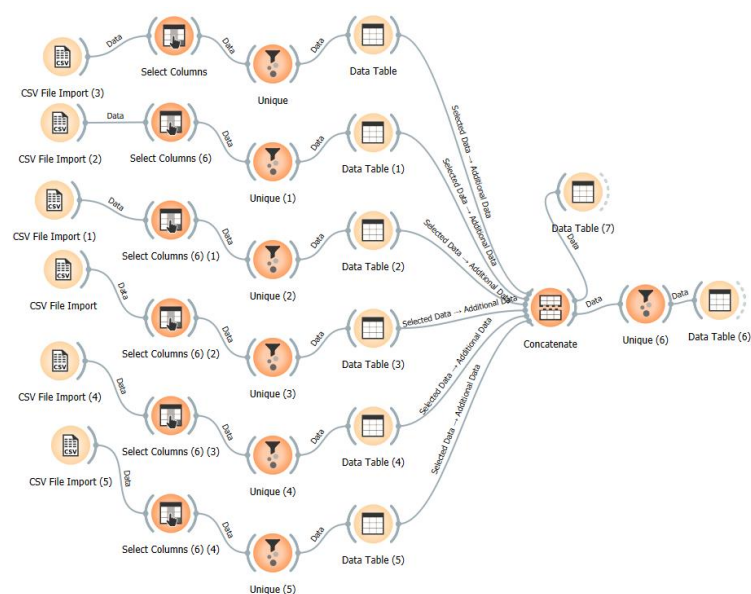


Figura 10 - Modelo utilizado para o cálculo de navios por mês

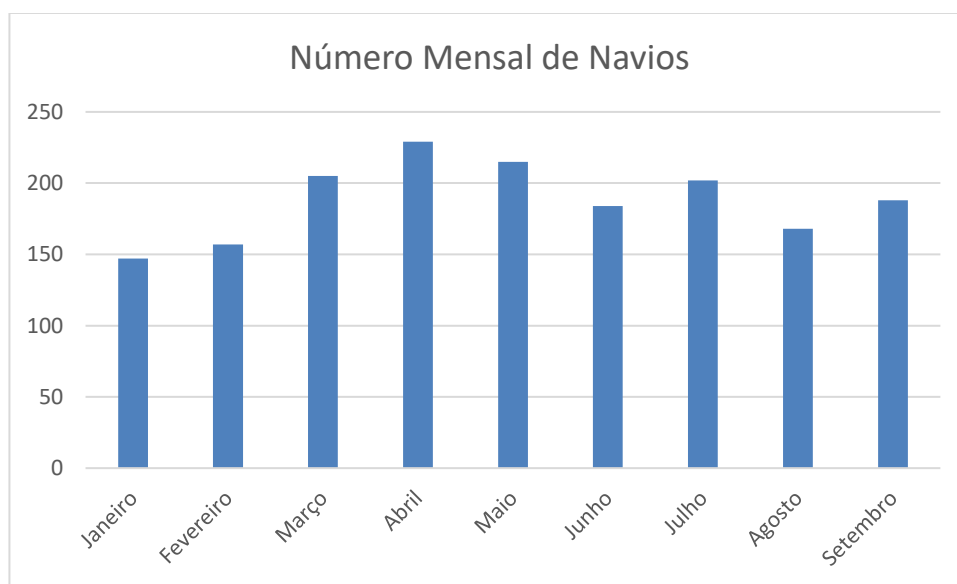


Figura 11 - Número de navios por mês

Posteriormente, foi necessário examinar os dados AIS com o objetivo de determinar se estes requerem alguma correção. Posto isto, foi realizada uma análise visual das posições dos navios utilizando o software QGIS, da qual se identificaram três

navios que apresentam *outliers*³. Esta categorização de *outliers* deve-se ao facto de estarem sobre áreas terrestres ou exibirem uma notável distância entre os pontos num curto intervalo de tempo, o que sugere possíveis falhas no sistema de Global Positioning System (GPS) da embarcação.

Com o objetivo de não perder informações relevantes, isolaram-se todas as transmissões relacionadas com os três navios numa nova camada, como ilustrado na figura 12, a fim de identificar o intervalo de tempo onde o transmissor AIS apresentou anomalias, e assim, eliminar os dados da base de dados.

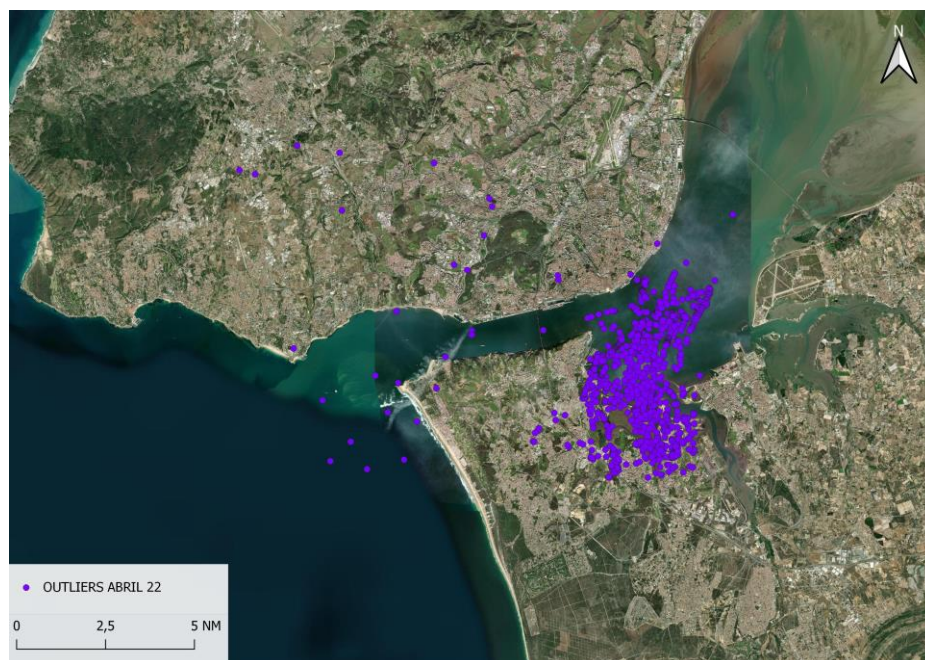


Figura 12 - Outliers identificados

Dessa maneira, foi possível excluir somente os dados que estavam incorretos, assegurando a integridade da base de dados e, portanto, validando esses dados. O resultado, com todos os dados anómalos retirados e com todas as entradas AIS identificadas com pontos, encontra-se ilustrado na figura 13.

³ Outlier é um valor incomum que foi reportado corretamente, mas não está de acordo com o padrão dos restantes valores (Dhiren Ghosh, 2012).

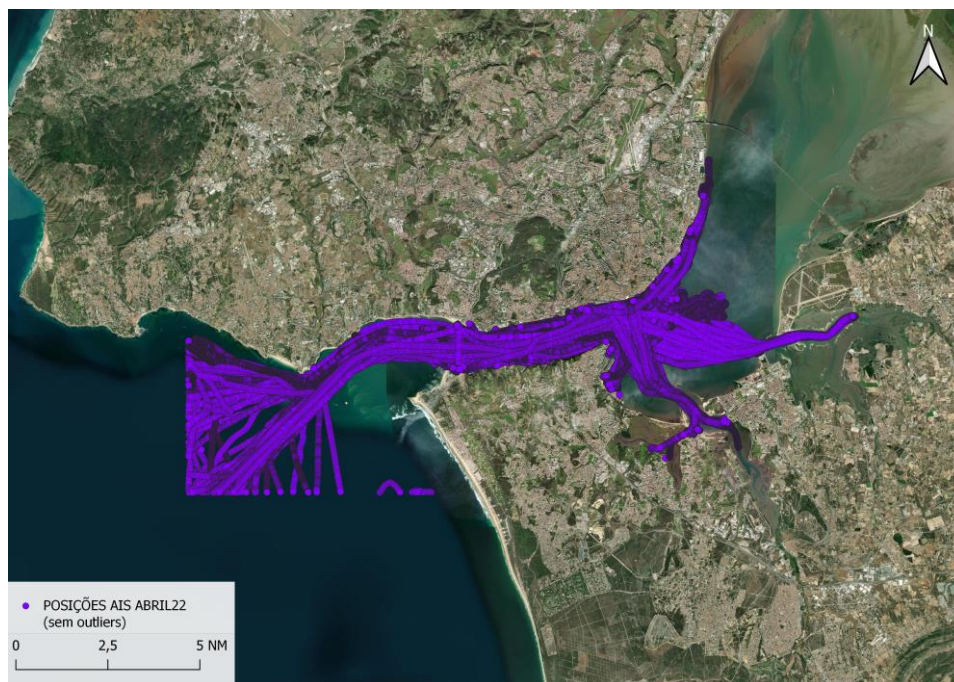


Figura 13 – Base de dados AIS pós limpeza

Com base nesta figura é apenas possível identificar os canais de navegação utilizados pelos navios, e que existe um grande número de navios que não navega pelos canais de navegação delimitados pelo sistema de balizagem marítima, presente nos canais de navegação do Montijo e do Barreiro e presente nas barras de entrada do Porto de Lisboa. A restante análise destes dados irá estar descrita no capítulo seguinte.

No total, foram identificados 773 *outliers* e, sendo que a base de dados AIS para o mês de abril apresenta aproximadamente 4 800 000 entradas, podemos concluir que apenas 0,0001% das entradas AIS correspondem a *outliers*.

3.2.2. Modelo Batimétrico

Como referido no início deste capítulo, foi cedido pelo IH, por meio do portal Hidrográfico+, o modelo batimétrico do estuário do rio Tejo, construído com base na informação de sondagens feitas pelo IH, ilustrado na figura 14.

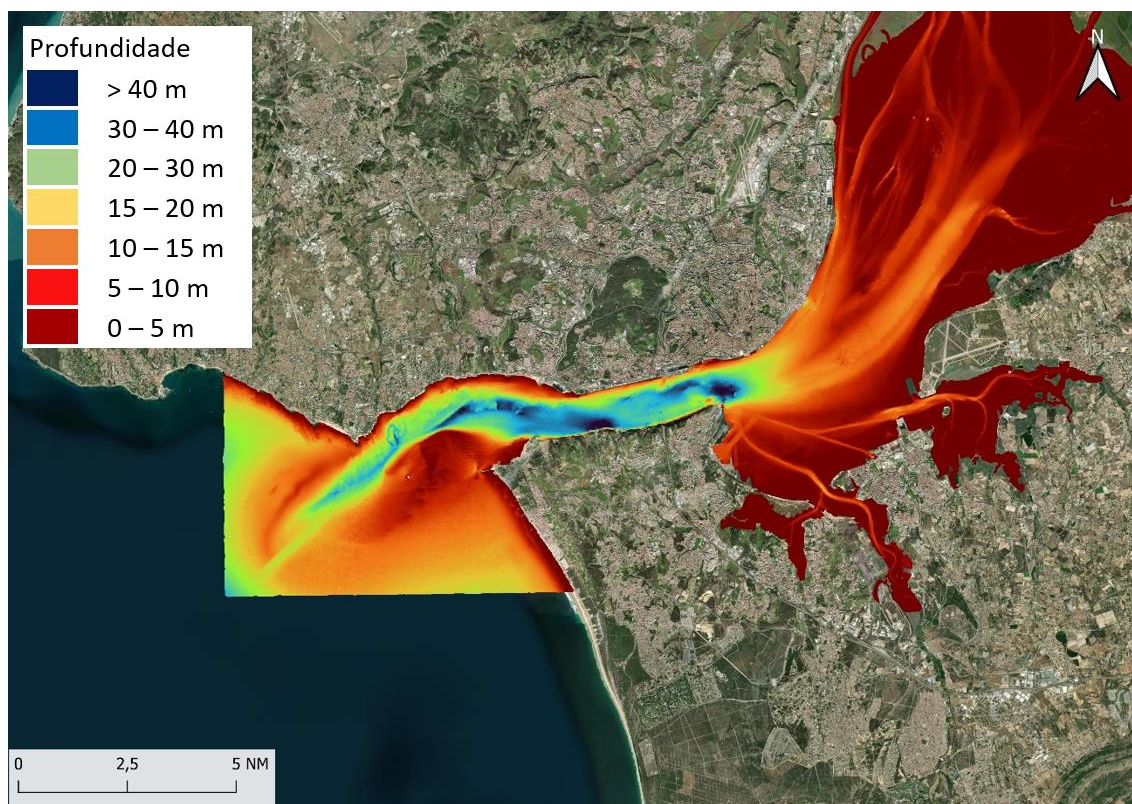


Figura 14 - Modelo batimétrico do estuário do Rio Tejo

Como podemos visualizar nesta figura, os locais navegáveis com menos profundidade são efetivamente as zonas externas aos canais de navegação. Os canais que ligam os terminais do Barreiro e do Seixal à Margem Norte do rio são utilizados maioritariamente por ferries de pequeno porte.

Por sua vez, nas barras de entrada do rio Tejo podemos visualizar que a Barra Sul apresenta uma batimetria de aproximadamente 20 metros no seu ponto inicial, sendo que passando os limites exteriores do canal, encontramos batimetrias de 5 a 10 metros de profundidade. Em contrapartida, a barra Norte apresenta batimetrias de 10 a 15 metros, sendo apenas recomendada para navios de pequeno porte.

Após a entrada, e mais próximo do farol do Bugio, o canal torna-se mais fundo e mais largo, contudo a margem sul do canal torna-se mais perigosa, pois apresenta zonas com 0 a 5 metros de profundidade.

3.2.3. Levantamentos Hidrográficos Realizados

Como podemos visualizar na figura seguinte, as zonas sondadas mais recentemente pelo IH são a Barra Sul, a Barra Norte e a zona mais próxima do farol do Bugio, representadas a azul-escuro na figura 15.

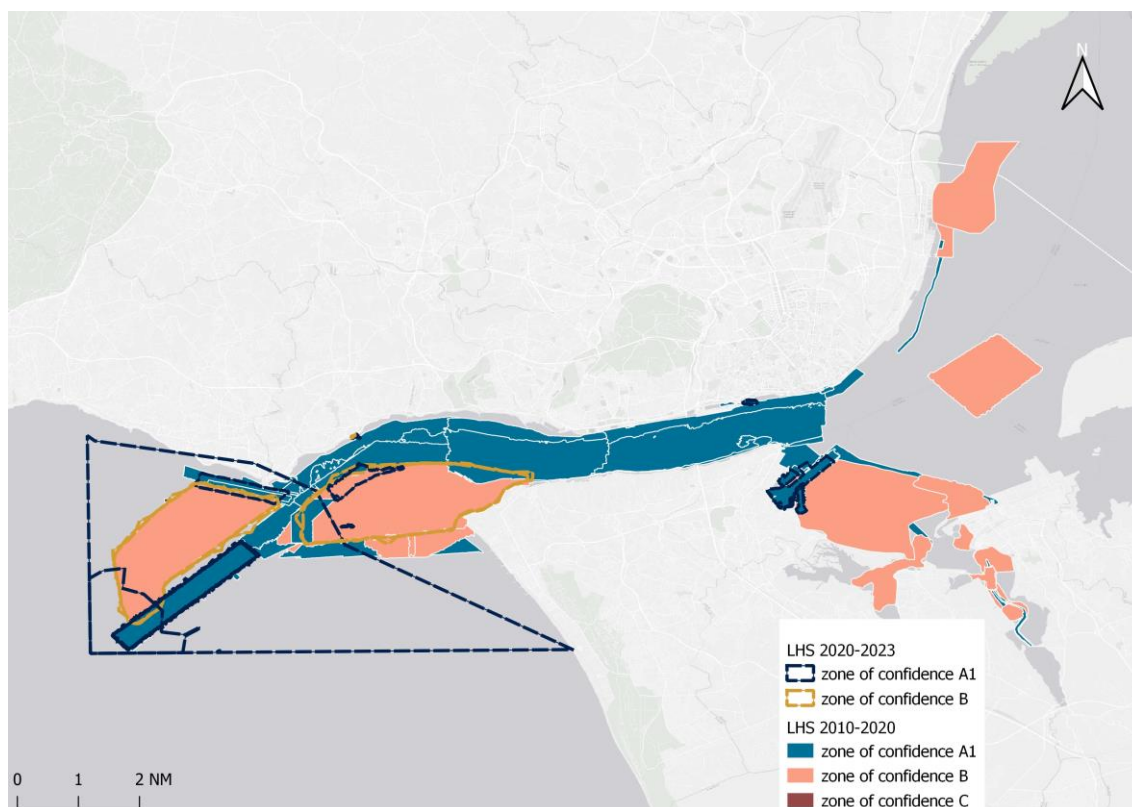


Figura 15 - Levantamentos hidrográficos realizados pelos IH

Conseguimos também visualizar que existem algumas zonas no canal principal e no Mar da Palha, onde os LH utilizados para a produção das CEN já apresentam mais de 10 anos, o que pode levar à diminuição da confiança na batimetria apresentada.

3.2.4. Levantamentos Realizados na Barra Sul

Foram fornecidos, os LH realizados na Barra Sul do Rio Tejo e no Cachopo Norte, com o objetivo de avaliar a sequência de LH e calcular a evolução batimétrica do estuário do rio.

A única zona onde é possível calcular a evolução batimétrica do fundo é na Barra Sul, pois é a zona mais regularmente sondada pelo IH. A zona do Cachopo Norte,



apesar de ser também sondada com regularidade, é sondada com feixe simples, o que torna estas sondagens não aplicáveis para esta dissertação, por não apresentarem cobertura total do fundo. Em todo o caso, a Barra Sul, sendo uma das zonas mais críticas para a entrada de um navio de grande porte, é constantemente dragada, o que apresenta limitações no processamento destes dados.

Uma vez que as datas de realização das dragagens não foram disponibilizadas, foi necessário analisar os levantamentos, de forma a determinar a existência de sequências de levantamentos que não fosse posta em causa por dragagens.

3.2.5. CATZOCS em Vigor

Como podemos verificar na figura 16, existem três ordens de CATZOC em vigor no estuário do rio Tejo. A Barra Norte, a Barra Sul, parte dos canais de navegação do Barreiro e praticamente toda a extensão do canal de navegação do rio apresentam uma zona de confiança A1, devido ao tipo de navegação esperada naqueles locais. Por sua vez, em zonas onde não é esperada tanta navegação, como as zonas mais próximas à margem do rio, o canal do Seixal, parte do canal do Montijo e toda a área da foz do rio, à exceção das duas barras de acesso, apresentam zonas de confiança do tipo B. Por último, com uma zona de confiança C, temos toda a extensão a Nordeste do Mar da Palha e toda a área na proximidade dos canais do Montijo, do Seixal e do Barreiro, onde, devido à baixa profundidade, não é esperada navegação.

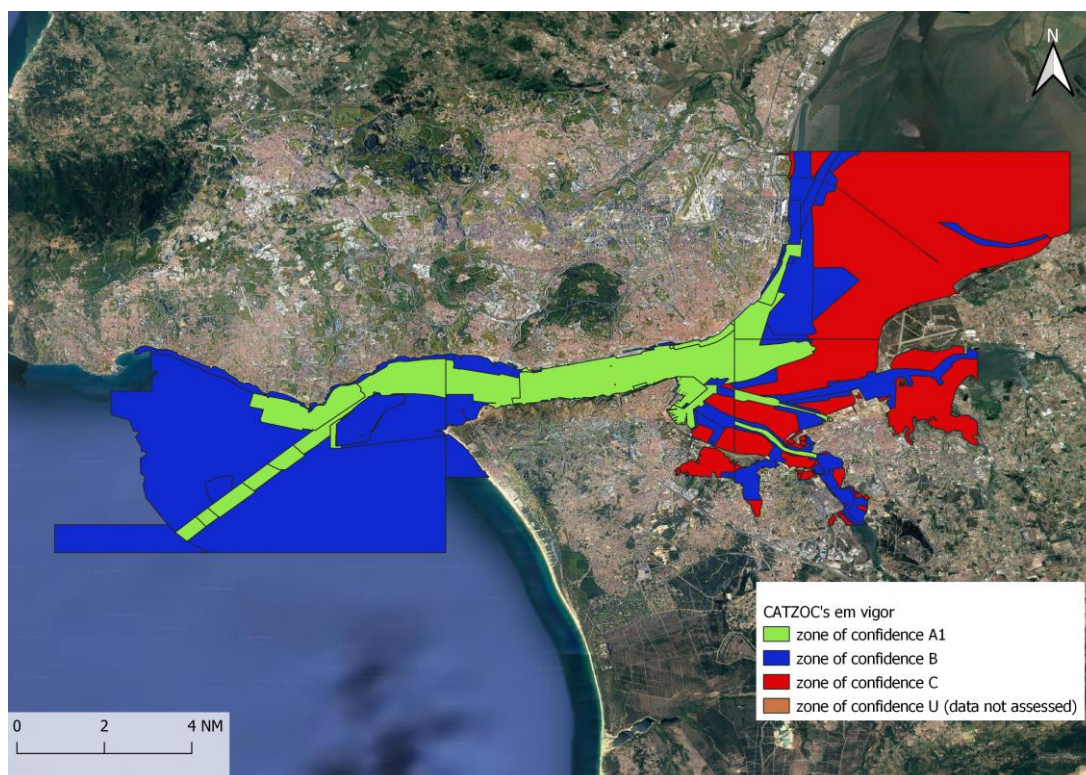


Figura 16 - CATZOC em vigor no Rio Tejo

3.2.6. Natureza do Fundo

A natureza do fundo, como a sua composição, topografia e características hidrográficas, desempenha um papel crucial na determinação da gravidade dos danos causados por encalhes.

De forma a determinar a natureza do fundo da área de estudo, foi analisada a camada SBDARE⁴, retirada das CEN. É de referir que, geralmente, não é possível definir todo o fundo de uma área na sua completa extensão, assim sendo as características do fundo podem ser representadas apenas por um ponto (OHI, s.d.).

É importante referir que encalhes de navios em diferentes tipos de fundo apresentam diferenças significativas. Por exemplo, num encalhe de um navio em areia

⁴ Camada removida das CEN, composta por linhas, pontos ou áreas que descreve o tipo de fundo. Está apenas disponível onde a natureza do fundo é homogénea.

pode eventualmente desencalhar sem ajuda, devido ao efeito da maré, e sem danos significativos, devido a um fundo de areia ser uma superfície suave. Em contrapartida, o encalhe de um navio em rocha, causa danos mais graves, sendo capaz de causar rombos no casco dos navios, podendo resultar no derrame de óleos e combustíveis para o mar. Adicionalmente, o resgate de um navio encalhado em rocha torna-se mais difícil, pois a remoção de um navio de uma superfície irregular é mais complexa, sendo assim necessário operações de reboque mais complexas e arriscadas.

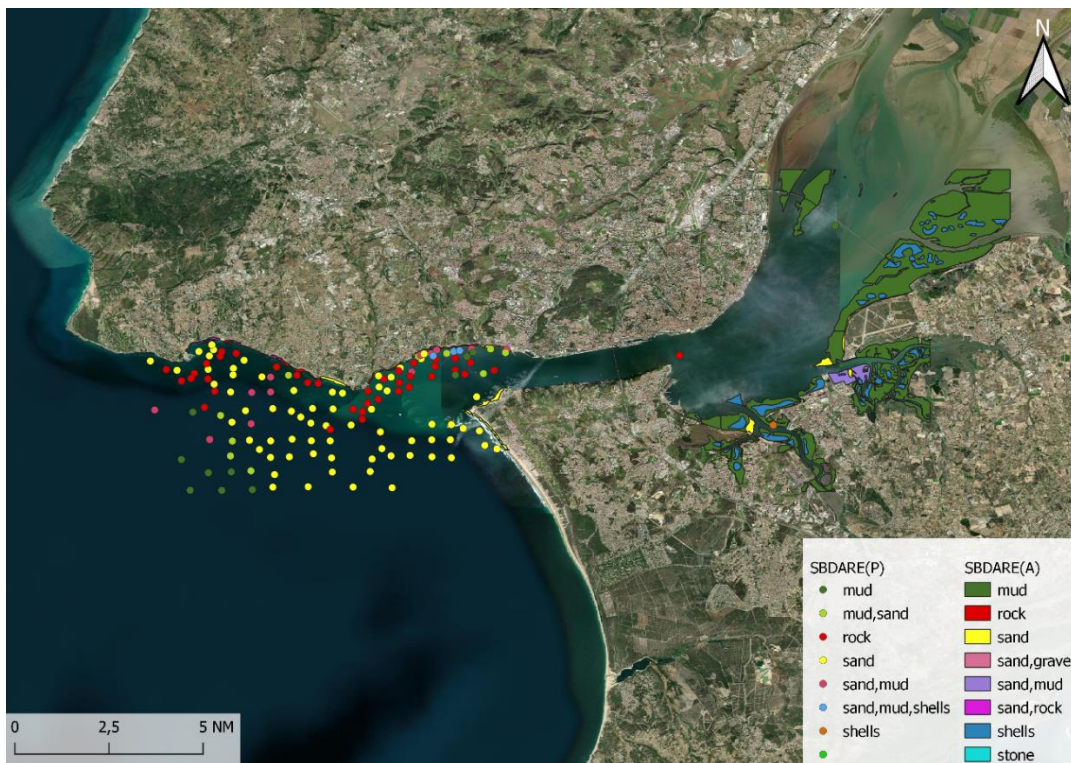


Figura 17 - Natureza do fundo

Como podemos visualizar na figura 17, as zonas a Nordeste e Sudeste do Mar da Palha apresentam maioritariamente fundos compostos por lodo e pedra de pequenas dimensões. A foz do rio, contrariamente ao Mar da Palha, é composta por sedimentos de maiores dimensões, como areias e rochas. A margem Norte do rio apresenta maioritariamente dois tipos de fundo, rochas e areia, enquanto que a restante foz do rio é composta por areias e lama.

Com base numa investigação realizada no ano de 2017 (Santos , Aurora , & Quartau, 2018), tendo como base amostras sedimentares recolhidas desde o ano de



2010 até 2015, foi possível identificar que no canal de navegação do rio Tejo, as margens são compostas por depósitos de sedimentos finos, como gravilha, enquanto que a parte central do canal é composta por sedimentos mais grossos, como areia e cascalho. O mapa resultante desta investigação pode ser encontrado no anexo A.



4. Métodos

Este capítulo tem como objetivo descrever todos os métodos e procedimentos utilizados para criar evidências e informações de forma a atingir os objetivos desta dissertação. Neste, irá estar detalhada a análise e a compilação dos dados referidos no capítulo anterior.

Todas as funções utilizadas neste capítulo estão ilustradas no Apêndice B desta dissertação.

4.1. Densidade de Tráfego

De forma a determinar os locais onde a navegação é mais densa, foi necessário remover todos os navios que não são de interesse para a criação deste mapa. Foi assim determinado que os navios de interesse seriam todos os navios a navegar ou fundeados e não os navios atracados.

Inicialmente, foi feita uma seleção de todos os navios que se apresentassem como navios a navegar, mas após a primeira tentativa foi determinado que seria impossível criar o mapa desta maneira, pois a densidade ficava toda adjacente aos terminais do porto.

Devido ao que foi dito no subcapítulo 2.4, muitos navios não alteram o tipo de navegação, na consola do AIS, imediatamente depois da largada, chegando a existir navios que não alteram esta informação até após a saída da barra ou pelo contrário, navios que já estão atracados e continuam a transmitir como navios a navegar. Todos estes dados acabam por criar ruído e dificultar a criação do mapa.

De forma a aproveitar os dados de todos os navios para a criação do mapa de densidade, foi efetuada a remoção dos dados que não tinham interesse. Estes foram determinados como aqueles em que os navios apresentam velocidades iguais ou inferiores a 3 nós, sendo que apenas desta forma seria assegurado que os dados eram correspondentes a navios efetivamente a navegar.

O mapa de densidades obtido após esta limpeza foi o seguinte:



Figura 18 - Mapa de Densidade AIS

Como podemos verificar na figura 18, o local onde efetivamente existe maior navegação, está localizado entre os terminais de ferries do Cais do Sodré e do Terreiro do Paço, na margem Norte, e entre os terminais de ferries do Barreiro e do Seixal, na margem Sul. Toda esta navegação deve-se, maioritariamente, aos ferries que fazem este trajeto de ida e volta repetidamente.

Devido à frequência de navegação destes navios, perde-se um pouco a noção das restantes zonas onde efetivamente existe uma grande densidade de tráfego. Deste modo, foi criado um segundo mapa de densidade, este sem ferries, onde é possível ver onde existem pontos críticos para a navegação dita “normal”.

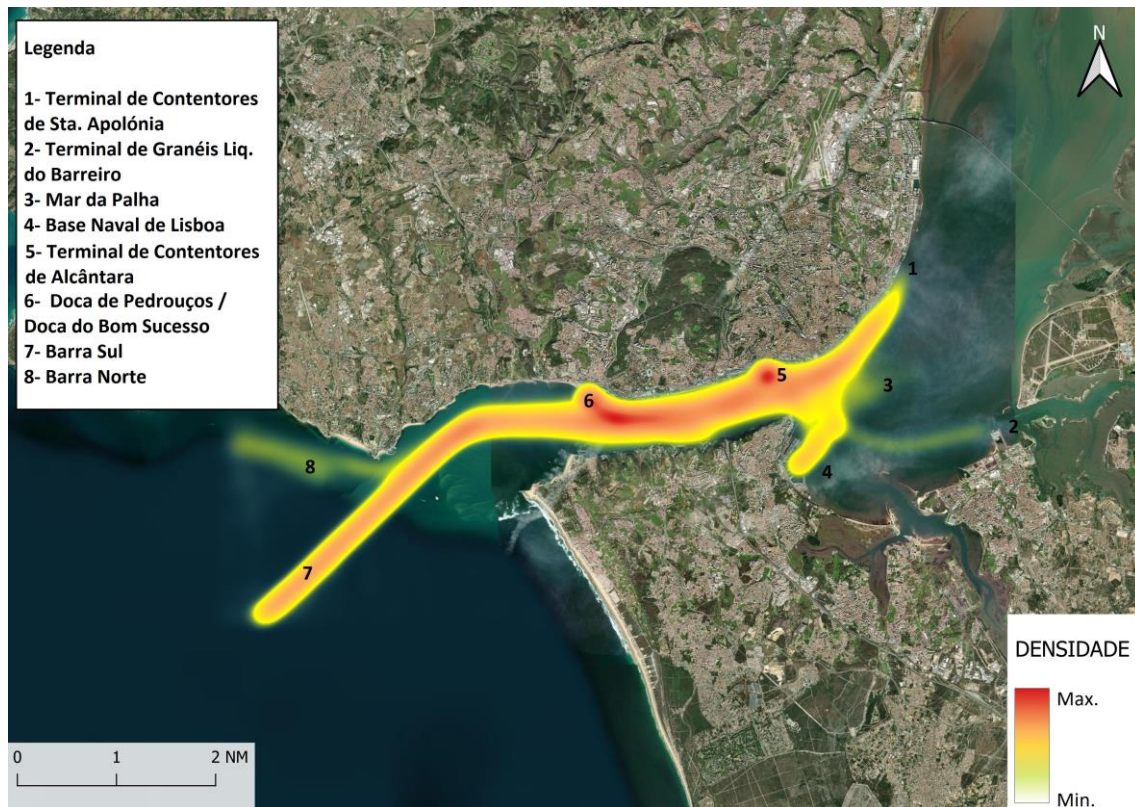


Figura 19 - Mapa de Densidade AIS, sem ferries

Como podemos observar na figura 19, as zonas que apresentam maior densidade de navegação estão localizadas no ponto 6 e no ponto 5. O ponto 6 é o local onde a densidade é superior, comparativamente a todos os outros locais. Este, além de apresentar duas docas bastante próximas, apresenta também dois monumentos com grande atratividade para o turismo, a Torre de Belém e o Padrão dos Descobrimentos, o que cria constrangimentos, com navios turísticos a baixa velocidade, e navios de grande porte, que após a entrada na barra se encontram na fase de preparação para atracar nos cais.

O Terminal de Contentores de Alcântara é o segundo local com maior densidade de tráfego. Toda esta densidade deve-se a este ser um porto destinado ao tráfego intercontinental, recebendo normalmente navios da América, da África e de outros pontos da Europa.



Do mesmo modo, foi possível distinguir como pontos de média densidade de tráfego o terminal de contentores de Sta. Apolónia, que habitualmente recebe navios provenientes da África Ocidental, do norte da Europa e das ilhas portuguesas e mais recentemente cruzeiros, e a Base Naval de Lisboa, local onde ficam atracados os navios da MP, sendo que diariamente são efetuadas entradas e saídas por estes navios.

Por último, conseguimos visualizar que a maior parte dos navios efetua a entrada e a saída do Porto de Lisboa pela Barra Sul, sendo que apenas um reduzido número de navios utiliza a Barra Norte.

4.2. Determinação de Resguardo ao Fundo

Por forma a identificar as zonas onde os navios passam com menor resguardo ao fundo, foi necessário acrescentar à base de dados existente valores que não foram fornecidos referentes ao calado dos navios. Foi assim necessário efetuar uma procura, no website *Marine Traffic* (Marine Traffic, 2023), pelo MMSI dos navios, sendo posteriormente retirados os valores de calado de cada navio e adicionados à base de dados.

Seguidamente, vetorizou-se o modelo batimétrico de forma a inserir nos dados AIS, a profundidade que cada entrada corresponde.

Podemos identificar, na figura 20, as zonas onde os navios passam com resguardo ao fundo, entre -1 e 1 metro. Nesta figura, o resguardo ao fundo pode apresentar valores negativos, uma vez que este estudo não contempla a altura de maré, sendo que, por exemplo, um navio com seis metros de calado, quando a altura de maré é superior a 2 metros, pode navegar em zonas de profundidade igual ou superior a 4 metros. Encontra-se no apêndice B uma figura onde é possível identificar os locais onde os navios apresentam resguardos entre 1 e 5 metros.



Figura 20- Locais onde existe menor resguardo ao fundo

Podemos assim concluir que as zonas mais críticas em relação ao resguardo ao fundo são:

- A margem Norte do rio, desde a zona de Caxias, até à zona do Parque das Nações;
- A zona próxima do Forte de São Julião da Barra;
- A área a Sul da Barra Sul;
- O canal do Alfeite;
- O canal do Montijo;
- O canal do Barreiro;
- As áreas a Norte dos canais do Montijo e do Barreiro.

4.3. Determinação do Declive do Fundo

Para determinar as zonas onde o fundo apresenta maior irregularidade, foi criada uma camada com o declive do fundo. Esta camada apresenta o declive do fundo expresso em graus, sendo a média de declive na área de estudo de 0,6 graus e o máximo de cerca de 30 graus.



Figura 21 - Declive do fundo

Na figura 21 observamos que a zona onde o declive apresenta valores máximos é a costa da margem sul do rio, desde Cacilhas até à zona da Trafaria. Conseguimos também identificar os locais onde foram feitas dragagens, como a Barra Sul e os canais de navegação do Montijo, do Barreiro e do Alfeite, bem como identificar os canais naturais criados pela erosão e pela sedimentação do rio.



4.4. Determinação do Coeficiente de Decaimento

Visto apenas existirem levantamentos com recurso ao sistema multifeixe e de regularidade anual na Barra Sul do rio Tejo, foi apenas possível medir o coeficiente de decaimento do fundo nesta zona. Com o propósito de avaliar as restantes zonas considerou-se que, para efeitos académicos, o valor obtido é aplicável à totalidade do estuário, permitindo assim a análise de toda a sua extensão, ao invés de apenas uma pequena área.

Assim sendo, foi utilizada uma ferramenta que calcula as diferenças entre duas camadas para determinar onde as alterações são mais evidentes, e assim obter a evolução batimétrica.

Desta forma foram criadas camadas de diferenças entre os anos 2018 e 2019, 2019 e 2020, 2020 e 2021, 2021 e 2022 e por último uma camada que mede as diferenças que ocorreram desde o levantamento da Barra Sul do ano de 2018 e de 2022.

Foram também criadas camadas de diferença, para três zonas distintas de menor dimensão, sendo a primeira a zona A a Norte do canal dragado, a segunda a zona B a Sul do canal e a terceira, C, é uma pequena zona localizada no centro do canal, como podemos visualizar na figura 22.



Figura 22 - Áreas onde foi determinado o Coeficiente de Decaimento

O propósito da criação destas pequenas camadas foi quantificar o aumento ou diminuição da profundidade nas zonas referidas anteriormente. Foram escolhidas estas três áreas devido à sua posição na Barra e às alterações visualizadas nas camadas inicialmente criadas.

A primeira área foi escolhida pois é a maior área não dragada de toda a Barra, sendo assim possível uma medição mais correta da alteração do fundo, pois é a que apresenta o menor número de alterações realizadas por humanos. Na camada inicialmente criada, foi possível visualizar que esta zona é composta por “dunas”. Do mesmo modo, foi possível determinar que nesta zona ocorre a maior diminuição de profundidade.

A segunda área foi escolhida apenas por se apresentar numa zona que não foi dragada. Da mesma maneira, foi determinado que nesta existe um pequeno aumento de profundidade e que, contrariamente à zona Norte, é composta por um fundo plano.

A terceira e última área foi escolhida pois é aquela que apresenta uma maior alteração em relação ao aumento da profundidade.

Destas camadas foi retirada a informação de que, na Barra Sul, o canal dragado apresenta, em média, um aumento de profundidade de cerca de 1,1 metros, enquanto que a zona Norte da Barra apresenta, em média, uma pequena diminuição de profundidade de cerca de 0,16 metros. Os valores retirados podem ser conferidos na tabela 8. De referir que considerando que a ferramenta que calcula estas diferenças é utilizada para calcular elevações, os valores negativos estão relacionados a aumentos de profundidade e os valores positivos estão relacionados com a diminuição da profundidade.

Tabela 8 - Alteração do fundo ao longo dos anos

ZONA\ANO	2018-2022	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022
Camada completa	-0,4369	-0,2909	-0,1118	-0,0427	0,0200
Zona Norte	0,1547	-0,0540	0,0689	-0,0633	0,1994
Zona Sul	-0,0795	-0,0871	0,0285	-0,0998	0,0789
Canal dragado	-1,1138	-0,8680	0,3446	0,0029	0,1072

De forma a determinar um valor que substitua o coeficiente de decaimento utilizado no cálculo do HHM, foi escolhida a evolução batimétrica da zona Norte da Barra, devido a ser esta a que menos alterações humanas sofre. Retirando assim o valor de aproximadamente 0,16 metros e dividindo pelos quatros anos, obtemos o valor de 0,04 metros anuais.

Substituindo este valor pelo coeficiente de decaimento utilizado no cálculo do PSS, é possível retirar os gráficos de evolução das CATZOCs. A figura 23 ilustra a curva de decaimento das CATZOC no porto de Lisboa.

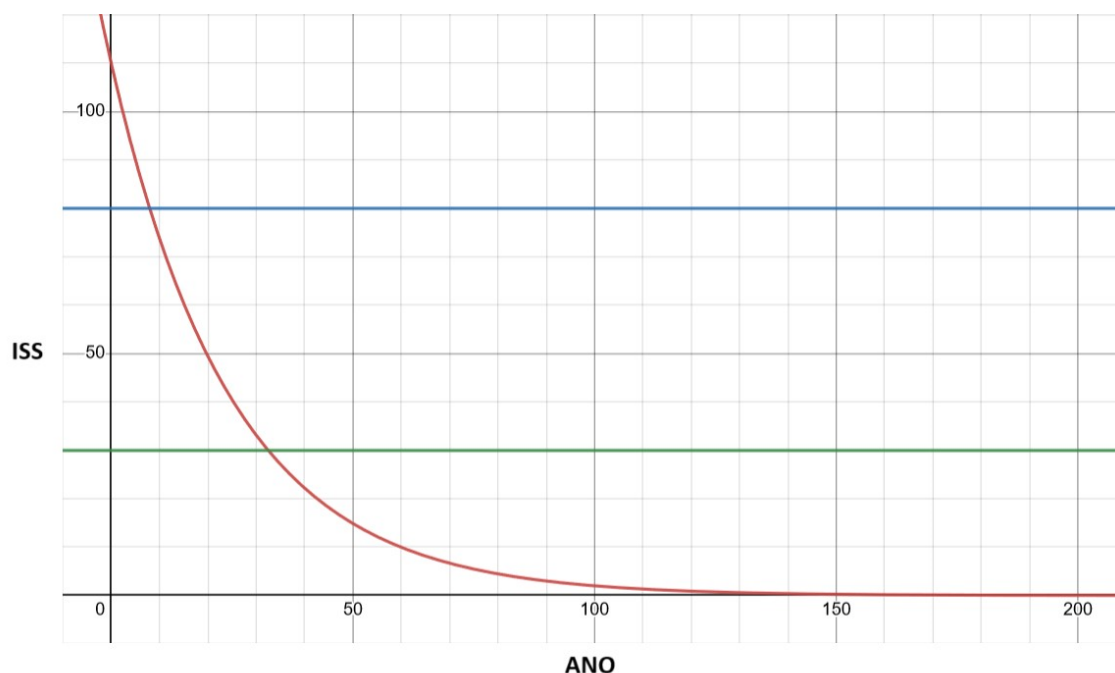


Figura 23 - Tempo de vida útil para uma CATZOC

Desta figura retiramos que uma CATZOC A (eixo Y igual a 110) passa para uma CATZOC B (eixo Y igual a 80) em cerca de 8 anos e para CATZOC C (eixo Y igual a 30) em 32 anos. Assim sendo, uma CATZOC B passa para CATZOC C em 24 anos.

4.5. Junção de Camadas

4.5.1. Mapa de Densidades e CATZOC

A densidade de tráfego é um dos critérios mais críticos para a segurança da navegação. O mapa de densidade referido num dos subcapítulos anteriores permitiu determinar as zonas onde existe maior tráfego, sendo nestas que os navios navegam mais próximos uns dos outros.

A figura 24 ilustra a junção da camada das CATZOC e do mapa de densidades. Nesta é possível visualizar a confiança atribuída às zonas onde a navegação é mais intensa.

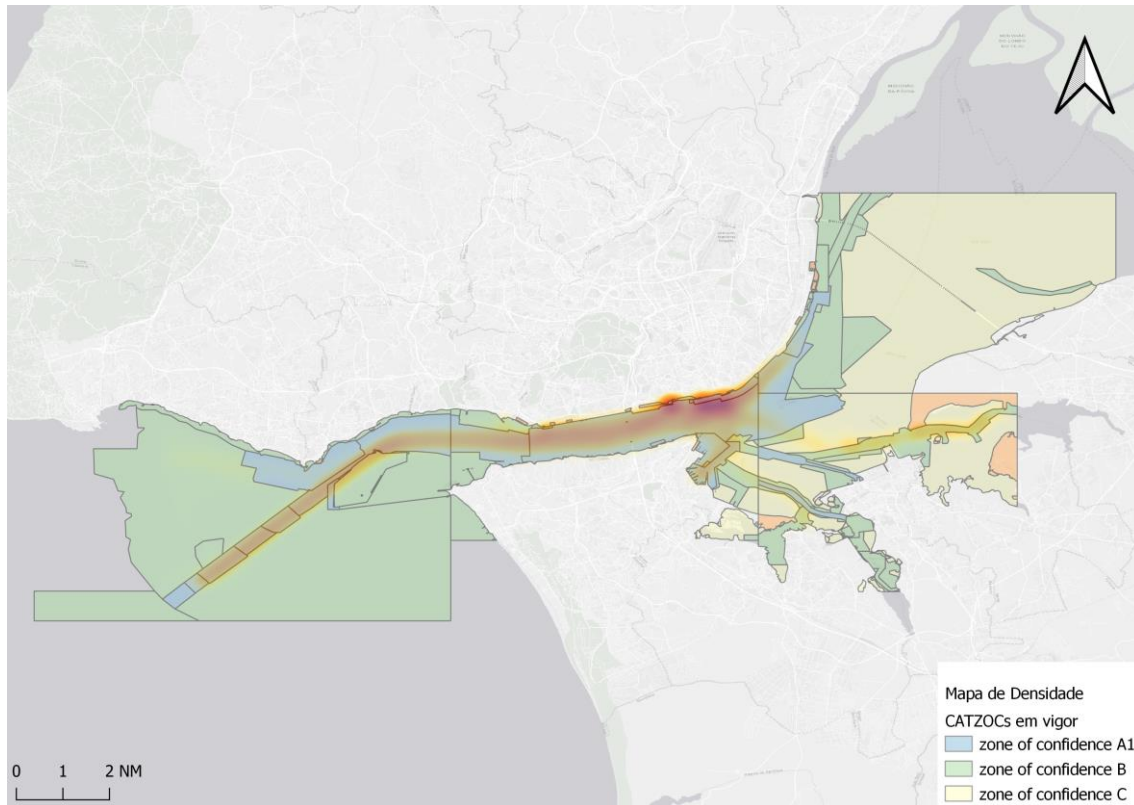


Figura 24 - Sobreposição CATZOC e Mapa de Densidades

Deste modo, podemos visualizar a correlação existente entre a densidade dos navios e o grau de confiança apresentado. Conseguimos assim identificar que as zonas onde a navegação é mais densa são as zonas onde as ZOC têm o seu menor grau de incerteza, à exceção das zonas próximas ao canal do Montijo, onde é possível visualizar que a maior parte dos navios, por não respeitarem o canal de navegação, navega numa zona de confiança C.

4.5.2. Ano de LH e CATZOC

Com a junção das camadas referentes aos anos dos levantamentos e das CATZOC em vigor, é possível analisar há quantos anos não são realizados levantamentos que complementem ou alterem as CATZOC em vigor. Devido ao elevado número de levantamentos disponíveis para análise, as figuras que compõem este subcapítulo irão estar em apêndice, à exceção da figura 25 que irá ser usada para demonstração.

A seguinte figura apresenta a junção das CATZOC atualmente em vigor com os levantamentos realizados desde o ano de 2020 até ao ano de 2023.

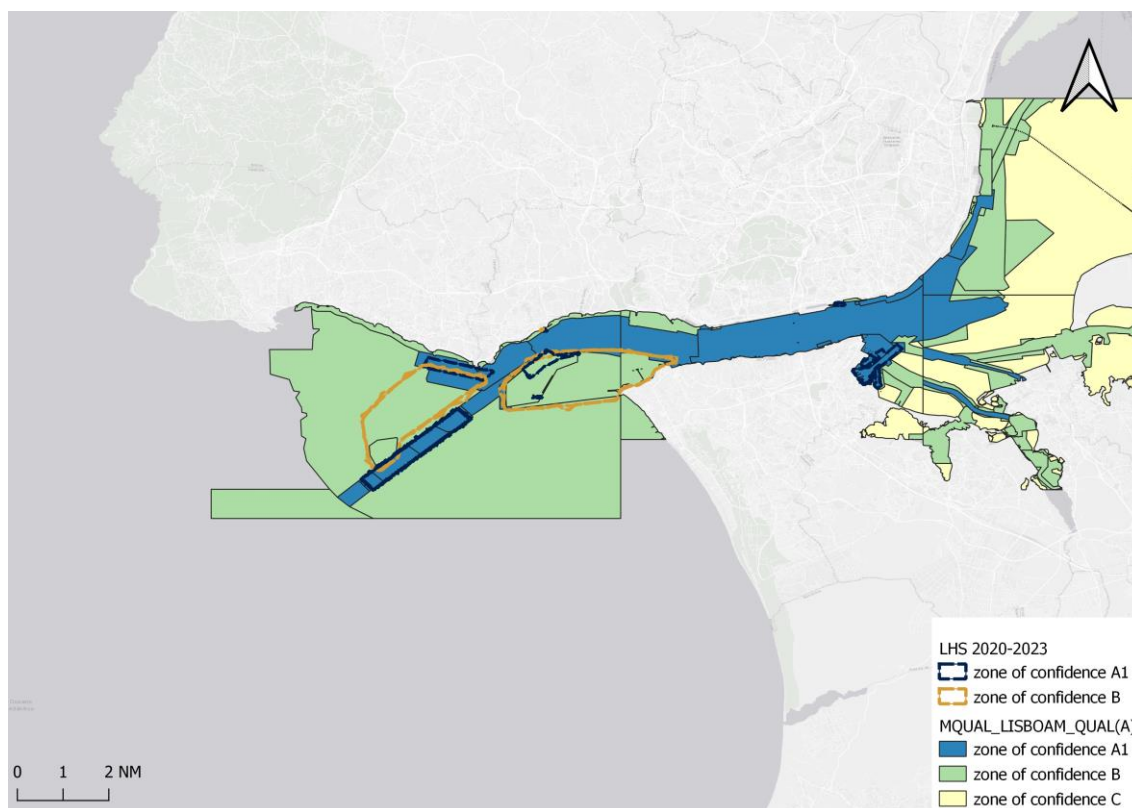


Figura 25 - Sobreposição dos anos e ordens de LH's e CATZOCs

Desta imagem podemos observar uma disparidade entre a ordem do levantamento e as ZOC. Podemos assim observar que na zona norte da golada do Bugio existe um levantamento de ordem especial realizado há pouco tempo, que se encontra numa CATZOC classificada como ZOC B.

Podemos também verificar que, apesar do canal de navegação do porto de Lisboa ser categorizado como uma ZOC A1, não apresenta nenhum levantamento posterior a 2020, segundo a figura 25.

Nas restantes análises realizadas foi possível sistematizar os seguintes pontos de interesse para esta dissertação:



- O canal de navegação, apesar de se apresentar com uma CATZOC A1, desde o final da Barra Norte até à zona do Parque das Nações, apresenta a informação nas CEN de que os últimos levantamentos realizados na zona apresentam mais de 20 anos de idade;
- Existe alguma disparidade entre a base de dados de LHs e as informações retiradas da base de dados de CATZOC em vigor, nomeadamente no canal do Barreiro, o qual apresenta uma ZOC A1, com a informação que foi realizado um levantamento em 2013, sendo que, de acordo com as sondagens realizadas, apenas uma pequena parte desta foi sondada no ano de 2013;
- Existem pequenas zonas, localizadas entre o Mar da Palha e o Parque das Nações, que apesar de se apresentarem como uma ZOC B, as CATZOC não apresentam atualizações desde 1995;
- Por último, é possível visualizar que os levantamentos mais recentes não têm sido tidos em conta para as CATZOCs em vigor, sendo que parece não existir uma atualização das CEN, com base nos levantamentos realizados.

Em suma, é possível visualizar que zonas com níveis altos de confiança, não são sondados há mais de 20 anos, bem como as CATZOC representadas nas CEN não estão a ser atualizadas com base nos levantamentos mais recentes.

4.5.3. Resguardo ao Fundo e CATZOC

Neste subcapítulo irá ser feita uma junção das CATZOC em vigor e as zonas onde os navios passam com menor resguardo ao fundo.

Esta tem como objetivo identificar se as zonas onde os navios passam com menor resguardo apresentam a confiança necessária, de forma a maximizar a segurança destes. Assim sendo, foi criada a figura 26.

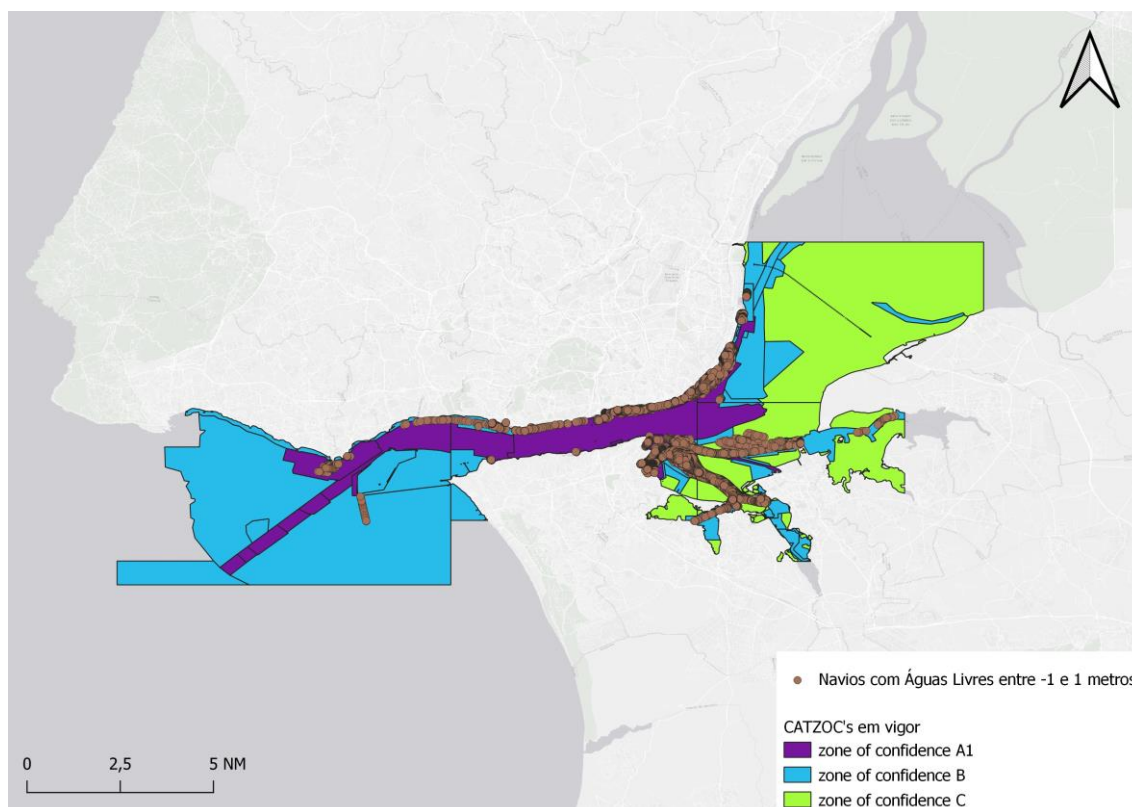


Figura 26 - Sobreposição de Resguardo ao Fundo e CATZOC

Desta figura retiramos que, na grande parte das zonas onde os navios apresentam menor resguardo ao fundo, as CATZOC apresentam confiança alta, à exceção da zona localizada a oeste da Torre de Belém, localizada fora do canal de navegação, que apresenta uma CATZOC B.

4.6. Cálculo do Hydrographic Gap

Este é um dos capítulos mais importantes para esta dissertação. Neste capítulo irão ser criados vários campos e camadas, para assim conseguir determinar o *Hydrographic Gap*.

Em primeiro lugar, é importante relembrarmos os conceitos revistos no segundo capítulo. O *Hydrographic Gap* consiste na diferença entre dois scores. O PSS, um valor que compreende a multiplicação de um número, dado pela CATZOC em vigor da área, com uma função exponencial, composta pela multiplicação do coeficiente de

decaimento e da idade do levantamento a que as CATZOC se referenciam, e o DSS, um *score* que se baseia nas necessidades da zona, referentes ao resguardo ao fundo que os navios navegam.

De forma a conseguir efetuar o que foi referido no parágrafo anterior, foi necessário efetuar uma ligação entre as zonas onde os navios passam com um resguardo de até um metro, feito previamente no subcapítulo anterior, e atribuindo valores a essas zonas, conforme a tabela 4. De seguida foi necessário criar um campo na camada das CATZOC em vigor, composta pela idade dos levantamentos utilizados na criação das mesmas, para posteriormente calcular o PSS. Com esse objetivo em mente, foi também necessário criar outro campo, na mesma camada, referente ao ISS, visível na figura 25, que atribui a cada CATZOC um determinado valor, baseado no nível de confiança inicial da mesma, como é possível observar na tabela 5.

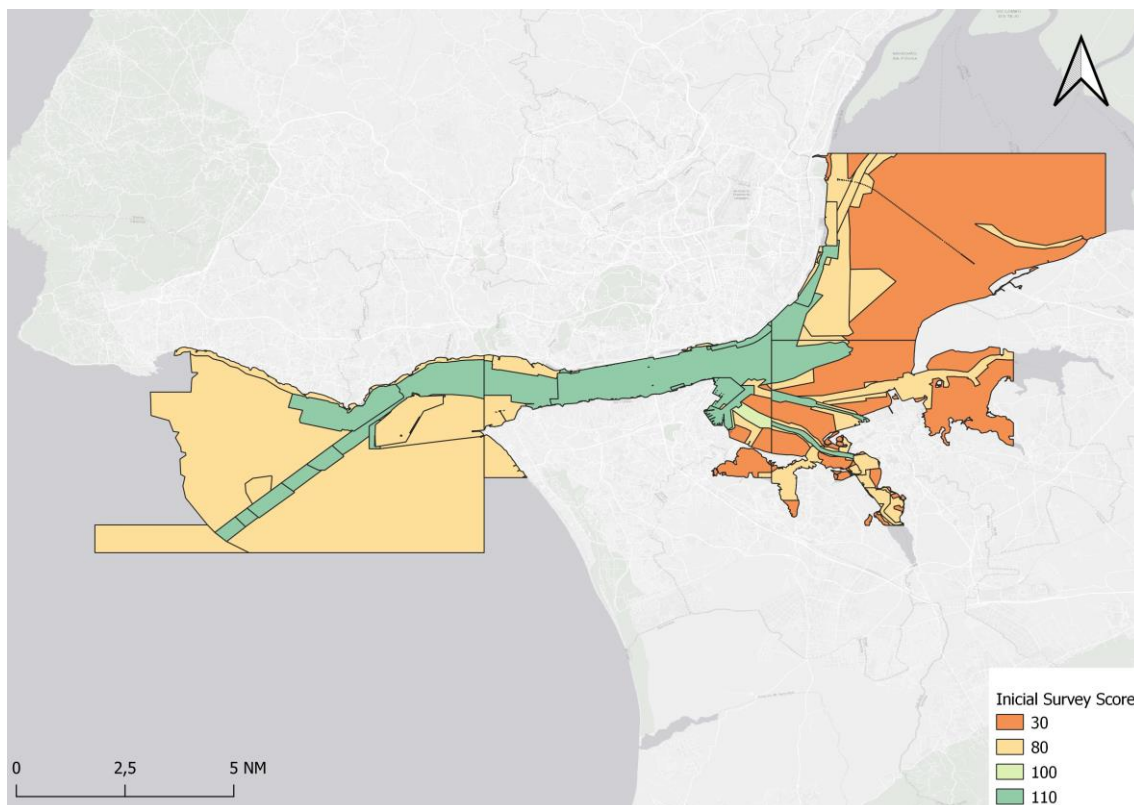


Figura 27 - Valores obtidos de ISS

Com todos os valores já definidos, foi utilizado a calculadora de campo do QGIS, para efetuar o cálculo da equação 4. Foi assim escrita a equação na calculadora, com os valores de ISS e da idade do levantamento e também do coeficiente de decaimento, que mesmo apesar de apenas ter sido medido para a Barra Sul, foi extrapolada para todo o estuário do Rio Tejo. A inserção desta equação na calculadora de campo pode ser vista na figura 28 e o resultado desta pode ser conferido na figura 29.

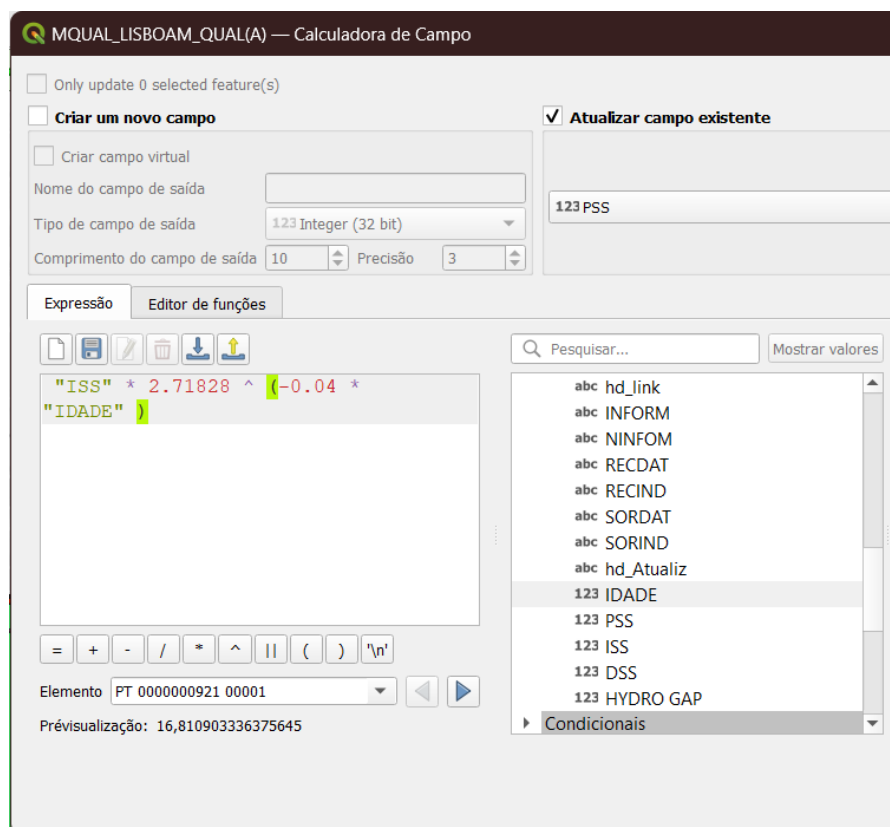


Figura 28 - Inserção da Equação para o Cálculo do PSS

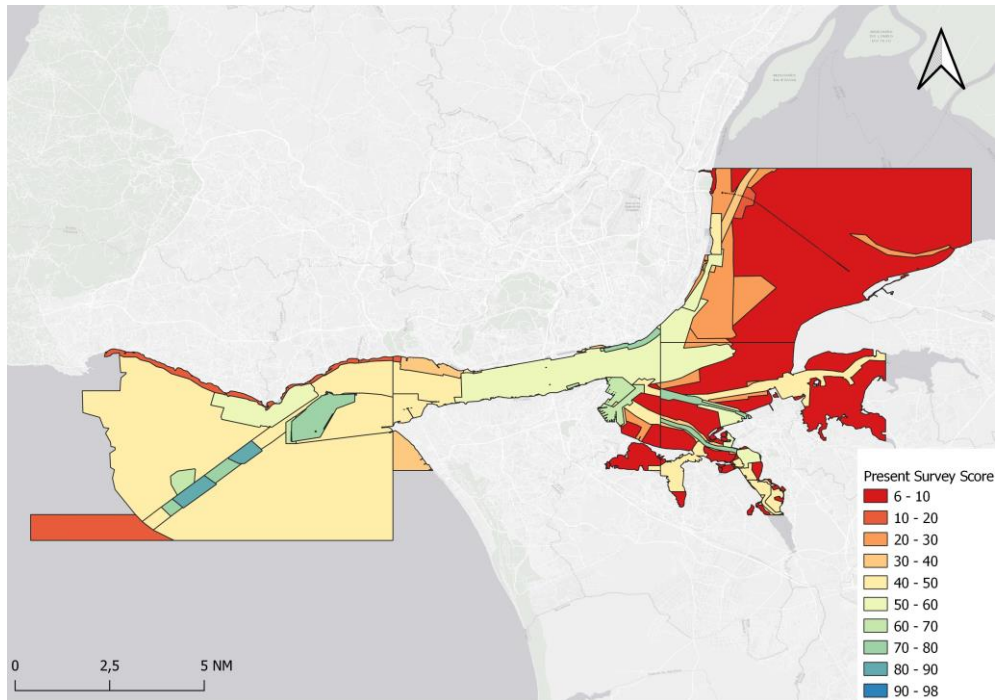


Figura 29 - Valores obtidos de PSS

Das figuras 27 e 29 podemos visualizar que existem diferenças substanciais entre o estado atual das CATZOC, contrariamente ao seu estado inicial. A maior diferença observada localiza-se no canal principal, onde existe uma diferença entre scores de 50 a 60 pontos, estando uma CATZOC A1 a apresentar a confiança de uma CATZOC B, em aproximação a uma CATZOC C.

O mapa necessário para o cálculo do DSS foi obtido no subcapítulo anterior, sendo que foi apenas necessário selecionar as CATZOC onde a navegação é efetuada com um menor resguardo ao fundo, bem como nos canais de navegação principais e dar valores referentes à tabela 4, a estes. O mapa obtido pode ser visualizado na figura 30.

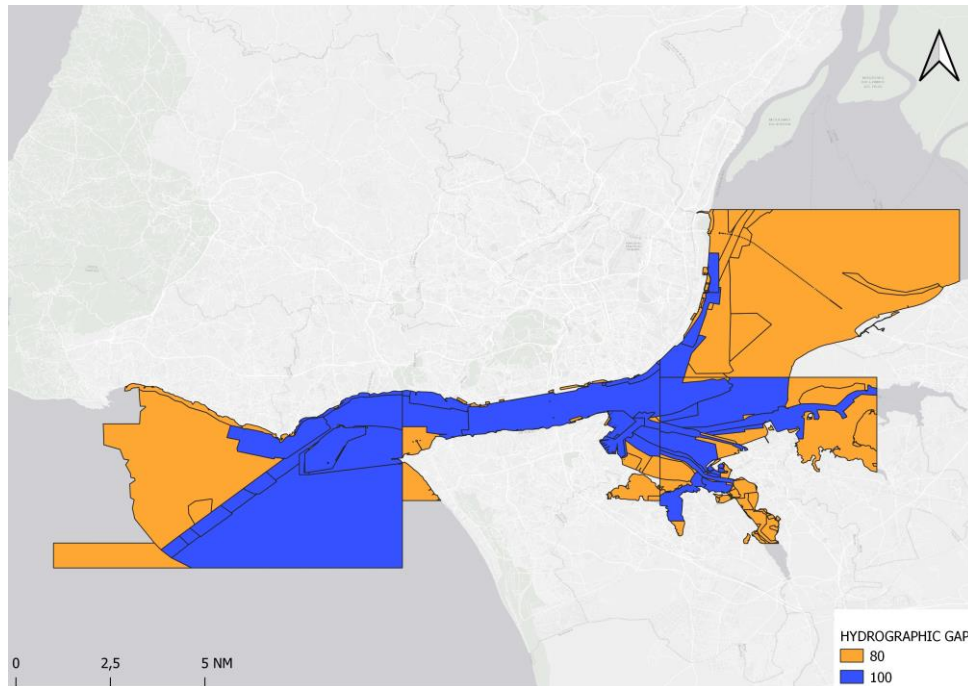


Figura 30 - Valores obtidos de DSS

Já com os valores do PSS e do DSS, foi feita uma subtração, de acordo com a equação 2, onde foram obtidos os seguintes resultados, que serão analisados no capítulo seguinte.

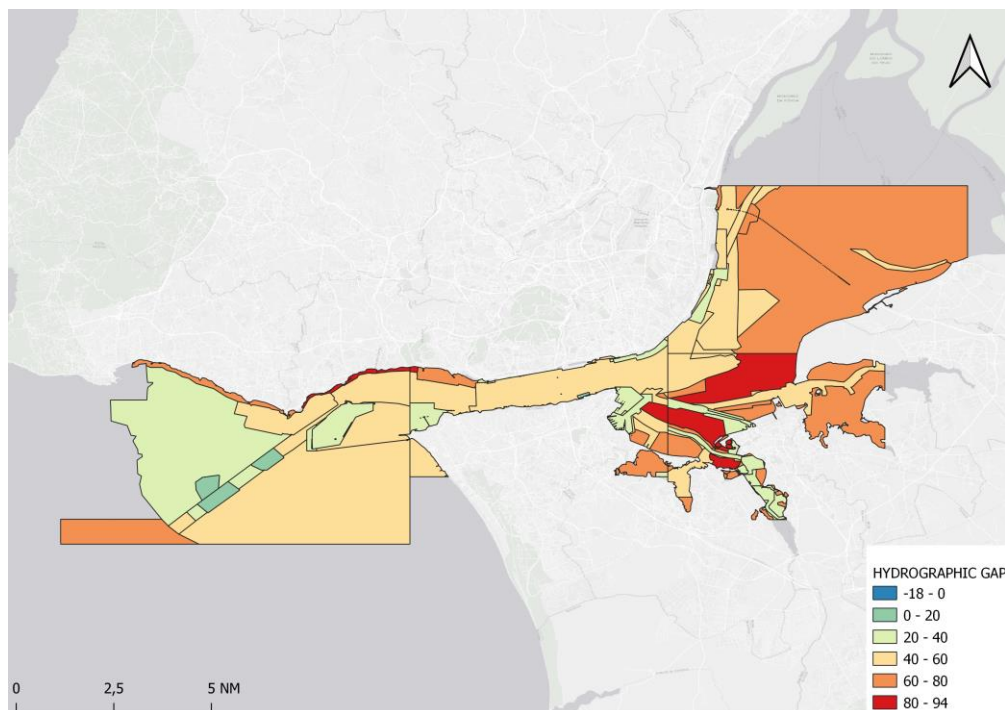


Figura 31 - Hydrographic Gap



5. Análise dos Resultados

Neste capítulo foi realizada uma análise de todos os dados recolhidos nos capítulos anteriores. Esta está estruturada pela ordem dos capítulos, de forma a complementar os dados obtidos com as bases de dados inicialmente analisadas.

No início desta dissertação, procedeu-se à obtenção dos dados de estudo, obtendo assim bases de dados não tratadas. Foi assim necessário fazer uma pré-análise, de forma a entender quais as bases de dados que necessitavam de tratamento. Assim sendo, foi revelado que a única base de dados que apresentava dados anómalos era a base de dados AIS, vital para esta dissertação, pois foi com estes valores que se obteve o DSS.

Desta base de dados foram retiradas figuras que retratam as zonas críticas no Porto de Lisboa, conseguindo assim visualizar as zonas mais críticas em relação à densidade de navegação, bem como descobrir quais as zonas onde os navios passam com menor resguardo ao fundo.

Analisando o mapa de densidades retratado na figura 18, tornou-se claro que a grande parte da navegação no estuário do rio Tejo é composto por ferries, cujas travessias são realizadas entre 50 a 60 vezes, por dia. Estes ferries, como também é possível verificar pela figura, saem dos canais estipulados, navegando em zonas menos profundas e menos sondadas, o que aumenta a probabilidade de acidentes, colocando assim vidas em risco.

Após a remoção dos ferries do mapa de densidade, foi possível visualizar as zonas onde a navegação “normal” se apresenta mais densa. Deste, retirou-se zonas com grande densidade como o terminal de contentores de Alcântara, devido não só a ser o terminal comercial mais utilizado, como pela sua posição central no estuário, sendo que toda a navegação que ocorre a montante deste, tem de passar por lá. A doca de Pedrouços e a Doca do Bom Sucesso, localizadas entre o parque marítimo de Algés e Belém, apresenta o maior valor de densidade devido a serem próximas dos



dois monumentos mais apelativos localizados no rio Tejo, a Torre de Belém e o Padrão dos Descobrimentos.

Ainda da base de dados AIS é possível retirar a informação dos locais onde os navios passam mais vezes com um menor resguardo ao fundo. Pode assim ser retirada a informação, da figura 18, de quais as zonas onde os navios passaram com menor resguardo ao fundo, no mês de abril de 2022. Estas zonas estão, na sua maioria, localizadas nos canais a sul do Mar da Palha, nomeadamente no canal do Barreiro e do Montijo, e próximo da costa da margem norte do rio. Isto deve-se aos ferries que, devido aos atalhos que utilizam, passam os limites estipulados dos canais, com o objetivo de utilizar o caminho mais curto, de forma a chegar ao destino mais rápido. Na segunda zona, a margem norte, é possível retirar duas possibilidades que levam ao resguardo reduzido ao fundo. Os navios turísticos que se aproximam de costa para ver os monumentos de perto ou então a escolha do caminho mais curto, por parte dos navios.

A determinação do declive do fundo teve como objetivo a análise dos locais onde a profundidade se altera mais rapidamente. Após a criação da figura 21, foi possível analisar que o rio apresenta valores elevados de declive apenas na costa da margem sul, sendo o restante fundo bastante plano, exceto a zona do bugio, que apresenta zonas com cerca de 15 graus de inclinação.

Na análise AIS foi possível visualizar que existem alguns navios que se aproximam da zona norte da golada do Bugio, sendo este um fator que é agravado pela inclinação do fundo, pois o navio, se apenas estiver com atenção ao valor fornecido pela sonda, pode não esperar uma alteração tão brusca de profundidade.

Para determinar o coeficiente de decaimento foi necessário analisar todos os levantamentos realizados pelo IH na Barra Sul e no Cachopo Norte desde o ano de 2018, de forma a determinar quais os levantamentos que iriam ser utilizados para calcular a evolução batimétrica, e assim estimar um valor capaz de substituir o coeficiente de decaimento utilizado no cálculo do *Hydrographic Gap*.



Após análise, foi decidido que os levantamentos realizados no Cachopo Norte não iam de acordo com os objetivos, pois foram obtidos por feixe simples, o que não apresenta valores de alta confiabilidade, fora das fiadas de sondagem. Os levantamentos realizados na Barra Sul eram regulares o suficiente, permitindo assim o cálculo do coeficiente. Porém, visto este ser um canal que costuma ser frequentemente dragado, não apresenta 100% de confiança. Foi assim escolhido utilizar a zona mais a norte para a determinação da alteração do fundo, obtendo assim valores o mais fidedignos possível. Foram criadas várias camadas diferentes, de forma a quantificar as alterações anuais de três áreas distintas, sendo que apenas uma tinha o objetivo de determinação do coeficiente. As restantes áreas serviram apenas como informação adicional, possibilitando também quantificar as alterações nas zonas dragadas e nas proximidades.

Os valores considerados aplicáveis foram os da zona norte, onde mostrava uma ligeira diminuição de profundidade. Retirando a média das camadas de diferenças criadas, foi possível quantificar que esta zona apresentava uma diminuição de profundidade de 4 centímetros anuais. Entrando com estes valores na equação do HHM, foi possível determinar quantos anos uma CATZOC A ou B demoram para decair a confiança e tornarem-se numa CATZOC B ou C, respetivamente. Foi assim identificado que uma CATZOC A demora aproximadamente 8 anos a tornar-se numa CATZOC B, e uma CATZOC B demora aproximadamente 24 anos a tornar-se numa CATZOC C. Estes valores estão perto dos valores obtidos pela NOAA, sendo que eles utilizam valores de correntes e de furacões, de forma a estimar alterações no fundo, e esta dissertação utiliza medições de LHs sucessivos na mesma área.

Da diferença entre os valores de ISS da figura 27 e dos valores de PSS da figura 29, conseguimos identificar a falta de manutenção de levantamentos existente. O canal de navegação do porto de Lisboa, quando sondado pela última vez aparentava-se com um *score* de 110 (CATZOC A1), sendo que segundo o coeficiente de decaimento calculado, apresenta-se com um *score* de 50 (CATZOC B, quase C). Podemos também visualizar que as zonas a montante do rio estão lentamente a aproximar-se de um

score de 0, o que equivale a zonas não sondadas, sendo que o score mais baixo encontrado é um 6.

Foi assim iniciado o último método de análise, o cálculo do *Hydrographic Gap*. Para concluir este objetivo foram adicionados à camada das CATZOC os dados recolhidos anteriormente.

Após o trabalho referido no capítulo 4.6, foi possível a criação da tabela 9 e da figura 32, que demonstra a diferença entre as necessidades de levantamentos e os levantamentos atualmente em uso nas CATZOC em vigor.

Tabela 9 - Áreas referentes ao *Hydrographic Gap*

Hydrographic Gap	M^2	Nm^2	Percentagem
>0	2 580 590	0,75	0,0079 %
0 - 20	3 200 933	0,93	0,0098 %
20 - 40	81 138 865	23,63	24,9 %
40 - 60	109 804 426	31,97	33,75 %
60 - 80	112 734 865	32,83	34,66 %
80 - 94	15 831 060	4,61	4,86 %

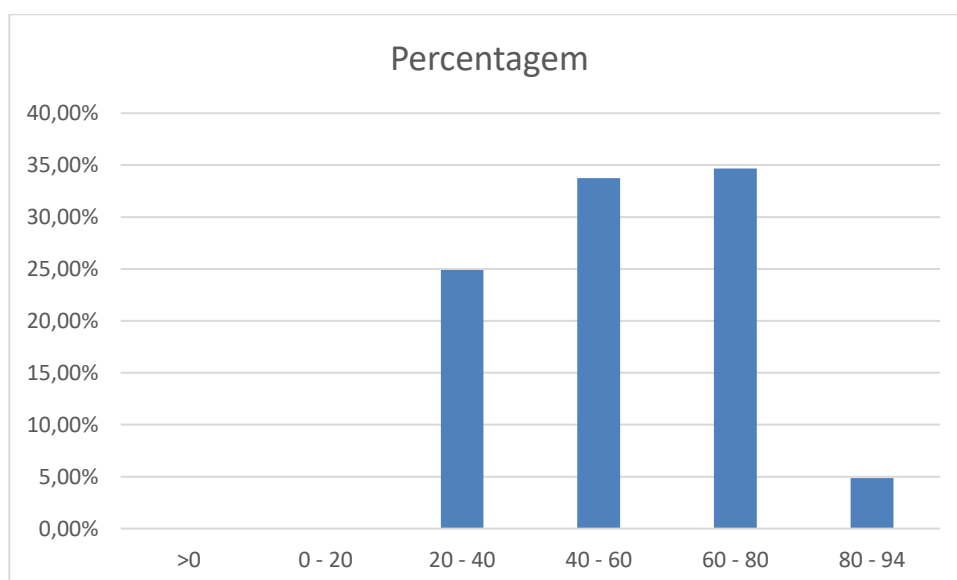


Figura 32 - Gráfico com Percentagens referentes ao *Hydrographic Gap*



Quanto maior o *Hydrographic Gap*, pior, assim sendo podemos visualizar que apenas uma pequena percentagem do estuário se apresenta com os levantamentos “em dia”, sendo que a maior parte dos levantamentos encontram-se desatualizados, diminuindo assim o nível de confiança nestes locais.

Esta diferença, carece de uma análise crítica da mesma, pois esta equação não prevê falhas humanas. Esta observação torna-se relevante dado o hábito dos navios arriscarem a segurança ao optarem por rotas mais curtas, preferindo navegar em áreas onde a última sondagem foi feita há mais de vinte anos, ao invés de utilizarem os canais de navegação destinados a estes trajetos.

Passando às informações referenciadas previamente, para as bases de dados analisadas no capítulo 3.2, é possível acrescentar algumas conclusões.

Analisando os levantamentos realizados pelo IH e as informações retiradas da camada das CATZOC é possível visualizar que uma grande parte de levantamentos realizados pelo IH não estão refletidos nas CATZOC. Por exemplo, os levantamentos que são realizados anualmente ou até bianualmente na Barra Sul, não estão a ser atualizados nas CEN, existindo zonas que apresentam levantamentos com 11 anos. Podemos assim concluir que não existe uma atualização das CATZOC nas CEN, de acordo com os levantamentos realizados.

Para além destas, existem diferenças nos limites das áreas sondadas e nas áreas das CATZOC, existindo zonas onde os levantamentos não estão a ser totalmente transpostos para as CATZOC.

Por último acho relevante referir que, com base na camada da natureza do fundo, é possível visualizar que os navios que passam com menor resguardo ao fundo apenas o fazem em zonas com o fundo de areia ou lama, sendo que apenas um navio passou com resguardo baixo em fundo de rocha, estando este localizado na barra Norte, junto ao Forte de S. Julião da Barra.



5.1. Análise Crítica

Neste subcapítulo irá ser realizada uma análise crítica das informações recolhidas. Com base nos dados recolhidos foram feitas as seguintes observações:

- Não tendo valores exatos, é possível observar, que a maior parte dos navios presentes no estuário do rio são pequenos veleiros ou até pequenas embarcações de pesca. Assim sendo, estes dados não entraram para a análise AIS, sendo que estes valores poderiam acrescentar dados relevantes.
- A grande parte dos navios que passam com menor resguardo ao fundo apenas o faz com o objetivo de chegar ao destino de forma mais rápida, existindo canais de navegação próprios e mais frequentemente sondados.
- O *Hydrographic Gap* mede diferenças, tendo como base a profundidade e o resguardo ao fundo dos navios, mas como foi referido no ponto anterior, a maior parte das zonas onde o resguardo apresenta valores críticos, deve-se aos navios afastarem-se dos canais de navegação especificados para os trajetos. É assim necessário referir que, apesar de serem zonas onde os navios navegam com menor resguardo, a sondagem destas zonas fica ao critério do IH, devido ao fato de que existem canais devidamente sondados e dragados por onde os navios podem navegar com maior segurança.
- Como foi referido anteriormente, na figura 29 é possível identificar o estado atual das CATZOC, sendo o valor mais baixo um seis. Considerando que o *score* inicial foi 30 (CATZOC C) podemos concluir que a CATZOC se está a aproximar do valor de zero:
- Por último é de referir a disparidade entre os levantamentos realizados pelo IH e as CATZOC em vigor. Penso que uma atualização atempada das CATZOC traria uma maior confiança aos navegantes, sendo este um dos portos mais importantes para o país.

5.2. Recomendações Relativas ao Planeamento

Como é possível ver na figura 31 e na tabela 9, a grande parte do Estuário do Rio Tejo apresenta CATZOCs com um grande *Hydrographic Gap*. Isto significa que zonas que deviam apresentar levantamentos atempados, apresentam levantamentos antigos.

Isto deve-se, em parte, à falta de atualização das CATZOC nas CEN, pois o IH, mesmo tendo em sua posse levantamentos mais recentes, pode não alterar a informação nas CEN devido aos levantamentos não apresentarem diferenças significativas. A falta destas alterações, relativamente à data dos levantamentos pode induzir incerteza e receio aos navegantes. Por este motivo, o IH começou a transpor todos os levantamentos realizados para as CN e CEN, mesmo não existindo diferenças relevantes de batimetria.

Como é possível visualizar no gráfico da figura 23, foi feito uma estimativa com o objetivo de determinar o tempo de vida útil dos levantamentos utilizados na criação das CATZOC. Recomenda-se assim que, de forma a manter as CATZOC eficazes e fiáveis, os levantamentos sejam feitos de acordo com o gráfico obtido. Assim sendo uma CATZOC A deve ser sondada no máximo de 8 em 8 anos, uma CATZOC B deve ser sondada de 24 em 24 anos e uma CATZOC C deve ser sondada de 30 em 30 anos.

Deste modo, foram identificadas as seguintes oportunidades de melhoria no planeamento dos LH no Porto de Lisboa:

- Sondar as zonas a norte do canal do Barreiro e a norte do canal do Montijo, com uma ordem de levantamento superior, de forma a minimizar o risco de encalhe;
- Sondar a costa oeste da margem norte, identificada na figura 31 como tendo um *Hydrographic Gap* de entre 60 a 80, de forma a minimizar o risco de encalhe;
- Dividir a CATZOC a sul da Golada do Bugio em áreas de menor dimensão, sendo que os locais onde foi determinado que os navios



passam com menor resguardo poderiam ser sondadas com maior regularidade.



6. Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros

Este capítulo tem como objetivo a análise do trabalho realizado, bem como os resultados obtidos. Importa também analisar os objetivos propostos para esta dissertação, formas de melhorar este modelo criado e futuros trabalhos que complementem o trabalho realizado.

6.1. Análise do Trabalho Realizado e dos Dados Obtidos

No que diz respeito aos objetivos propostos para esta dissertação, referenciados no subcapítulo 1.3, entende-se que foram todos alcançados com sucesso.

No que diz respeito ao primeiro objetivo específico, “Identificar áreas críticas para a segurança da navegação, utilizando dados AIS para a determinação dos padrões de navegação.” foi alcançado com sucesso no capítulo 3 e 4, sendo este dividido em duas etapas:

- Determinação de padrões de navegação, nomeadamente criação de mapas de densidade e mapas referentes aos locais onde os navios navegam com menor resguardo ao fundo;
- Criação de mapas onde é possível identificar áreas críticas, nomeadamente, mapas referentes à natureza do fundo, onde é possível identificar as zonas de rocha, sendo este o pior tipo de fundo para encalhar. Identificação do declive do estuário do Rio Tejo, onde é possível identificar a costa da Margem Sul e a zona do Farol do Bugio, como as zonas onde o fundo apresenta alterações de profundidade mais súbitas. Por último, a sobreposição dos diversos mapas criados no capítulo 3, permitiu a identificação de zonas onde os levantamentos realizados pelo IH diferem daquilo mostrado nas CATZOC.

O segundo objetivo específico, “Calcular a evolução batimétrica do fundo, de forma a estimar o coeficiente de decaimento.” foi também alcançado com sucesso, no subcapítulo 4.4. Neste, podemos identificar três diferentes áreas na barra Sul, sendo



que a única que foi utilizada para cumprir com este objetivo foi a zona Norte, pois apresenta-se como a zona menos alterada pelas dragagens. Foi assim possível a criação de gráficos que demonstram quantos anos uma CATZOC tem de ter, até perder a sua confiança e passar assim para uma CATZOC de ordem menor.

O terceiro objetivo específico, “Calcular o *Hydrographic Gap*, tendo como referência o modelo *Hydrographic Health* da NOAA.” foi concluído utilizando o trabalho realizado nos dois objetivos anteriores, no subcapítulo 4.6. Neste foi possível visualizar a disparidade existente entre as CATZOC em vigor e as CATZOC ideais.

O último objetivo específico, “Analisar os dados obtidos de forma a recomendar alterações no planeamento de levantamentos hidrográficos.”, foi concluído no capítulo 4 onde, foi feita não só uma análise aos dados obtidos, como também foi realizada uma análise crítica acerca de todas as informações obtidas. Por último, foram feitas recomendações, por forma a manter a confiança nas CATZOC elevada e a planear a frequência de levantamentos com base no decaimento expectável da CATZOC.

Com todos os objetivos específicos alcançados, podemos concluir que o objetivo geral para esta dissertação foi alcançado com sucesso.

6.2. Oportunidades de Melhoria do Modelo

De forma a reforçar o trabalho realizado nesta dissertação foram identificadas as seguintes alterações que poderiam melhorar este modelo:

- Inserção de dados de maré, a complementar os dados AIS;
- Utilização de um modelo batimétrico com resolução superior;
- Cálculo do coeficiente de decaimento em diferentes zonas;
- Implementação do modelo em diferentes portos;
- Dados AIS mais consistentes;
- Dados de natureza do fundo contínuos.



6.3. Trabalho Futuro

De forma a complementar este trabalho, será necessário a execução de uma análise de risco, semelhante àquela utilizada no cálculo do HHM, pois mesmo apesar de se ter identificado algumas zonas críticas, não foi possível quantificar a probabilidade e o risco que estas apresentavam, não sendo assim possível o cálculo do *Hydrographic Health*.

Poderia também ser interessante a criação de um fluxo automático de cálculo que permitisse a ligação às diferentes fontes de dados de forma automática, permitindo o cálculo do *Hydrographic Gap* de forma automática, ficando apenas a faltar uma validação dos dados obtidos, que ficaria ao cargo do IH.



Bibliografia

- Bongiovanni, C. A. (2021). Identifying Future Hydrographic Survey Priorities: A Quantitative Uncertainty Based Approach. *International Hydrographic Review*.
- Chiltern Maritime. (12 de Dezembro de 2022). *Why is the Maritime Industry so Important?* Obtido em 15 de Agosto de 2023, de Chiltern Maritime: <https://www.chilternmaritime.com/why-is-the-maritime-industry-so-important/>
- Chrishan Fonseca, K. H. (Maio de 2017). Latency Effect on the Bathymetry in Single Beam Echo-Sounder System.
- Cuofano, G. (4 de Junho de 2023). *O que é uma análise multicritério? Análise multicritério em poucas palavras*. Obtido em 15 de Agosto de 2023, de FourWeekMba: <https://fourweekmba.com/pt/an%C3%A1lise-multicrit%C3%A9rios/>
- Dhiren Ghosh, A. V. (2012). Outliers: An Evaluation of Methodologies. *Joint statistical meetings*, 12(1).
- Diário da República. (4 de Junho de 2021). Estratégia Nacional para o Mar 2021-2030. *Diário da República*.
- Dias, A. C. (6 de Junho de 2021). Identificação de áreas de risco para a segurança da navegação no porto de Lisboa, para priorização e planeamento de levantamentos hidrográficos.
- General Bathymetric Chart of the Oceans. (2020). *Nippon Foundation-GEBCO Seabed2030 project*. Obtido em 15 de Agosto de 2023, de https://www.gebco.net/about_us/seabed2030_project/
- IH. (11 de Abril de 2023). *Zero Hidrográfico*. Obtido em 15 de Agosto de 2023, de Hidrografico: [hidrografico.pt](https://www.hidrografico.pt)
- IMO. (2 de Dezembro de 2015). Resolution A.1106(29). *Revised Guidelines For The Onboard Operational Use Of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS)*.
- IMO. (2 de Dezembro de 2015). Revised Guidelines For The Onboard Operational Use Of Shipborne Automatic Identification Systems. *Resolution A.1106 (29)*.
- Instituto Hidrográfico. (27 de Março de 2018). Levantamentos Hidrográficos.
- Instituto Hidrográfico. (09 de 08 de 2019). Obtido em 15 de Agosto de 2023, de Hidrografico: <https://www.hidrografico.pt/op/26>
- Instituto Hidrográfico. (10 de Novembro de 2020). *SEAMAP 2030*. Obtido em 15 de Agosto de 2023, de <https://storymaps.arcgis.com/stories/a89f03d8072741dc9a00f9123feb6356>
- International Hydrographic Bureau. (Maio de 2005). Manual On Hydrography. C-13.
- Marine Traffic. (15 de Agosto de 2023). *Live Map*. Obtido em 15 de Agosto de 2023, de Marine Traffic: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home>



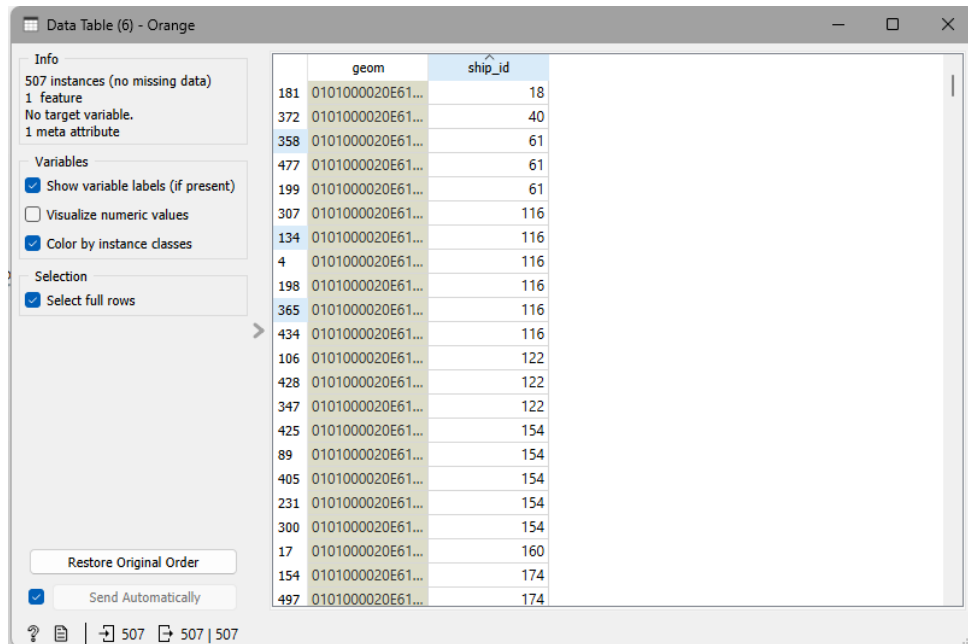
- Marine Traffic. (2023). *Vessels Database*. Obtido em 03 de Maio de 2023, de Marine Traffic: https://www.marinetraffic.com/en/data/?asset_type=vessels&columns=flag,shipname,photo,recognized_next_port,reported_eta,reported_destination,current_port,imo,msi,ship_type,show_on_live_map,time_of_latest_position,lat_of_latest_position,lon_of_latest_posi
- Meirinho, A. G. (14 de Maio de 2021). O Encalhe do Navio Ever Given e a Vulnerabilidade do Trabalhador Marítimo no Contexto da Responsabilização pelo Acidente. Uma Leitura Crítica. *Revista De Direito E Negócios Internacionais Da Maritime Law Academy - International Law and Business Review*, 1(1), pp. 30–51.
- NOAA. (2016). A Risk-Based Approach to Determine Hydrographic Survey Priorities using GIS.
- NOAA. (20 de Janeiro de 2023). *What is a nautical chart?* Obtido em 15 de Agosto de 2023, de National Ocean Service: https://oceanservice.noaa.gov/facts/nautical_chart.html
- OHI. (2020). Mariners Guide to Accuracy of Depth Information in CEN.
- OHI. (Outubro de 2020). Norma S-67. *Mariners Guide to Accuracy of Depth Information in ENC*.
- OHI. (Outubro de 2022). Especificações para Levantamentos Hidrográficos. *Norma OHI S-44*.
- OHI. (19 de Junho de 2023). Hydrographic Dictionary. S-32.
- OHI. (s.d.). S-57. Obtido em 15 de Agosto de 2023, de S-57: <http://www.s-57.com/>
- Ojala, J. &. (30 de Outubro de 2017). Maritime trade and merchant shipping: The shipping/trade ratio since the 1870s. *International Journal of Maritime History*, 29(4), pp. 838–854.
- P. A. Lessing, C. B. (01 de Setembro de 2006). Use of the Automatic Identification System (AIS) on Autonomous Weather Buoys for Maritime Domain Awareness Applications. *OCEANS 2006*, pp. 1-6.
- Santos, R., Aurora, R., & Quartau, R. (21 de Março de 2018). Acoustic remote characterization of seabed sediments using the Angular Range Analysis technique: The inlet channel of Tagus River estuary. *Marine Geology*, pp. 60-75.
- Sousa, M. N. (2018). Data mining for anomaly detection in maritime traffic data. *Dissertação de Mestrado em Ciências Militares Navais, Classe de Marinha*.
- Sulemane, Y. A. (2015). Ferramentas para a Análise dos Padrões de Tráfego da Barra Sul do Porto de Lisboa. *Dissertação de Mestrado em Ciências Militares Navais, Classe de Marinha*.
- Terminais Portuários e Logística. (2019). Estatística 2019.



Yang, L. (1 de Fevereiro de 2023). *Raster Volume Comparison*. Obtido em 13 de Julho de 2023,
de QGIS Python Plugins Repository:
https://plugins.qgis.org/plugins/raster_volume_compare/



Apêndice A – Funções Utilizadas no Capítulo 3



	geom	ship_id
181	0101000020E61...	18
372	0101000020E61...	40
358	0101000020E61...	61
477	0101000020E61...	61
199	0101000020E61...	61
307	0101000020E61...	116
134	0101000020E61...	116
4	0101000020E61...	116
198	0101000020E61...	116
365	0101000020E61...	116
434	0101000020E61...	116
106	0101000020E61...	122
428	0101000020E61...	122
347	0101000020E61...	122
425	0101000020E61...	154
89	0101000020E61...	154
405	0101000020E61...	154
231	0101000020E61...	154
300	0101000020E61...	154
17	0101000020E61...	160
154	0101000020E61...	174
497	0101000020E61...	174

Figura 33 - Resultado do modelo utilizado para determinar o mês com maior número de navios

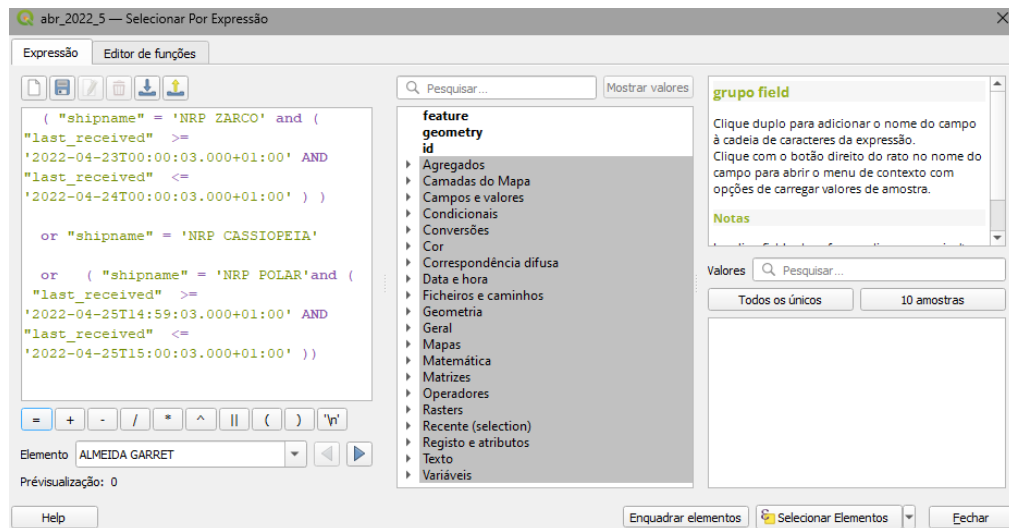


Figura 34 - Remoção de outliers

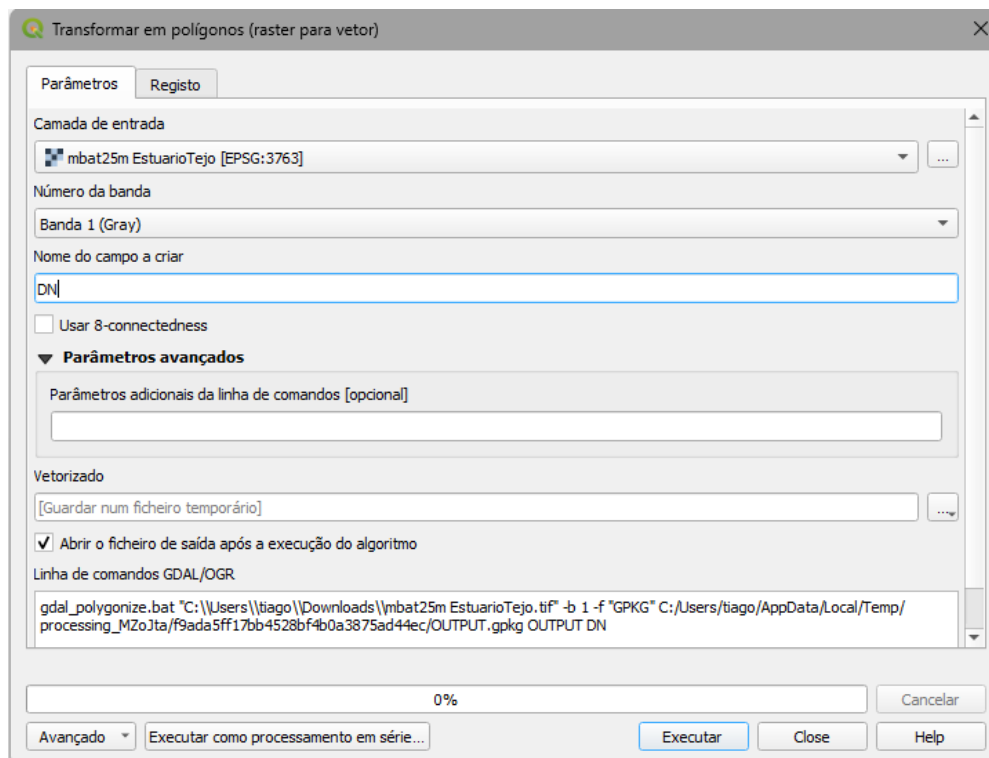


Figura 35 - Transformação do modelo batimétrico de raster para vetorizado

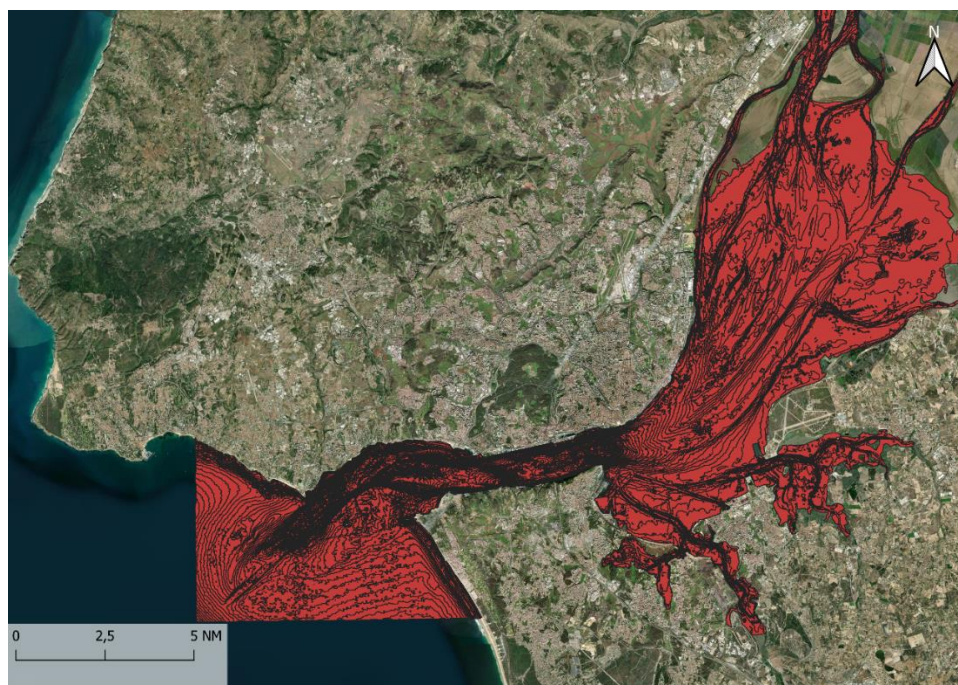


Figura 36 - Modelo batimétrico vetorizado

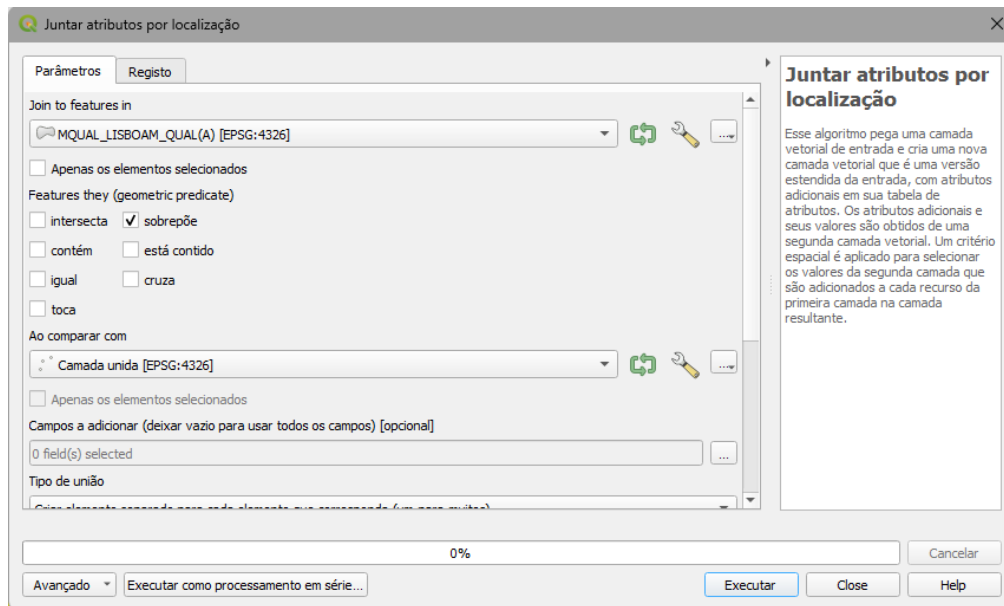


Figura 37 - Atribuição do valor de profundidade aos navios

Apêndice B - Funções Utilizadas no Capítulo 4 e Mapas Resultantes

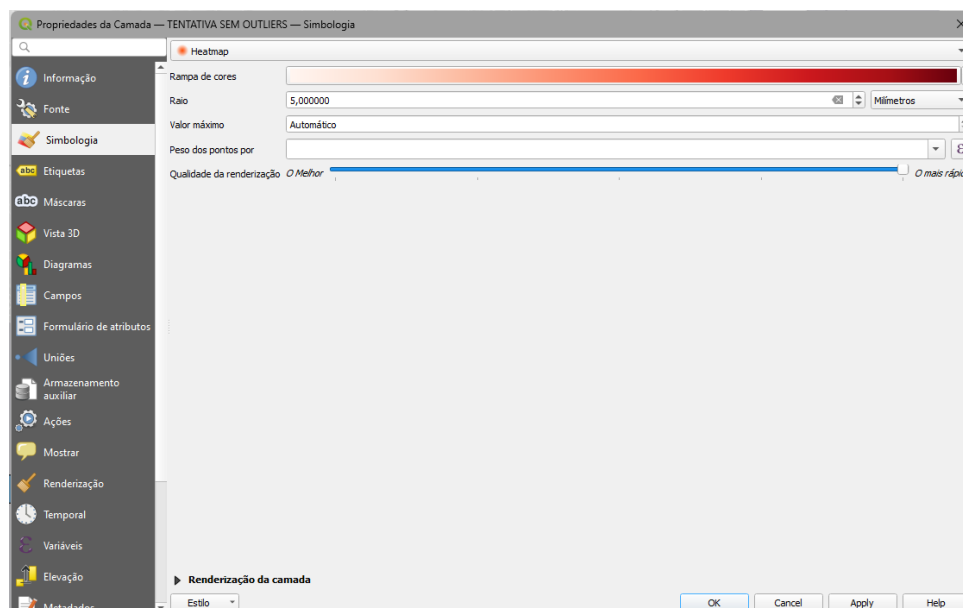


Figura 38 - Função utilizada para a criação do mapa de densidades

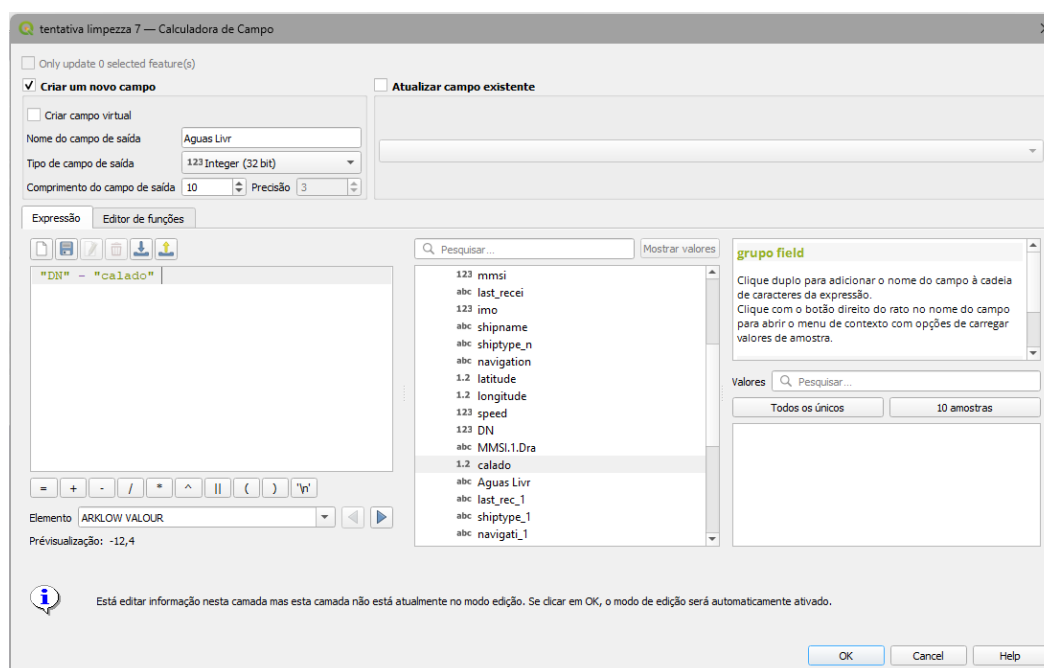


Figura 39 - Criação do campo "Águas Livres" para determinação do resguardo ao fundo

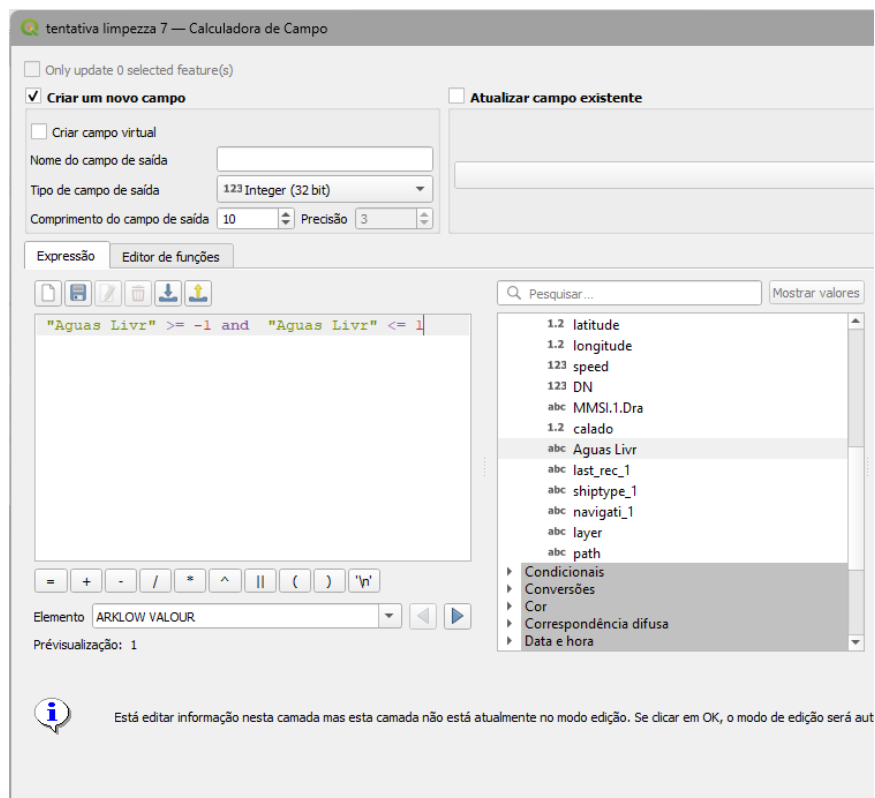


Figura 40 - Seleção das posições onde o resguardo se encontra entre -1 e 1

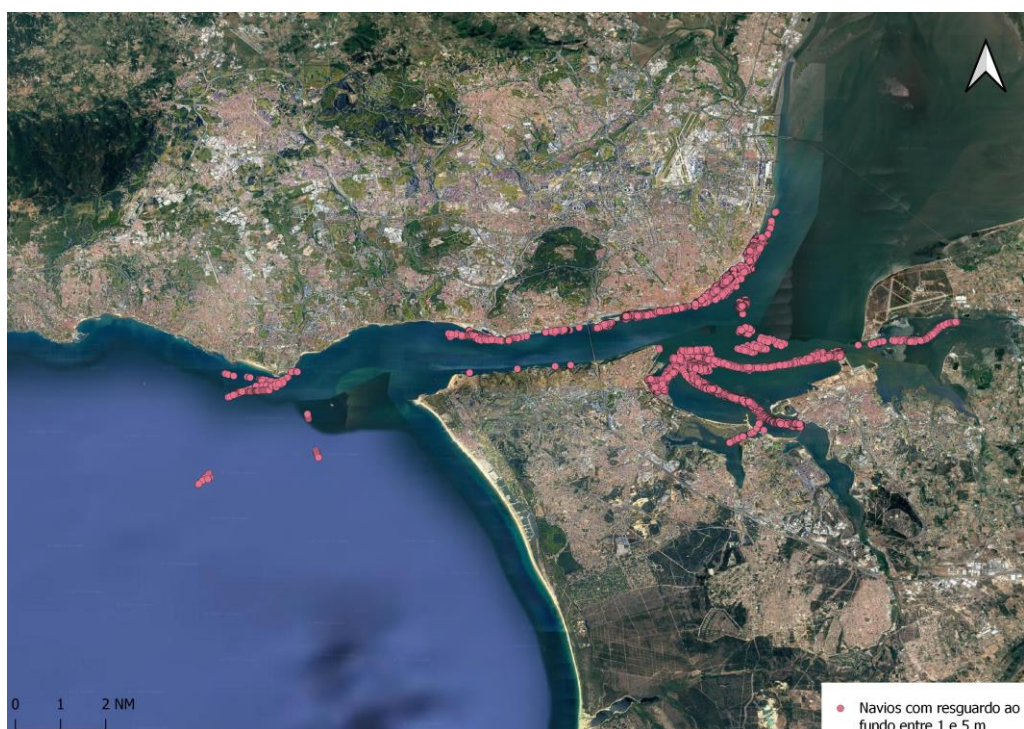


Figura 41 - Navios com resguardo entre 1 e 5 metros

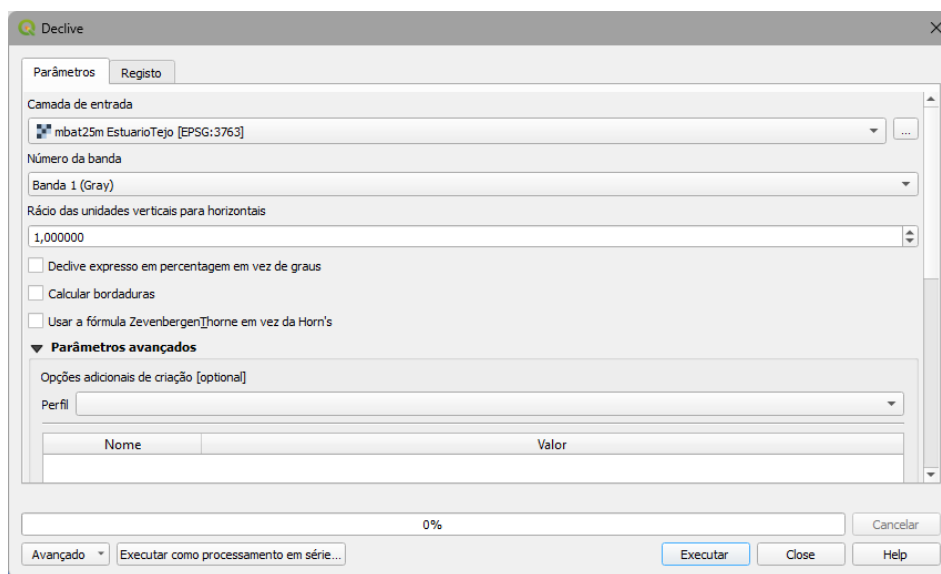


Figura 42 - Função utilizada para calcular o declive do fundo

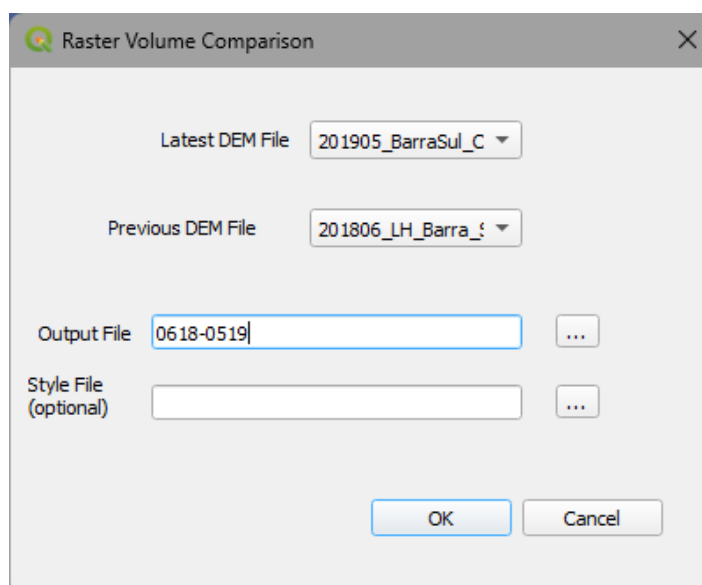


Figura 43 - Função "Raster Volume Calculator" (Yang, 2023) utilizada para medir a diferença de batimetria entre dois levantamentos

ZONA\ANO	2018-2022	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022
Camada completa	0,690	0,575	0,448	0,399	0,448
Zona Norte	1,190	0,956	1,164	1,171	1,186
Zona Sul	0,023	0,019	0,028	0,032	0,027
Canal dragado	0,209	0,462	0,396	0,284	0,247

Tabela 10 - Desvio padrão das camadas relativas à diferença entre dois levantamentos

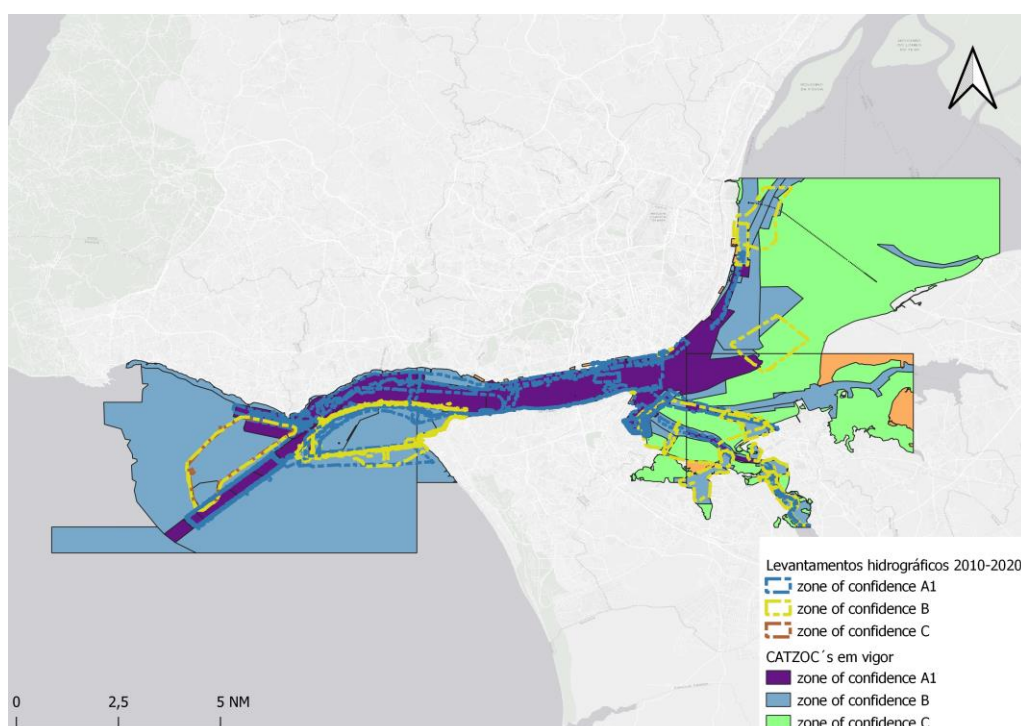


Figura 44 - Sobreposição dos levantamentos realizados entre 2010 e 2020 e CATZOC em vigor

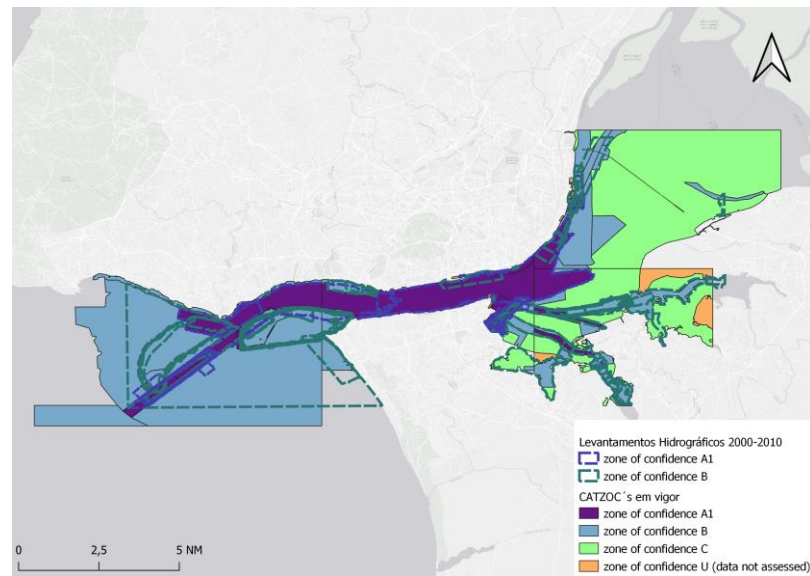


Figura 45 - Sobreposição dos levantamentos realizados entre 2000 e 2010 e CATZOC em vigor

Anexo A

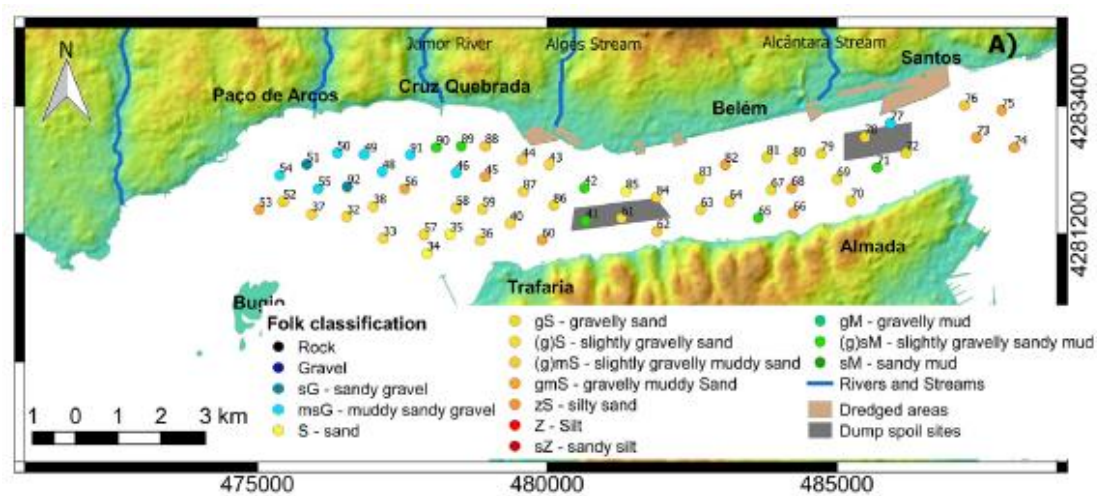


Figura 46 - Tipo de fundo (retirado de (Santos , Aurora , & Quartau, 2018))