

MESTRADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

Avaliação da concentração de clorofila na costa portuguesa a partir de dados Sentinel-3 OLCI com foco na qualidade da água para aquicultura

Eduardo Matias Calvo

2024/2025



Eduardo Matias Calvo

Avaliação da concentração de clorofila na costa portuguesa a partir de dados Sentinel-3 OLCI com foco na qualidade da água para aquicultura

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em
Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território
orientada pelo Professor Doutor Alberto Gomes e
coorientada pelo Mestre Telmo Geraldês Dias

Faculdade de Letras da Universidade do Porto

2024/2025



Este trabalho está licenciado ao abrigo de uma licença CC BY 4.0

À minha família, que é sempre o meu porto seguro.

Sumário

Declaração de honra / <i>Declaration of Honour</i>	7
Agradecimentos	8
Resumo	9
Abstract	10
Índice de Figuras	11
Índice de Tabelas (ou Quadros)	13
Índice de Gráficos	14
Lista de abreviaturas e siglas	17
1.Introdução	20
1.1. Objetivos do Trabalho	21
1.2. Estrutura da Dissertação	22
2.Revisão Conceptual.....	24
2.1. Importância da Clorofila.....	24
2.1.1. Clorofila-a	24
2.2. Medição da Clorofila por Detecção Remota.....	26
2.2.1. Plataformas	26
2.2.2. Objetos	27
2.2.3. Sensores	28
2.2.4. Imagens	30
2.2.5. Início da Detecção Remota para o Estudo dos Oceanos.....	31
2.2.6. Constelação Satélites Sentinel-3	34
2.2.7. Características do Sentinel-3 OLCI	36
2.3. Processador C2RCC	39
2.4. Águas da Terra	43
2.4.1. Propriedades Óticas Aparentes.....	44
2.4.2. As Propriedades Óticas Inerentes	44
2.4.3. Tipos de Água	46
2.4.4. Águas Caso 1 e Caso 2	46
2.5. Dados <i>In Situ</i>	48
3.Dados Amostrais e Área de Estudo.....	51
3.1. Área de Estudo	51

3.2. Dados <i>In Situ</i>	52
3.3. Dados de Satélite	54
4. Materiais e Métodos	56
4.1. Análise Estatística	56
4.2. Metodologia	64
5. Resultados	69
5.1. Mapas Temáticos — Valores <i>In Situ</i>	69
5.2. Mapas Temáticos — Valores Extraídos das Imagens	74
5.3. Mapas Temáticos — Valores <i>In Situ</i> versus Valores Obtidos por Imagem	80
6. Discussão	86
6.1. Análise dos Gráficos de Dispersão, Diagramas de Caixa, Classes das Legendas dos Mapas <i>In Situ</i> e Imagens	87
6.1.1. Discussão dos Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área A	87
6.1.2. Discussão dos Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área E	92
6.2. Discussão dos Resultados face aos Objetivos do Trabalho	97
7. Conclusões	100
8. Anexos	114
8.1. Informação Complementar Sobre os Resultados	114
8.1.1. Fatores que Podem Contribuir para a Limitação Estatística	114
8.2. Tabelas dos Parâmetros de Processamento do Processador C2RCC de Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores <i>In Situ</i>	116
8.2.1. Tabelas dos Valores Médios Globais de Salinidade e Temperatura Utilizados como Parâmetros de Entrada no Processador C2RCC — Área A	117
8.2.2. Tabelas dos Valores Médios Globais de Salinidade e Temperatura Utilizados como Parâmetros de Entrada no Processador C2RCC — Área E	118
8.2.3. Tabela de Comparação das Legendas dos Mapas dos Valores Clo-a <i>In Situ</i> e Imagens	119
8.2.4. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores <i>In Situ</i> — Área A	122
8.2.5. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores <i>In Situ</i> — Área E	124
8.3. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores das Imagens	126
8.3.1. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a partir de Valores das Imagens — Área A	126

8.3.2. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores das Imagens — Área E	128
8.4. Histogramas de Pareto após Amostragem de Valores Raster	131
8.4.1. Histogramas de Pareto das Imagens de Clorofila-a e Comparação <i>In Situ</i> — Área A	131
8.4.2. Histogramas de Pareto das Imagens de Clorofila-a e Comparação <i>In Situ</i> — Área E	135
8.5. Gráficos de Dispersão e Diagramas de Caixa	138
8.5.1. Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área A, 1ª Temporada/Campanha	139
8.5.2. Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área A, 2ª Temporada/Campanha	140
8.5.3. Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área A, 3ª Temporada/Campanha	141
8.5.4. Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área A, 4ª Temporada/Campanha	142
8.5.5. Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área E, 1ª Temporada/Campanha	143
8.5.6. Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área E, 2ª Temporada/Campanha	144
8.5.7. Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área E, 3ª Temporada/Campanha	145
8.5.8. Valores <i>In Situ</i> versus Valores da Imagem — Área E, 4ª Temporada/Campanha	146
9. Apêndices	147
9.1. Fluxo de trabalho: do SNAP ao CSV com NetCDF-4 e script Python Desenvolvido para Extração dos Dados.....	147
9.1.1. Exportação da Banda de Clo-a para Formato NetCDF-4	147
9.1.2. Script de Conversão NetCDF para CSV (Python)	148
9.1.3. Matriz CSV e importação dos dados para ambiente SIG em WGS 84	149
9.2. Elaboração do Gráfico de Pareto para Comparação entre as Concentrações de Clorofila-a Obtidas por Imagem e por Dados <i>In Situ</i> (Clo_a)	151
9.2.1. Passos para a Construção do Gráfico Combinado com Linha de Pareto	152

Declaração de honra / *Declaration of Honour*

Declaro que a presente dissertação é de minha autoria e não foi utilizado previamente noutro curso ou unidade curricular, desta ou de outra instituição. As referências a outros autores (afirmações, ideias, pensamentos) respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, e encontram-se devidamente indicadas no texto e nas referências bibliográficas, de acordo com as normas de referência. Tenho consciência de que a prática de plágio e auto-plágio constitui um ilícito académico.

I hereby declare that this dissertation is of my authorship and has not been used previously in another course, degree, curricular unit or subject, at this or any other institution. References to other authors (statements, ideas, thoughts) scrupulously respect the rules of attribution and are duly indicated in the text and bibliographical references, in accordance with the rules of referencing. I am aware that the practice of plagiarism and self-plagiarism is an academic offence.

Gondomar, setembro 2025

Eduardo Matias Calvo

Agradecimentos

A concretização do presente trabalho de dissertação apenas foi possível graças ao contributo inestimável de diversas pessoas e instituições, às quais cumpre expressar o mais profundo reconhecimento.

Em primeiro lugar, dirijo um agradecimento especial ao Professor Doutor Alberto Gomes, meu orientador, pela orientação científica rigorosa, pela permanente disponibilidade, pela clareza das sugestões metodológicas e pela confiança depositada ao longo de todo o percurso académico. A sua orientação foi determinante para a qualidade e solidez deste estudo.

Ao Capitão-de-Fragata e Mestre Telmo Geraldês Dias, meu coorientador, camarada e representante da instituição que me facultou os dados que sustentaram a investigação aqui apresentada, manifesto o meu sincero agradecimento, não apenas pela orientação e pelos conselhos, mas também pela partilha generosa de conhecimentos e pela pronta disponibilidade sempre demonstrada.

Agradeço igualmente ao Instituto Hidrográfico Português, pelo apoio logístico e pela cedência dos dados que alicerçaram esta investigação. O acesso aos recursos disponibilizados revelou-se essencial para o desenvolvimento do trabalho, permitindo-me adquirir e aprofundar conhecimentos relevantes no domínio dos Sistemas de Informação Geográfica.

Aos camaradas e amigos que, com espírito de entreajuda, partilharam saberes, ofereceram comentários construtivos ou, simplesmente, manifestaram palavras de incentivo nos momentos mais exigentes, deixo o meu reconhecimento e apreço.

Dirijo um agradecimento sincero à minha família, cujo apoio incondicional, compreensão e estímulo constante constituíram uma base sólida ao longo de todo este processo. À minha mulher, Conceição, e aos meus filhos, Eduardo Filipe e Sara Alexandra, expresso a minha eterna gratidão pelo encorajamento e pela presença inabalável.

A todos quantos, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta dissertação, apresento os meus mais respeitosos agradecimentos.

Resumo

A clorofila-a (Clo-a) é o principal pigmento fotossintético presente no fitoplâncton e constitui, um indicador fundamental do estado trófico dos ecossistemas marinhos. Na União Europeia, a sua monitorização é obrigatória ao abrigo da Diretiva-Quadro da Água (2000/60/CE) e da Diretiva-Quadro Estratégia Marinha (2008/56/CE). Embora a medição tradicional, através de amostragens *In Situ* e fluorómetros, assegure fiabilidade, apresenta custos operacionais elevados e limitações logísticas. Neste contexto, a deteção remota por satélite surge como uma alternativa viável e eficaz.

Este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do algoritmo Case 2 Regional Coast Color (C2RCC) na estimativa da concentração de Clo-a em zonas costeiras da costa atlântica portuguesa, designadamente entre Caminha e a Foz do Douro (Norte) e entre Sagres e Tavira (Algarve). Para tal, foram utilizados dados multiespetrais do sensor Ocean Land Color Instruments (OLCI), a bordo do satélite Sentinel-3 (programa Copernicus/ Agência Espacial Europeia - ESA), processados no software Sentinel Application Platform (SNAP) e convertidos para comma separated values (CSV) com um script Python a partir de ficheiros network common data form NetCDF-4. Os valores estimados foram comparados com dados *In Situ* recolhidos durante quatro campanhas oceanográficas (Out.2018, Mai.2019, Out.2019 e Mar.2020), no âmbito do projeto Aquimar.

A análise estatística envolveu o cálculo de coeficientes de correlação de Pearson, coeficientes de determinação (R^2), e erros absolutos e relativos. Os resultados revelaram um desempenho global satisfatório do algoritmo, com melhor correspondência nas 1.ª e 3.ª campanhas. Cerca de 80% dos valores estimados mantiveram-se dentro dos limites bioópticos definidos para águas oceânicas.

Conclui-se que o algoritmo C2RCC representa uma ferramenta promissora para a monitorização preliminar da qualidade da água em zonas costeiras, recomendando-se a sua comparação em futuros estudos, especialmente com a missão da National Aeronautics and Space Administration NASA «Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem (PACE)», que visa a monitorização sobre a ecologia marinha e a cor dos oceanos.

Palavras-chave: clorofila-a, C2RCC, Sentinel-3, deteção remota, qualidade da água.

Abstract

Chlorophyll-a (Chl-a) is the main photosynthetic pigment present in phytoplankton and a key indicator of the trophic state of marine ecosystems. In the European Union, its monitoring is mandatory under the Water Framework Directive (2000/60/EC) and the Marine Strategy Framework Directive (2008/56/EC). Although traditional measurement methods—based on *In Situ* sampling and fluorometers—are reliable, they are costly and logistically demanding. In this context, satellite-based remote sensing emerges as a viable and effective alternative for large-scale estimation of Chl-a.

This study aimed to assess the applicability of the case 2 regional coast color C2RCC algorithm in estimating chlorophyll-a concentration along the Portuguese Atlantic coast, particularly between Caminha and the Douro River mouth (North), and between Sagres and Tavira (Algarve). Multispectral data from the ocean land color instruments OLCI sensor aboard the Sentinel-3 satellite (Copernicus/European Space Agency-ESA programme) were used. These data were processed using Sentinel Application Platform (SNAP) software and converted to comma separated values (CSV) via a custom Python script from network common data form NetCDF-4 files. The estimated values were then compared with *In Situ* data collected during four oceanographic campaigns (Oct.2018, May.2019, Oct.2019, and Mar.2020), carried out within the Aquimar project.

The statistical analysis included Pearson correlation coefficients, coefficients of determination (R^2), and absolute and relative errors. The results indicated an overall satisfactory performance of the algorithm, with stronger agreement observed in the 1st and 3rd campaigns. Approximately 80% of the estimated values fell within the bio-optical limits defined for oceanic waters.

It can be concluded that the C2RCC algorithm represents a promising tool for the preliminary monitoring of water quality in coastal areas, and its comparison in future studies is recommended, particularly with National Aeronautics and Space Administration NASA's Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem (PACE) mission, which is dedicated to monitoring marine ecology and ocean colour

Key-words: chlorophyll-a, C2RCC, Sentinel-3, remote sensing, water quality.

Índice de Figuras

FIGURA 1 - REDE DE SATÉLITES;.....	27
FIGURA 2- ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO;.....	29
FIGURA 3 - SENSORES ATIVOS.....	29
FIGURA 4 - SATÉLITE ENVISAT;	33
FIGURA 5 - SENTINEL-3;	34
FIGURA 6 - VISÃO ESQUEMÁTICA DO CAMPO DE VISÃO DO OLCI;	36
FIGURA 7 - ESQUEMA VISUAL DO ALGORITMO C2RCC	42
FIGURA 8 - FATORES QUE AFETAM A LUZ ASCENDENTE QUE SAI DA SUPERFÍCIE DO MAR: Y - YELLOW SUBSTANCE (OR CDOM);	45
FIGURA 9 - PROGRAMAS GLOBAIS COMO O EURO ARGOS;.....	50
FIGURA 10 - ÁREA DE ESTUDO	52
FIGURA 11 - FLUXO DE TRABALHO SEGUIDO NA METODOLOGIA	64
FIGURA 12 - RESULTADOS DA PRIMEIRA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IN SITU; B)	70
FIGURA 13 - RESULTADOS DA SEGUNDA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IN SITU; B)	70
FIGURA 14 - RESULTADOS DA TERCEIRA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IN SITU; B).....	70
FIGURA 15 - RESULTADOS DA QUARTA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IN SITU; B)	70
FIGURA 16 - RESULTADOS DA PRIMEIRA CAMPANHA, ÁREA E: A)VALORES IN SITU; B) HISTOGRAMA DOS VALORES REGISTRADOS	72
FIGURA 17 - RESULTADOS DA SEGUNDA CAMPANHA, ÁREA E: A)VALORES IN SITU; B) HISTOGRAMA DOS VALORES REGISTRADOS	72
FIGURA 18 - RESULTADOS DA TERCEIRA CAMPANHA, ÁREA E: A)VALORES IN SITU; B) HISTOGRAMA DOS VALORES REGISTRADOS	72
FIGURA 19 -RESULTADOS DA QUARTA CAMPANHA, ÁREA E: A)VALORES IN SITU; B) HISTOGRAMA DOS VALORES REGISTRADOS	72
FIGURA 20 - RESULTADOS DA PRIMEIRA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IMAGEM CLO-A; B) HISTOGRAMA DOS VALORES REGISTRADOS	75
FIGURA 21 - RESULTADOS DA SEGUNDA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IMAGEM CLO-A; B) HISTOGRAMA DOS VALORES REGISTRADOS	75
FIGURA 22- RESULTADOS DA TERCEIRA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IMAGEM CLO-A; B)	75
FIGURA 23 - RESULTADOS DA QUARTA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IMAGEM CLO-A; B) HISTOGRAMA DOS VALORES REGISTRADOS	75

FIGURA 24 - RESULTADOS DA PRIMEIRA CAMPANHA, ÁREA E: A) VALORES IMAGEM CLO-A; B) HISTOGRAMA DOS VALORES REGISTRADOS.....	78
FIGURA 25 - RESULTADOS DA SEGUNDA CAMPANHA, ÁREA E: A) VALORES IMAGEM CLO-A; B).....	78
FIGURA 26 - RESULTADOS DA TERCEIRA CAMPANHA, ÁREA E: A) VALORES IMAGEM CLO-A; B).....	78
FIGURA 27- RESULTADOS DA QUARTA CAMPANHA, ÁREA E: A) VALORES IMAGEM CLO-A; B)	78
FIGURA 28 - RESULTADOS DA PRIMEIRA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IN SITU VERSUS IMAGEM CLO-A; B) GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS VALORES REGISTRADOS	81
FIGURA 29- RESULTADOS DA SEGUNDA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IN SITU VERSUS IMAGEM CLO-A; B) GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS VALORES REGISTRADOS	81
FIGURA 30 - RESULTADOS DA TERCEIRA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IN SITU VERSUS IMAGEM CLO-A; B) GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS VALORES REGISTRADOS	81
FIGURA 31 - RESULTADOS DA QUARTA CAMPANHA, ÁREA A: A) VALORES IN SITU VERSUS IMAGEM CLO-A; B) GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS VALORES REGISTRADOS	81
FIGURA 32 - RESULTADOS DA PRIMEIRA CAMPANHA, ÁREA E: A) VALORES IN SITU VERSUS IMAGEM CLO-A; B) GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS VALORES REGISTRADOS	84
FIGURA 33- RESULTADOS DA SEGUNDA CAMPANHA, ÁREA E: A) VALORES IN SITU VERSUS IMAGEM CLO-A; B) GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS VALORES REGISTRADOS	84
FIGURA 34- RESULTADOS DA TERCEIRA CAMPANHA, ÁREA E: A) VALORES IN SITU VERSUS IMAGEM CLO-A; B) GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS VALORES REGISTRADOS	84
FIGURA 35- RESULTADOS DA QUARTA CAMPANHA, ÁREA E: A) VALORES IN SITU VERSUS IMAGEM CLO-A; B) GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DO PERFIL DOS VALORES REGISTRADOS	84
FIGURA 36 - CRIAÇÃO DO FICHEIRO NETCDF – A) BANDA DA CLO-A E EXPORTAÇÃO NETCDF4;	147
FIGURA 37 – EDITOR NOTEPAD COM DADOS EM CSV PROVENIENTES DO FICHEIRO NETCDF-4, VISUALIZADOS NO LAYOUT DO QGIS COM PROJEÇÃO WGS 84 – ÁREA A.	150
FIGURA 38 - DADOS EM FORMATO CSV PROVENIENTES DO FICHEIRO NETCDF-4, VISUALIZADOS NO LAYOUT DO QGIS	150
FIGURA 39 - DADOS EM FORMATO CSV PROVENIENTES DO FICHEIRO NETCDF-4, VISUALIZADOS NO LAYOUT DO QGIS	151
FIGURA 40- ANÁLISE VISUAL DETALHADA DA PREPARAÇÃO DO GRÁFICO DE PARETO DE FORMA NÃO AUTOMÁTICA;	152

Índice de Tabelas (ou Quadros)

TABELA 1 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	51
TABELA 2 - CAMPANHAS EFETUADAS DAS RECOLHAS DE DADOS <i>IN SITU</i>	53
TABELA 3 - SELEÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE	54
TABELA 4 – INDICADORES ESTATÍSTICOS USADAS NA DISSERTAÇÃO	56
TABELA 5 - IMAGENS SELECIONADAS PARA O CÁLCULO DA CLO-A	65
TABELA 6 - DADOS AMOSTRAIS CLO-A <i>IN SITU</i> - ÁREA A	71
TABELA 7 - DADOS AMOSTRAIS CLO-A <i>IN SITU</i> - ÁREA E	73
TABELA 8 - DADOS AMOSTRAIS CLO-A IMAGENS - ÁREA A	76
TABELA 9 - DADOS AMOSTRAIS CLO-A IMAGENS - ÁREA E	79
TABELA 10 - DADOS AMOSTRAIS CLO-A IMAGENS VERSUS <i>IN SITU</i> - ÁREA A	82
TABELA 11 - DADOS AMOSTRAIS CLO-A IMAGENS VERSUS <i>IN SITU</i> - ÁREA E	85
TABELA 12 - DISTRIBUIÇÃO DOS COEFICIENTES DE PEARSON E R^2 DA CLO-A <i>IN SITU</i> E IMAGEM – ÁREA A	88
TABELA 13 - VALORES CLO-A <i>IN SITU</i> VERSUS DADOS IMAGEM – 1ª, 2ª, 3ª, 4ª TEMPORADAS A	89
TABELA 14 - DISTRIBUIÇÃO DOS COEFICIENTES DE PEARSON E R^2 DA CLO-A <i>IN SITU</i> E IMAGEM – ÁREA E	93
TABELA 15 - VALORES CLO-A <i>IN SITU</i> VERSUS DADOS IMAGEM – 1ª, 2ª, 3ª, 4ª TEMPORADAS E	94
TABELA 16 - VALORES DE VARIÁVEIS - PROCESSADOR C2RCC - 1ºTEMP A	117
TABELA 17- VALORES DE VARIÁVEIS - PROCESSADOR C2RCC - 2ºTEMP A	117
TABELA 18- VALORES DE VARIÁVEIS - PROCESSADOR C2RCC - 3ºTEMP A	117
TABELA 19- VALORES DE VARIÁVEIS - PROCESSADOR C2RCC - 4ºTEMP A	117
TABELA 20 - VALORES DE VARIÁVEIS - PROCESSADOR C2RCC - 1ºTEMP E	118
TABELA 21 - VALORES DE VARIÁVEIS - PROCESSADOR C2RCC - 2ºTEMP E	118
TABELA 22 - VALORES DE VARIÁVEIS - PROCESSADOR C2RCC - 3ºTEMP E	118
TABELA 23 - VALORES DE VARIÁVEIS - PROCESSADOR C2RCC - 4ºTEMP E	118
TABELA 24 - COMPARAÇÃO DAS LEGENDAS DOS MAPAS DOS VALORES CLO-A - <i>IN SITU</i> E IMAGENS	119

Índice de Gráficos

GRÁFICO 1- HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR IN SITU, 1ª TEMPORADA/CAMPANHA	
- A	122
GRÁFICO 2 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR IN SITU, 2ª TEMPORADA/CAMPANHA	
- A	122
GRÁFICO 3- HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR IN SITU, 3ª TEMPORADA/CAMPANHA	
- A	123
GRÁFICO 4 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR IN SITU, 4ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - A	123
GRÁFICO 5- HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR IN SITU, 1ª TEMPORADA/CAMPANHA	
- E	124
GRÁFICO 6 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR IN SITU, 2ª TEMPORADA/CAMPANHA	
- E	124
GRÁFICO 7 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR IN SITU, 3ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - E	125
GRÁFICO 8 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR IN SITU, 4ª TEMPORADA/CAMPANHA	
- E	125
GRÁFICO 9 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR DA IMAGEM, 1ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - A	126
GRÁFICO 10 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR DA IMAGEM, 2ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - A	127
GRÁFICO 11 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR DA IMAGEM, 3ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - A	127
GRÁFICO 12- HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR DA IMAGEM, 4ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - A	128
GRÁFICO 13 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR DA IMAGEM, 1ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - E	128
GRÁFICO 14 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR DA IMAGEM, 2ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - E	129
GRÁFICO 15 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR DA IMAGEM, 3ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - E	129

GRÁFICO 16 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DO RASTER DE VALOR DA IMAGEM, 4ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - E	130
GRÁFICO 17 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, 1ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - A.....	131
GRÁFICO 18 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, COMPARAÇÃO COM IN	
SITU, 1ª TEMPORADA/CAMPANHA - A.....	131
GRÁFICO 19 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, 2ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - A.....	132
GRÁFICO 20 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, COMPARAÇÃO COM IN	
SITU, 2ª TEMPORADA/CAMPANHA - A.....	132
GRÁFICO 21 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, 3ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - A.....	133
GRÁFICO 22 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, COMPARAÇÃO COM IN	
SITU, 3ª TEMPORADA/CAMPANHA - A.....	133
GRÁFICO 23 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, 4ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - A.....	134
GRÁFICO 24 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, COMPARAÇÃO COM IN	
SITU, 4ª TEMPORADA/CAMPANHA - A.....	134
GRÁFICO 25 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, 1ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - E	135
GRÁFICO 26 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, COMPARAÇÃO COM IN	
SITU, 1ª TEMPORADA/CAMPANHA - E	135
GRÁFICO 27 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, 2ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - E	136
GRÁFICO 28 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, COMPARAÇÃO COM IN	
SITU, 2ª TEMPORADA/CAMPANHA - E	136
GRÁFICO 29 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, 3ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - E	137
GRÁFICO 30 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, COMPARAÇÃO COM IN	
SITU, 3ª TEMPORADA/CAMPANHA - E	137
GRÁFICO 31 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, 4ª	
TEMPORADA/CAMPANHA - E	138

GRÁFICO 32 - HISTOGRAMA EM VALORES ACUMULADOS DA IMAGEM DE CLOROFILA-A, COMPARAÇÃO COM <i>IN SITU</i> , 4ª TEMPORADA/CAMPANHA - E.....	138
GRÁFICO 33 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM; B). GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DA CLO-A	139
GRÁFICO 34 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A, CONSIDERANDO O IQR CORRIGIDO DA (VER TABELA 12), SEM OUTLIERS	139
GRÁFICO 35 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A.....	140
GRÁFICO 36 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A, CONSIDERANDO O IQR CORRIGIDO DA (VER TABELA 12), SEM OUTLIERS.	140
GRÁFICO 37 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A.....	141
GRÁFICO 38 - - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A, CONSIDERANDO O IQR CORRIGIDO DA (VER TABELA 12).....	141
GRÁFICO 39 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A.....	142
GRÁFICO 40 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A, CONSIDERANDO O IQR CORRIGIDO DA (VER TABELA 12).....	142
GRÁFICO 41 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A	143
GRÁFICO 42 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A, CONSIDERANDO O IQR CORRIGIDO DA (VER TABELA 15).....	143
GRÁFICO 43 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A	144
GRÁFICO 44 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A, CONSIDERANDO O IQR CORRIGIDO DA (VER TABELA 15).....	144
GRÁFICO 45 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A	145
GRÁFICO 46 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A, CONSIDERANDO O IQR CORRIGIDO DA (VER TABELA 15).....	145
GRÁFICO 47 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A	146
GRÁFICO 48 - DISTRIBUIÇÕES DAS CONC CLO-A <i>IN SITU</i> E DA IMAGEM, CORRIGIDO OS OUTLIERS; B). GRÁFICO DA CORRELAÇÃO CLO-A, CONSIDERANDO O IQR CORRIGIDO DA (VER TABELA 15).....	146

Lista de abreviaturas e siglas

μM	MICROMETERS
2D	TWO- DIMENSIONAL
3D	THREE-DIMENSIONAL
AATSR	ADVANCED ALONG-TRACK SCANNING RADIOMETER
AERONET	AEROSOL ROBOTIC NETWORK
AOPS	APPARENT OPTICAL PROPERTIES
ASE	AVERAGE STANDARD ERROR
C2RCC	CASE 2 REGIONAL COAST COLOR
CDF	CUMULATIVE DISTRIBUTION FUNCTION
CDOM	COLOR DISSOLVED ORGANIC MATERIAL
CF	CLIMATE AND FORECAST
CHL-A	CHLOROPHYLL A
CLO-A	CLOROFILA-A
CSV	COMMA SEPARATED VALUES
CZCS	COASTEL ZONE COLOR SCANER
DCM	DEEP CHLOROPHYLL MAXIMUM
DGRM	DIREÇÃO GERAL RECURSOS MARÍTIMOS
DO	DISSOLVED OXYGEN
DORIS	DOPPLER ORBITOGRAPHY AND RADIOPOSITIONING BY INTEGRATED SATELLITE
DTO	DIGITAL TWIN OF THE OCEAN
EBK	EMPIRICAL BAYESIAN KRIGING
EBM	ECOSYSTEM-BASED MANAGEMENT
EC	EUROPEAN COMMISSION
ECMWF	EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS
EEA	EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY
EM	SPECTRUM ELECTROMAGNETIC
ENVISAT	ENVIRONMENTAL SATELLITE

EO	EARTH OBSERVER
EPA	UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY
EPSG	EUROPEAN PETROLEUM SURVEY GROUP
ERS	EUROPEAN REMOTE SENSING
ESA	EUROPEAN SPACE AGENCY
ETRS89	EUROPEAN TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM 1989
EUMSAT	EUROPEAN ORGANIZATION FOR THE EXPLOITATION OF METEOROLOGICAL SATELLITES
EUMTSTAT	EXPLOITATION OF METEOROLOGICAL SATELLITES
FLUP	FACULDADE DE LETRAS DA UNIVERSIDADE DO PORTO
IDW	INVERSE DISTANCE WEIGHTED
IH	INSTITUTO HIDROGRÁFICO
IOCCG	INTERNATIONAL OCEAN COLOR COORDINATING GROUP
IOPS	INHERENT OPTICAL PROPERTIES
LIDAR	LIGHT DETECTION AND RANGING
MERIS	MEDIUM RESOLUTION IMAGING SPECTROMETER
MODIS	MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER
MSP	MARITIME SPATIAL PLANNING
MWR	MICROWAVE RADIOMETER
NASA	NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION
NETCDF	NETWORK COMMON DATA FORM
NIR	NEAR INFRARED
NM	NANO METERS
NN	NEURAL NETWORK
NOAA	NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
NTU	NEPHELOMETRIC TURBIDITY UNITS
°C	DEGREE CELSIUS
OLCI	OCEAN LAND COLOR INSTRUMENTS
OSA	OCEAN SURFACE ALBEDO

PACE	PLANKTON AEROSOL CLOUD OCEAN ECOSYSTEM
QGIS	QUANTUM GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM
RGB	RED, GREEN, BLUE
ROV	REMOTELY OPERATED VEHICLES
RTT	RADIATIVE TRANSFER THEORY
SEAWIFS	SEA-VIEWING WIDE FIELD-OF VIEW SENSOR
SLSTR	SEA LAND SURFACE TEMPERATURE INSTRUMENT
SNAP	SENTINEL APPLICATION PLATFORM
SNR	EUROPEAN NOISE RATIOS
SOS	SUCCESSIVE ORDER OF SCATTERING
SPOT	SATELLITE POUR L'OBSERVATION DE LA TERRE
SRAL	SAR RADAR ALTIMETER
TOA	TOP OF ATMOSPHERE
TSM	TOTAL SUSPENDED MATTER
UP	UNIVERSIDADE DO PORTO
USC	UNION OF CONCERNED SCIENTISTS
USGS	UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY
VIIRS	VISIBLE INFRARED IMAGING RADIOMETER SUITE
WGS84	WORLD GEODETIC SYSTEM 1984
ZEE	ZONA ECONÓMICA EXCLUSIVA
Λ	LAMBDA

1. Introdução

A clorofila-a (Clo-a) é o principal pigmento responsável pela fotossíntese e encontra-se em todos os organismos fotossintetizantes, incluindo o fitoplâncton (Long, 2011). Embora existam limitações associadas à conversão da concentração de Clo-a em carbono orgânico, assim como à variabilidade do seu conteúdo celular, a Clo-a mantém-se como o principal índice utilizado na avaliação do estado trófico de qualquer ecossistema marinho (Long, 2011).

Para além disso, é um dos critérios padrão do controle da qualidade das massas de água na União Europeia, e a sua utilização como indicador, é obrigatória de acordo com as diretivas europeias (DOA 2000/60/EU e MSD, 2008/56/CE) (Long, 2011).

A concentração de Clo-a, é mensurável através de análise laboratorial de amostras de água colhidas *In Situ* ou através de medição utilizando um verificador/instrumento de qualidade da água em estações de amostragem, denominados fluorómetros (Aveiro, 2021). No entanto, os processamentos das amostras são demorados, complexos e dispendiosos (Blanco et al. 2020).

A recolha da informação química, biológica e oceanográfica nas áreas estabelecidas no Plano de Ordenamento de um Espaço Marítimo (DGRM, 2019), como o de Portugal, implica sempre a existência de um número limitado de estações de amostragem (*In Situ*), pelo que, a obtenção de estimativas de Clo-a através da cor do oceano sobre ecossistemas marinhos recorrendo aos métodos de deteção remota por satélite é o método mais acessível, com o melhor custo-benefício e aplicável a uma escala global, neste caso oceânica (Franco, 2022).

O contributo para este desiderato na União Europeia consiste na utilização dos dados de deteção remota colhidos por satélites das constelações Sentinel, do programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA), em particular os Sentinel-2 e Sentinel-3 (ESA, 2024a).

A concentração da clorofila nos oceanos tem sido determinada através de algoritmos que processam as imagens multiespectrais colhidas por satélite (ESA, 2016a). A

determinação da concentração de Clo-a neste trabalho fez uso do sensor Ocean and Land Colour Instrument (OLCI), instalado nos satélites Sentinel-3 (ESA, 2016b).

O instrumento OLCI foi desenvolvido, em parte, para dar continuidade às medições efetuadas anteriormente pelo instrumento Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), instalado no Envisat (ESA, 2015a).

O OLCI é um radiómetro de imagem no visível, que apresenta francas melhorias face ao MERIS, nomeadamente um maior número de bandas espectrais, uma melhor relação sinal-ruído e um total de 21 bandas distribuídas entre os 400 e 1200 nm (ESA, 2024d).

Tendo como base esta ferramenta tecnológica, a presente investigação procurou avaliar a aplicabilidade do algoritmo C2RCC na estimativa da concentração de Clo-a em zonas costeiras portuguesas, com particular incidência no Norte de Portugal — entre Caminha e a Foz do Douro — e na região do Algarve — entre Sagres e Tavira.

Neste contexto, a utilização de produtos de deteção remota revela-se uma ferramenta promissora para complementar os métodos tradicionais de monitorização ambiental, especialmente em áreas extensas e de difícil acesso.

Assim, delinearam-se um conjunto de objetivos específicos que orientam o desenvolvimento do trabalho e estruturam as etapas seguintes da análise.

1.1. Objetivos do Trabalho

No sentido de alcançar o objetivo principal desta dissertação, a melhor orientação das suas etapas de análise e validação dos dados, foi definido um objetivo principal e dois objetivos secundários a qual se procurou dar resposta.

- i. Avaliar o potencial da deteção remota por satélite na estimativa da concentração de Clo-a em ambientes costeiros portugueses.
- ii. Estimar a concentração de clorofila na Costa Portuguesa através da aplicação do algoritmo C2RCC, com recurso a imagens multiespectrais colhidas pelo sensor OLCI da constelação Sentinel-3.
- iii. Comparar os valores de Clo-a calculados através do algoritmo C2RCC e as concentrações obtidas em laboratório através de processamentos de amostras

de água colhidas *In Situ*, obtidas durante quatro campanhas oceanográficas (Out2018, Mai2019, Out2019 e Mar2020), levadas a cabo pelo Instituto Hidrográfico (IH) no âmbito de caracterização geral de áreas aquícolas para estabelecimento de culturas marinhas (Hidrográfico, 2023).

1.2. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em dez capítulos, visando assegurar uma progressão lógica entre o enquadramento teórico, a descrição dos dados e métodos, a apresentação dos resultados e a sua discussão, culminando nas conclusões e recomendações finais.

O primeiro capítulo, apresenta o tema da investigação, justifica a sua atualidade e relevância e descreve os objetivos da investigação, assim como a respetiva estrutura, e encontra-se dividido em dois subcapítulos.

O segundo capítulo, dedicado à revisão conceptual, centra-se nos principais conceitos associados ao tema em estudo, descrevendo os métodos existentes, o conhecimento existente sobre o assunto e as lacunas identificadas na literatura, organizado em cinco subcapítulos.

O terceiro capítulo, dados e áreas de estudo, detalha os dados utilizados e descreve a sua extensão geográfica, proveniência, esquema de amostragem e estrutura, distribuído por três subcapítulos.

O quarto capítulo - materiais e métodos - descreve os materiais, a metodologia adotada, sendo estruturado em três subcapítulos.

O quinto capítulo - resultados - expõe os materiais e os principais resultados alcançados, estruturando-se em três subcapítulos.

O sexto capítulo, dedicado à discussão, apresenta e discute os resultados, e reparte-se por dois subcapítulos.

O sétimo capítulo, conclusão, analisa os principais resultados e conclusões e destaca o contributo do conhecimento, incluindo limitações, recomendações e propostas para desenvolvimento futuro.

O oitavo capítulo, apresenta as referências bibliográficas consultadas e citadas ao longo da dissertação.

O nono capítulo, agrega cinco anexos que sustentam a revisão da literatura, e o complemento de informação sobre os resultados.

O décimo e último capítulo integra dois apêndices, que reúnem informação adicional complementar sobre os materiais utilizados na investigação, com o objetivo de aprofundar e clarificar aspetos metodológicos.

2. Revisão Conceptual

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos essenciais ao enquadramento do presente trabalho, oferecendo uma revisão conceptual com foco nos principais conceitos, nas suas inter-relações e na sua evolução ao longo do tempo.

De seguida, aborda-se o tema da deteção remota, enquadrando-se a relevância da constelação de satélites Sentinel-3 — desde os motivos que justificam a sua criação até à sua importância estratégica na observação oceânica. Analisa-se, ainda, o papel das variáveis oceânicas, explorando a sua relação com os processos de deteção e a forma como se distribuem a nível global (Florida, 2019).

Por fim, apresentam-se os principais métodos disponíveis para o mapeamento destas variáveis, com base na literatura especializada (Florida, 2019).

2.1. Importância da Clorofila

Existem vários tipos de clorofila: A Clo-a, o tipo mais abundante de clorofila encontrado em todos os organismos capazes de efetuar a fotossíntese; a Clorofila-b; a Clorofila-c; a Clorofila-d; a Clorofila-e; a Clorofila-f (Kringen, 2024), mas todas absorvem os comprimentos de onda azuis e vermelhos do espectro eletromagnético (EM) e refletem a luz verde (NASA, 2021).

2.1.1. Clorofila-a

Para o presente estudo vamos considerar somente a Clo-a, a mais abundante (Kringen, 2024), e que constitui um dos critérios padrão do controle da qualidade das massas de água na União Europeia, sendo a sua utilização um indicador obrigatório DOA 44 2000/60/EU e MSD, 2008/56/CE (Long, 2011).

A Clo-a é o principal pigmento responsável pela fotossíntese, e como tal, é encontrada em todos os organismos fotossintetizantes marinhos (Long, 2011), como algas, cianobactérias e plantas aquáticas, no qual se inclui o fitoplâncton, cuja função é a conversão da energia solar em matéria orgânica - mais conhecida como produção primária (Program, 2024; Long, 2011).

Apesar da tendência associada à conversão da concentração de Clo-a em carbono orgânico e à variabilidade de seu conteúdo celular, a Clo-a é o índice principal no estudo do estado trófico de qualquer ecossistema marinho natural (Long, 2011).

Neste sentido, a medição da sua concentração é expressa em mg/m^3 (Morel et al. 2007), fruto de um conjunto de estudos estatísticos encetado por Morel (1988), que identificou que, em muitas situações, o fitoplâncton e os seus derivados, produtos detriticos -principalmente partículas (Institution, 2021), desempenham um papel predominante na determinação das propriedades óticas das águas oceânicas que levou à classificação das águas em Caso 1 e Caso 2 (Morel & Gentili, 2004).

Este conjunto de dados estatísticos permitiu estimar, que a concentração dos valores de clorofila nas águas caso 1 variam em ordem de grandeza de 0 a $30 \text{ mg}/\text{m}^3$, representativos, em média, em toda a faixa de concentrações de pigmentos esperadas para este tipo de águas (Morel, 1988).

Estudos mais recentes referem que nas águas do caso 1 a concentração da Clo-a varia entre valores muito baixos de $0,02 \text{ mg}/\text{m}^3$ em vastas zonas oligotróficas até valores elevados $0,5 - 30 \text{ mg}/\text{m}^3$, em áreas de ressurgência mais restritas (*p. ex.*, ao largo do Peru, Mauritânia, Benguela...), ou durante o curto período de floração em oceanos com latitudes moderadas e altas (ESA, 2011a).

Grosso modo, cerca de 10% da área oceânica global apresenta concentrações de Clo-a inferiores a $0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$, enquanto outros 10% registam valores superiores a $0,4 \text{ mg}/\text{m}^3$; apenas cerca de 1% da área total dos oceanos apresenta concentrações de clorofila-a superiores a $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ (Antoine et al. 2005; ESA, 2011a).

Para o presente trabalho, vamos considerar os valores de clorofila nas águas oceânicas na ordem de grandeza de 0 a $30 \text{ mg}/\text{m}^3$ conforme definidos por Morel (1988).

A Clo-a, absorve os comprimentos de onda azuis e vermelhos do EM, refletindo no visível do verde e é responsável por dar à maioria das plantas marinhas e terrestres a cor verde (NASA, 2021).

Este desiderato, como será demonstrado mais adiante no trabalho, permite aos sensores dos satélites medirem a cor da água do oceano, isto é, os comprimento de onda da luz solar refletida de uma área do oceano, e assim, estimar a quantidade de fitoplâncton nessa área (Florida, 1999).

Um exemplo concreto deste princípio é o satélite Sentinel-3 que, através do sensor OLCI, efetua observações simultâneas em 21 bandas espectrais, cobrindo o domínio do visível ao infravermelho próximo, entre aproximadamente 400 e 1020 nm do EM (ESA, 2024c).

Esta absorção diferencial e a reflexão de comprimentos de onda específicos de luz, são a base para que em métodos laboratoriais (dados *In Situ*), e de detecção remota, se efetuem o estudo da cor dos oceanos e as concentrações da clo-a (Minnesota, 2024) .

2.2. Medição da Clorofila por Detecção Remota

Os satélites, medem a luz refletida na água, usando comprimentos de onda característicos do espectro de absorção da clorofila, utilizando para tal sensores, que possuem bandas espectrais próprias que fornecem informações sobre a clareza das águas – cor dos oceanos (Minnesota, 2024).

A detecção remota assenta num conjunto de elementos importantes, a saber: (i) plataforma; (ii) o objeto alvo a ser observado; (iii) o instrumento ou sensor para observar o alvo; (iv) informações dos dados da imagem e a forma como são guardados e utilizados (ESA, 2015b).

2.2.1. Plataformas

Plataformas podem ser satélites ou aviões, onde são colocadas câmaras especiais que recolhem imagens que ajudam os investigadores a ver áreas muito superiores do que a partir do solo, e assim, poder estudar os fenómenos que aí venham a ocorrer, *p. ex.*, acompanhar o crescimento de uma cidade, o rastreamento de nuvens para ajudar a prever o tempo, ou estudar a cor do oceano (USGS, 2024).

As plataformas no seu percurso de recolha de imagens seguem uma trajetória predefinida, conhecida como a sua órbita. As órbitas dos satélites (Figura 1), são adaptadas

à capacidade e objetivo dos sensores que transportam, recolhendo informações continuamente sobre áreas específicas, durante um determinado período de tempo, permitindo a aquisição de imagens numa estação/zona específica durante anos consecutivos, ou numa área particular durante uma série de dias (Canada, 2015).

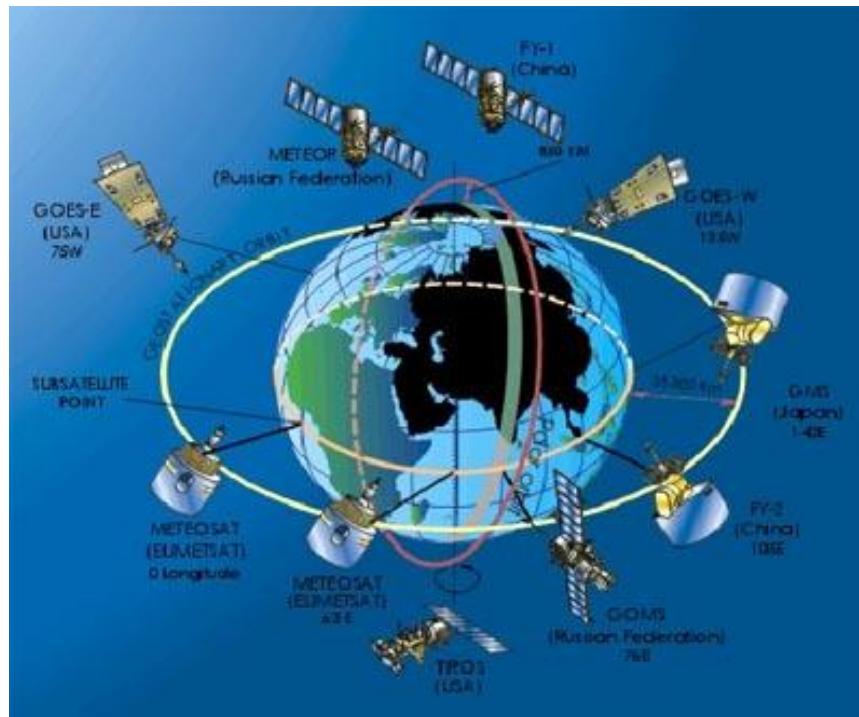


Figura 1 - Rede de Satélites,

Fonte: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_PT/SEMJN465P1G_0.html; fev2024

2.2.2. Objetos

No âmbito da deteção remota, o objeto (Figura 1), que se observa é a Terra. Contudo, devido à sua dimensão, não é possível observá-la integralmente de uma só vez, pelo que a bordo dos satélites utilizam-se sensores programados que colhem imagens sucessivas ao longo da órbita, que podem posteriormente ser organizadas em mosaicos¹, possibilitando uma cobertura espacial alargada da superfície terrestre e, em última análise, a observação global do planeta (ESA, 2015b).

¹ Informação mais detalhada ver fonte: <https://support.ESRI.com/en-us/gis-dictionary/mosaic>; jun2025

2.2.3. Sensores

É o dispositivo utilizado para obter imagens, tratando-se de um meio mais amplo do que a máquina fotográfica para obter informações. Por exemplo uma máquina fotográfica capta, em geral, informações sensíveis apenas à visão humana, registrando uma imagem através da radiação (luz) visível (ESA, 2015b). Assim, ao fotografar um objeto, a imagem obtida corresponde ao que é percebido na realidade (ESA, 2015b).

Os sensores, (Figura 2, Figura 3) para além da luz visível, são também capazes de adquirir informações, onde a visão humana não alcança, recorrendo à radiação de outras regiões do EM, veja-se *p. ex.* os óculos de visão noturna (ESA, 2015b).

Neste pressuposto, [...] a percepção das cores pelos seres humanos ocorre na região do visível do EM [...] (ESA, 2015b), [...] faixa de especial interesse para a deteção remota [...] (Canada, 2015), e onde nos vamos concentrar no presente estudo.

Desta forma, [...] a porção de luz emitida por um objeto notada aos olhos humanos geralmente é a sua cor. Por exemplo, se uma planta é verde, é porque a planta reflete parte da luz que a nossa visão analisa como verde, e se, uma maçã é vermelha é porque reflete parte da luz que a nossa visão observa como vermelho [...](ESA, 2015b).

Por conseguinte, a região do visível do EM (Figura 2), com valores de comprimento de onda na ordem aproximadamente 0,4 μm a 0,7 μm (Canada, 2015), corresponde à banda em que a clorofila, enquanto pigmento responsável pela fotossíntese, confere a cor verde à maioria das plantas marinhas e terrestres, sendo também a faixa onde os satélites captam a cor dos oceanos (NASA, 2021).

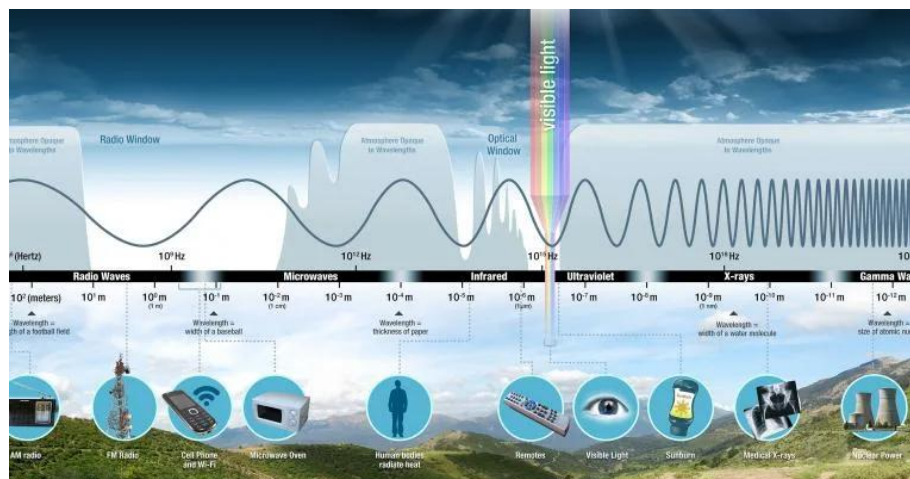


Figura 2- Espectro Eletromagnético;
 Fonte: https://science.nasa.gov/ems/01_intro/; fev2024

Neste sentido, é importante referir que existem outras regiões do EM que são úteis para a detecção remota (Canada, 2015), mas para a investigação em curso, não são consideradas.

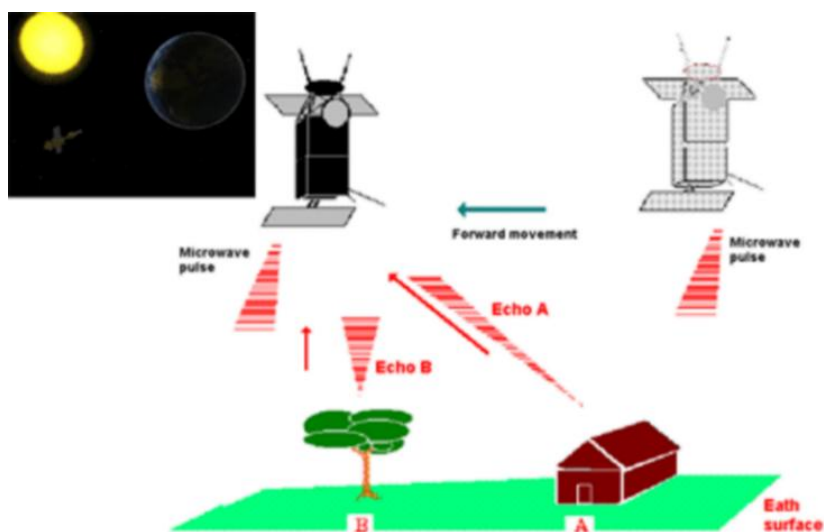


Figura 3 - Sensores Ativos
 Fonte: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_PT/SEMUV465P1G_0.html; fev2024

Concluída a caracterização dos sensores, importa agora abordar os produtos que deles resultam, designadamente as imagens de satélite, bem como alguns conceitos fundamentais a elas associados, relevantes para o presente estudo.

2.2.4. Imagens

No âmbito da deteção remota, a energia eletromagnética pode ser detetada por meios fotográficos ou eletrónicos (Venâncio, 2016). Por conseguinte, importa distinguir conceptualmente os termos imagem e fotografia, frequentemente utilizados como sinónimos, mas com significados técnicos distintos (Canada, 2015) .

O termo imagem (Canada, 2015), designa qualquer representação pictórica² obtida por meio de um sistema de deteção remota, independentemente dos comprimentos de onda envolvidos ou da natureza do sensor utilizado. Em contraste, a fotografia refere-se especificamente a imagens registadas em suporte fotossensível, como o filme fotográfico tradicional (Canada, 2015).

A qualidade e o grau de detalhe observáveis numa imagem são definidos pela sua resolução, a qual se subdivide, no contexto da deteção remota, em quatro dimensões fundamentais: resolução espectral, resolução radiométrica, resolução temporal e resolução espacial (Campbell, 2011).

A resolução espectral, refere-se ao número e à largura das bandas espectrais que um sensor é capaz de diferenciar. Uma resolução espectral mais alta pode ajudar na identificação e na distinção de diferentes tipos de materiais e objetos observados na superfície terrestre, contribuindo para uma interpretação mais precisa da composição espectral dos objetos observados (ESRI, 2024b).

A resolução radiométrica, diz respeito à capacidade do sensor em distinguir variações subtis, na intensidade da radiação refletida ou emitida pelos alvos. Um maior número de níveis radiométricos, permite representar com maior fidelidade as diferenças de brilho, o que resulta numa imagem menos granulada e mais informativa (ESRI, 2024b).

Quanto à resolução temporal, esta expressa a frequência, com que uma determinada área da superfície terrestre é revisitada por um satélite. Resoluções temporais elevadas,

² "Pictórica" adjetivo que se refere a tudo o que é relativo à pintura, às imagens, ou que se presta a ser representado visualmente. Fonte: <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/pict%C3%B3rica>; mai2025.

favorecem a monitorização contínua de fenómenos dinâmicos, permitindo análises multitemporais³ (imagens de diferentes datas), aumentando a quantidade de informações disponíveis e possibilitando a deteção de mudanças ao longo do tempo (ESRI, 2024b).

A resolução espacial, por sua vez, está relacionada com o tamanho da menor unidade detetável na superfície terrestre, representada por cada pixel da imagem Engenharia (2025). Sensores com resolução espacial elevada, produzem imagens com maior nível de detalhe, fornecendo uma representação mais nítida do objeto observado e reduzindo a granulação (ESRI, 2024b).

A *granulação*, uma característica importante das imagens, determinada pelo tamanho dos pixels, que pode afetar a clareza e a qualidade dos dados das imagens obtidas é particularmente relevante em aplicações como a deteção de clorofila em ambientes marinhos (Kupidura & Lesisz, 2022), onde a destrição espectral e espacial, desempenham um papel crítico na qualidade das estimativas (Bhargava et al. 2024).

Com o advento das imagens de satélite, especialmente com o lançamento do Sentinel-3, julga-se deveras importante revisitar alguns conceitos históricos, de forma a possibilitar um certo enquadramento teórico e metodológico adequado ao estudo em apreço.

2.2.5. Início da Deteção Remota para o Estudo dos Oceanos

Novos satélites são acrescentados todos os meses por diferentes operadores, sejam eles públicos ou privados, que se destinam a fornecer informações da Observação da Terra «*Earth Observation*» (EO), monitorização do planeta a partir de diferentes perspetivas (Mantas, 2016), como por exemplo, o estudo da cor dos oceanos, cujo primeiro sensor dedicado a este desiderato foi o «*Coastal Zone Color Scanner*» (CZCS), lançado em 1978 a bordo do satélite Nimbus 7, da NASA (Fukushim, 1997).

³ “Multitemporais” ver informação mais detalhada na fonte: <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-analise-multitemporal-2/>, mai2025.

Resumidamente, os sensores que estudam a cor dos oceanos são projetados para recuperar a distribuição espectral da radiação ascendente logo acima da superfície do mar - a radiação que sai da água (ESA, 2024b), e assim, poder estimar uma série de parâmetros geofísicos da água (ESA, 2016b), como adiante neste estudo poderemos constatar.

Isto acontece, porque a correção atmosférica para os dados de cor do oceano é um desafio, pois apenas cerca de 4% da radiação medida por um instrumento de satélite é originária da superfície da água, o que exige destes sensores altas relações sinal-ruído «Signal to Noise Ratios» (SNR)⁴, especialmente para as bandas azuis (aproximadamente nos 400 nm) do EM (ESA, 2016b).

Para além do exposto, obriga os instrumentos de medição das cores do oceano a incorporarem radiometria extremamente sensível e estável, calibração dedicada a bordo, assim como, um grande número de canais espectrais (ESA, 2024d).

Na sequência da observação da Terra, seguiram-se os satélites *European Remote Sensing* - ERS-1 (1991), e *European Remote Sensing* - ERS-2 (1995), desenvolvidos pela indústria europeia sob coordenação da Agência Espacial Europeia (ESA), equipados com radar de micro-ondas ativo capaz de recolher dados através de nuvens e durante a noite (ESA, 2015a). Posteriormente, em 2002, foi lançado o Envisat (Figura 4), sucessor dos ERS (ESA, 2015a).

⁴ SNR: Indica a quantidade de informação útil (sinal obtido corretamente) em relação ao ruído (interferências indesejadas na imagem). Por exemplo, dois sensores podem produzir imagens com 256 em tons de cinzento (8 bits), mas se um tiver um 60 (S/N) e o outro de 120 (S/N), o segundo terá o dobro da capacidade de distinguir variações reais no sinal, produzindo imagens de melhor qualidade. Fonte: <https://support.ESRI.com/en-us/gis-dictionary/radiometric-resolution>; Jul2025.



Figura 4 - Satélite Envisat;

Fonte; <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/envisat>; fev2024

O Envisat, a maior plataforma lançada até ao momento para a observação da Terra, pesava oito toneladas, foi construído para acolher 10 instrumentos de pesquisa os radares de imagem mais avançados, *p.ex.*, radar altímetro, instrumentos radiômetros de medição de temperatura que ampliaram os conjuntos de dados dos ERS sendo o mais conhecido deles todos, o Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) (ESA, 2015a).

O MERIS é um espectrómetro de imagem que media a radiação solar, refletida pela Terra, com uma resolução espacial do solo de 300 m, com 15 bandas espectrais na gama visível e de infravermelhos próximos e programável em largura e posição, com uma cobertura global da Terra de 3 em 3 dias (ESA, 2015a). A missão principal do sensor MERIS consistiu em medir a cor da água nos oceanos e nas zonas costeiras (ESA, 2015a).

Neste contexto da EO, e em continuidade ao legado científico do MERIS, a ESA desenvolveu a família de satélites Sentinel, destacando-se a constelação Sentinel-3, concebida para o estudo da temperatura da superfície do mar e da cor da água nos oceanos(ESA, 2024a).

2.2.6. Constelação Satélites Sentinel-3

A família de satélites Sentinel, do qual fazem parte os Sentinel-3, vieram satisfazer as necessidades operacionais do programa Copernicus da ESA, após as limitações vividas com a descontinuidade do ENVISAT (ESA, 2024a) (Figura 5).

O programa Copernicus é o programa mais ambicioso de observação da Terra, até à data, que visa, entre outros: i) tratar/manipular as grandes quantidades de dados globais oriundos dos satélites, sistemas de medição terrestres, aéreos e marítimos que fornecem informações que ajudam os prestadores de serviços (autoridades públicas e outras organizações internacionais); ii) melhorar a gestão do ambiente, e assim, melhorar a vida dos cidadãos da Europa e de outros países. A informação dos serviços prestados são gratuitos e de livre acesso (ESA, 2024a).



Figura 5 - Sentinel-3;

Fonte: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-3>

O programa Copernicus foi implementado em parceria com os Estados-Membros da Agência Espacial Europeia (ESA), a Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos «Exploitation of Meteorological Satellites» (EUMETSAT), o Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo «European Centre for Medium-

Range Weather Forecasts» (ECMWF), e Agências da UE «EU Agencies and Mercator Ocean International» (ESA, 2024a).

O significado da missão Sentinel-3, foi motivado pela necessidade de continuidade no fornecimento de dados do ERS (1 e 2), satélites descontinuados em 10 de março de 2000 e 5 de setembro de 2011 respetivamente, e do ENVISAT satélite lançado em 01 de março de 2002 e descontinuado em abril de 2012 (ESA, 2024c), assim como, no apoio ao satélite desenvolvido pela França «Satellite Pour l’Observation de la Terre» SPOT⁵.

Os dois satélites, (Sentinel-3A, Sentinel-3B), foram lançados em 16 de fevereiro de 2016 e 25 de abril de 2018, respetivamente, e são operados em conjunto pela (ESA), e pela EUMETSAT (ESA, 2024a).

O principal objetivo da missão Sentinel-3 é medir a temperatura da superfície do mar e da terra, a cor da superfície do oceano e da terra, com alta precisão e confiabilidade, no sentido de apoiar os sistemas de previsão oceânica, monitorização ambiental e climático (ESA, 2024a).

Estes objetivos permitiram que a constelação Sentinel-3, fosse dotada com um conjunto de melhorias no seu desempenho, usando uma combinação de instrumentos ⁶ óticos e de radar, tais como: o Ocean and Land Colour Instrument (OLCI); Sea and Land Surface Temperature Instrument (SLSTR); SAR Radar Altimeter (SRAL), complementado com o Microwave Radiometer (MWR); Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) (ESA, 2024c).

⁵ Fonte <https://earth.esa.int/eogateway/missions/spot>; ago2025

⁶ Fonte: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-olci-instrument>; fev2025

2.2.7. Características do Sentinel-3 OLCI

A capacidade do instrumento OLCI (Figura 6), permite um nível de disponibilidade muito elevado (>95%), com uma elevada precisão e fiabilidade (ESA, 2024d):

1. Nas medições de cores do oceano, do mar interior e da zona costeira pelo menos ao nível de qualidade do sensor MERIS no ENVISAT;
2. Nas medições da temperatura da superfície do mar, pelo menos, ao nível e qualidade do instrumento Advanced Along-Track Scanning Radiometer AATSR no ENVISAT;

O OLCI é um instrumento tipo vassoura, com cinco módulos de câmara que compartilham o campo de visão, dispostas em forma de leque no plano vertical, e perpendicular à velocidade da plataforma (ESA, 2024d).

Cada câmara (Figura 6), possui um campo de visão individual de $14,2^\circ$ com uma sobreposição de $0,6^\circ$, relativamente às câmaras adjacentes. O campo de visão é inclinado $12,6^\circ$ ao longo da pista em relação ao sol, de forma a minimizar o impacto do seu brilho (ESA, 2024d).

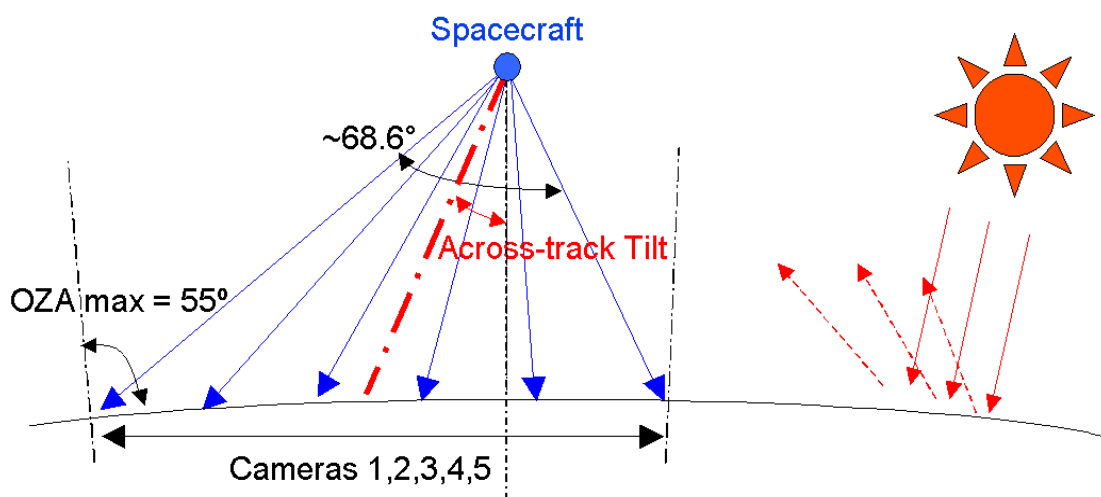


Figura 6 - Visão esquemática do campo de visão do OLCI;
Fonte: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-olci-instrument>; fev2024

O instrumento OLCI colocado no satélite, permite uma visão direta da Terra, eliminando a necessidade do espelho dobrável adicional, incorporando as seguintes melhorias, em relação ao MERIS (ESA, 2024d):

1. Aumento no número de bandas espectrais, de 15 para 21;
2. Razão sinal-ruído «Signal to Noise Ratio – (SNR)» aprimorada, além de um conversor analógico-digital de 14 bits, que melhora a estabilidade radiométrica;
3. Mitigação da contaminação pelo brilho solar, através da inclinação das câmaras na direção oeste;
4. Cobertura completa da terra e dos oceanos, com resolução total de 300 m (no MERIS, a resolução reduzida era computada a bordo);
5. Caracterização aprimorada do instrumento, incluindo luz difusa, sobreposição das câmaras e difusores de calibração;
6. Melhor cobertura global dos oceanos (menos de 4 dias), e da terra (menos de 3 dias com um satélite, desconsiderando o efeito das nuvens), enquanto no MERIS o ciclo era de aproximadamente 15 dias;
7. Tempo de entrega dos dados em 3 horas, para produtos de nível 1B e nível 2;
8. Cobertura de 100% com sobreposição na faixa do instrumento SLSTR e aquisições simultâneas, facilitando o uso sinérgico entre OLCI e SLSTR;
9. Bandas OLCI otimizadas, para medir a cor do oceano aberto e das zonas costeiras.

Ao contrário do MERIS, cuja faixa de observação se encontrava centrada no nadir⁷, o OLCI apresenta uma inclinação de aproximadamente 12,6° para oeste. Esta configuração geométrica visa mitigar o impacto da contaminação por brilho solar que afetava uma parte significativa das observações do MERIS, particularmente em latitudes subtropicais (ESA, 2024d).

⁷ Nadir: Em fotografia aérea ou imagens de satélite, é o ponto no solo verticalmente abaixo do centro de perspectiva da lente da câmara ou dos detetores do sensor, ou o ponto de convergência (ponto de fuga), onde todos os raios verticais da imagem se encontram. Fonte: <https://support.ESRI.com/en-us/gis-dictionary/search?q=nadir>; abr2025

Outra característica importante do OLCI é ser um espectrômetro de imagem com resolução espectral média, operando na faixa da radiação solar refletida, entre os 400 nm e 1040 nm (ESA, 2024a).

Este sensor/instrumento realiza medições da radiação refletida pela superfície terrestre e pelas nuvens, distribuídas pelas 21 bandas espectrais⁸ (ESA, 2024d).

Para além do exposto, importa salientar uma característica de particular relevância: os produtos gerados pelo sensor OLCI estão disponíveis em duas resoluções espaciais distintas (ESA, 2024d):

- A alta resolução espacial «Full Resolution» (FR) – de aproximadamente 300 metros, com uma cobertura completa sobre a terra e o oceano (ESA, 2024d), apropriada para zonas que requerem um maior detalhe espacial (Donlon et al. 2012).
É uma ferramenta única e importante para a monitorização de zonas costeiras ou terrestres, ou áreas com uma grande existência de florações intensas de plâncton (Gower et al. 2004);
- A resolução espacial Reduzida «Reduced Resolution» (RR) – aproximadamente de 1200 metros, que não é considerada para a presente dissertação (ESA, 2024d).

2.2.8. Tipos de Produtos Colocados aos Utilizadores

Os tipos de produtos OLCI, distribuídos aos utilizadores, são divididos em três produtos principais:

1. Nível 0: São os dados brutos captados pelo sensor, organizados por tempo e verificados, mas ainda não processados. Estes dados não são disponibilizados aos utilizadores (ESA, 2024d).

⁸ Fonte: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/olci-products>; jun2025

2. Nível 1: A partir dos dados brutos, são geradas radiâncias calibradas e georreferenciadas para cada banda do OLCI. Estes dados incluem informações adicionais, como sinalizadores de qualidade e de classificação dos pixels, tornando o seu uso mais fácil para os utilizadores (ESA, 2024d).
3. Nível 2: Os dados do Nível 1 são processados para aplicações oceânicas e terrestres. As radiâncias medidas no topo da atmosfera «Top of Atmosphere (TOA)» são corrigidas para efeitos como a absorção de gases. No caso dos oceanos, estas correções consideram como fatores, a cor da água, transparência, sedimentos e algas, permitindo assim, estimar melhor a quantidade de radiação solar que atinge a superfície do mar (ESA, 2024d).

Assim, a refletância corrigida⁹ (Qu, 2018), ao considerar as características particulares das águas oceânicas como cor, transparência, conteúdo de material em suspensão (sedimentos, algas), e absorção diferencial de luz em diferentes comprimentos de onda, permite-nos uma melhor estimativa da quantidade de luz solar (radiação solar), que atinge a superfície do oceano (Liang, 2018).

Os produtos de Nível 1 e Nível 2 do OLCI fornecem as radiâncias e a refletância corrigidas, dados essenciais que servem como entrada para o processador C2RCC, permitindo a estimativa de propriedades óticas da água e da concentração de clorofila.

2.3. Processador C2RCC

A evolução de algoritmos¹⁰ e modelos baseados em dados de cor do oceano, iniciada nas décadas de 1970 e sistematizada ao longo de várias décadas, tem sido orientada pela necessidade contínua de reduzir a incerteza na estimativa da concentração de Clo-a, através do uso de informação proveniente de sensores de satélite (Blondeau-Patissier et al. 2014; Silva & Garcia, 2021).

⁹ É a quantidade de radiação eletromagnética que é refletida por uma superfície, neste caso, a superfície da Terra (oceânica ou terrestre) (Qu, 2018) .

¹⁰ Algoritmo: É um método que produz num número finito de etapas a resposta a uma pergunta, ou a solução de um problema. Fonte: <https://www.britannica.com/science/algorithm>; mar2024

Este desenvolvimento de algoritmos deve-se em grande parte aos estudos encetados por Morel & Prieur, (1977), que dividiu as águas da Terra em águas caso 1 e caso 2 nos oceanos (Morel, 1988), tendo em conta as suas propriedades óticas.

Neste sentido e, dentro do grande universo dos algoritmos desenvolvidos para o cálculo da concentração da Clo-a, vamos considerar a abordagem no algoritmo de águas costeiras do caso 2, que foi desenvolvido pelos estudos de Doerffer et al. (2010), para o processador terrestre *Case-2 Regional Processor* (C2R), (Kiryliuk & Kratzer, 2019), do Espectrômetro de Imagem de Média Resolução (MERIS), (Schiller, 2010).

O algoritmo deriva as propriedades óticas inerentes «inherent optical properties» (IOP); o coeficiente de absorção do pigmento fitoplanctônico; o coeficiente de absorção do gelbstoff¹¹ e da matéria suspensa total (Astoreca et al. 2009), após o branqueamento da fração do pigmento fitoplanctônico (Schiller, 2010).

O processador terrestre (C2R), foi posteriormente modificado durante o [...] projeto CoastColour¹² [...] (ESA, 2011b), dando origem ao atual processador «Case 2 Regional Coast Color» (C2RCC), tema principal da presente dissertação.

O processador «Case 2 Regional Coast Color» (C2RCC), é um software que processa dados da cor dos oceanos (Kiryliuk & Kratzer, 2019), verificando-se a sua aplicabilidade em diferentes sensores como o «Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer» (MODIS); «Visible Infrared Imaging Radiometer Suite» (VIIRS); Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor» SeaWiFS e «Multispectral Instrument» (Sentinel-2 MSI) (Brockmann, 2016), e pela descontinuidade do MERIS em 2016 foi incorporado no Sentinel-3 OLCI (ESA, 2024d).

O seu principal conceito de funcionamento é fundamentado: (i) na modelagem da deslocação radiativa de água, usando a [...] teoria de transferência radiativa «Radiative Transfer Theory» (RTT), com base no Hydrolight [...] (Mobley, 2021a); (ii) no modelo

¹¹ Gelbstoff também conhecida por matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), ou substância amarela devido à sua cor quando presente em altas concentrações na água (Astoreca et al. 2009).

¹² O projeto «CoastColour» visou explorar o potencial do sensor MERIS na produção de dados relevantes para a gestão e investigação das zonas costeiras (ESA, 2011b).

atmosférico de espalhamento vetorial «successive order of scattering» (SOS); (iii) nas propriedades óticas de aerossol derivadas de medições do programa da NASA «Aerosol Robotic Network» (AERONET), (NASA, 2025a), (Kiryliuk & Kratzer, 2019).

O C2RCC (ver Figura 7), é um processador sustentado em redes neurais «Neural Network» (NN) que, desde a década de 1990, utiliza uma extensa base de dados de simulações. Esta base de dados inclui: sinais de satélite (radiâncias do topo da atmosfera); sinais de água (radiâncias de saída); as propriedades óticas inerentes «*inherent optical properties*» (IOPs); e as IOPs obtidas de medições *In Situ* do NOMAD (NASA, 2012) ¹³ (Brockmann, 2016).

Com os dados adicionais do projeto «CoastColour» (ESA, 2011b), o modelo foi aperfeiçoado, para melhor representar as águas do Caso 2, que são mais desafiadoras para a detecção remota, devido à presença de sedimentos e matéria orgânica dissolvida (Brockmann, 2016).

Em complemento à informação supra, as redes neurais operam como uma rede neural principal, cuja função específica é processar os dados do sensor para corrigir os efeitos da atmosfera, e assim, estimar a refletância de saída de água «*Water-leaving Reflectance*» (R_w), (Kiryliuk & Kratzer, 2019), que representa a luz refletida pela superfície da água após atravessar a atmosfera (IOCCG, 2018).

Uma outra rede neural, a IOP, calcula os coeficientes de absorção e dispersão da água. Estes coeficientes descrevem como a luz é absorvida e espalhada dentro da coluna d'água, ajudando a determinar as concentrações de substâncias como a clorofila, a matéria orgânica dissolvida e partículas suspensas (Kiryliuk & Kratzer, 2019).

¹³ NOMAD: «*NASA bio-Optical Marine Algorithm Dataset*», conjunto de base de dados bióticos, *In Situ*, disponível para uso no desenvolvimento de algoritmos de cores dos oceanos e para atividades de validação de produtos de dados de satélite (NASA, 2012);



Figura 7 - Esquema visual do algoritmo C2RCC

Fonte:(Brockmann, 2016)

Este processador permite a personalização de parâmetros auxiliares, para se adaptar às propriedades óticas locais. Esses parâmetros são a salinidade, temperatura, ozônio, pressão do ar e IOPs específicos, tais como, absorção da clorofila e dispersão da matéria suspensa na faixa dos 442 nm do EM (Kyryliuk & Kratzer, 2019).

Como estes parâmetros auxiliares variam regionalmente — por exemplo, a salinidade nas águas superficiais oceânicas atinge valores máximos entre as latitudes de 20º e 30º, em ambos os hemisférios, diminuindo em direção ao Equador e aos Polos — e a distribuição da temperatura depende da latitude, da profundidade, da estação do ano e da hora do dia (Brown et al. 1995), o processador permite o ajuste/calibração da correspondência local entre as IOPs e as concentrações de substâncias óticas na água (Brockmann, 2016).

O C2RCC encontra-se disponível para utilização, no software de código aberto da ferramenta «*Sentinel Application Platform*¹⁴» (SNAP), (Brockmann, 2016), da ESA, e a forma para o seu estudo e utilização poderá ser estudada no «*Webinar RUS: Monitorização de cores oceânicas com o Sentinel-3 – OCEAN 04*¹⁵».

Visto que a existência do C2RCC é uma consequência dos estudos das águas da Terra, divididas em caso 1 e caso 2, assim como, o benefício da incorporação de grandes bases de dados de simulações (Brockmann, 2016), do qual por exemplo, fazem parte as

¹⁴ SNAP: Fonte: <https://eo4society.esa.int/resources/snap/>mar2024

¹⁵ RUS Copernicus Training: Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=8s3wXj-ACDs>/mar2025

IOPs, foi entendido pelo signatário uma breve caracterização destes temas na presente dissertação.

2.4. Águas da Terra

É difícil de imaginar, mas cerca de 97% da água da Terra está presente nos oceanos (Brown, 1995). As águas naturais doces ou salinas são uma mistura de matéria dissolvida e matéria particulada¹⁶, sendo opticamente significativas e altamente variáveis ao tipo e à concentração (Mobley, 2021a).

Os constituintes da água, que afetam as suas propriedades óticas estão agrupados nas seguintes categorias: (Werdell et al. 2018).

1. Propriedades óticas aparentes (*Apparent Optical Properties* - AOPs);
2. Propriedades óticas inerentes (*Inherent Optical Properties* - IOPs), que incluem:
 - Água do mar (água + materiais inorgânicos dissolvidos);
 - Matéria orgânica dissolvida colorida (Colored Dissolved Organic Material – CDOM);
 - Fitoplâncton (Phytoplankton);
 - Partículas orgânicas não fitoplanctônicas;
 - Partículas inorgânicas;
 - Bolhas de ar ¹⁷

Esta mistura de constituintes influencia as propriedades óticas da água, que são utilizadas para deduzir informações sobre estudos de ecossistemas aquáticos, *p.ex.*, oceanografia biológica, batimetria «Light Detection and Ranging» (LIDAR), visibilidade

¹⁶ Por exemplo: «... all **particulate matter** pigmented by phytoplankton-derived pigments...» ; Fonte: <https://www.oceanopticsbook.info/view/optical-constituents-of-the-ocean/introduction-to-optical-constituents-of-the-ocean>; (Mobley, 2021a).

¹⁷ Bolhas de ar: nos oceanos são geradas principalmente pela quebra das ondas e velocidade do vento. Fonte: <https://www.oceanopticsbook.info/view/optical-constituents-of-the-ocean/air-bubbles> mai2025

subaquática e detecção remota, com foco na cor do oceano, produtividade biológica, carga de sedimentos (Werdell et al. 2018).

Estas propriedades óticas são caracterizadas pela transparência da água, em comprimentos de onda na faixa do visível EM e são opacas, em comprimentos de onda fora dessa faixa (Britannica, 2024b).

Neste contexto, destaca-se a importância da caracterização das propriedades óticas aparentes (AOPs), e inerentes (IOPs), (Werdell et al. 2018).

2.4.1. Propriedades Óticas Aparentes

As (AOPs), referem-se à forma como a luz interage com a água do mar, especialmente no que diz respeito à distribuição angular do campo de luz (IOCCG, 2000). Incluem, por exemplo, a refletância a determinados comprimentos de onda, medida a uma certa profundidade da coluna de água, o que permite a sua detecção por sensores remotos (Sutcliffe et al. 2016), (Figura 8).

Estas propriedades designam-se por aparentes porque dependem das condições de iluminação, são grandezas mensuráveis, cujo objetivo é colher informações quantitativas sobre os tipos de substâncias presentes na água (Sá, 2013), a fim de estimar as (IOPs), a partir das medições remotas (Sutcliffe et al. 2016).

2.4.2. As Propriedades Óticas Inerentes

As (IOPs), de um meio, como a água do mar, referem-se às suas características intrínsecas de absorção e dispersão da luz (ver Figura 8). Elas não dependem do campo de luz ambiente, mas apenas das propriedades físicas e químicas do próprio meio (Mobley, 2021b).

Por exemplo, um volume de água tem propriedades de absorção e dispersão bem definidas, independentemente de haver ou não luz refletida, isto significa, que as IOPs podem ser medidas tanto em laboratório quanto em *In Situ* no oceano (Mobley, 2021b).

Por outras palavras, os oceanos podem ser observados como uma «sopa» diluída de partículas suspensas e materiais dissolvidos, como fitoplâncton, zooplâncton vivo, ou materiais inorgânicos resultantes da ressuspensão¹⁸ (Bloesch, 2009), constituintes que influenciam as IOPs (Zaneveld, 2013).

A radiância espectral emitida por estas partículas constitui a base para a sua determinação por deteção remota (Figura 8), (Sutcliffe et al. 2016).

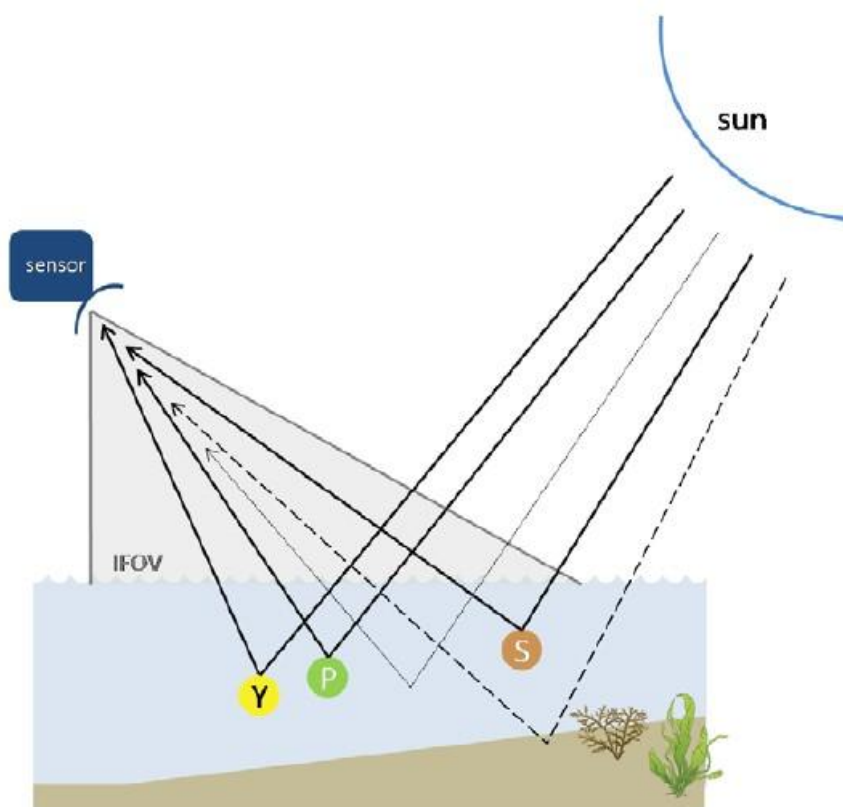


Figura 8 - Fatores que afetam a luz ascendente que sai da superfície do mar: Y - yellow substance (or CDOM); S – suspended sediment (or NAP); P – Phytoplankton; IFOV - Refere-se ao campo de visão instantâneo do sensor. Fonte: (IOCCG, 2000) e citado por (Ana Sutcliffe et al. 2016)

¹⁸ Ressuspensão, são partículas ou sedimentos que desempenham um papel fundamental nos ecossistemas aquáticos, ao fornecerem o substrato físico ou meio de suporte indispensável ao desenvolvimento e sobrevivência de numerosos organismos (Bloesch, 2009) .

2.4.3. Tipos de Água

A categorização das águas naturais é vantajosa para simplificar a modelagem ótica avaliar o desempenho de algoritmos de medição da cor do oceano (Matsushita et al. 2012).

Tradicionalmente, as águas são classificadas em dois tipos: águas do Caso 1 e águas do Caso 2, conforme a definição original de Morel & Prieur (1977).

2.4.4. Águas Caso 1 e Caso 2

As águas do Caso 1 são aquelas cujas (IOPs) são dominadas principalmente pelo fitoplâncton e pela matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM). Esse tipo de água é típico das regiões oceânicas abertas.

Por outro lado, as águas do Caso 2 incluem todas as demais águas naturais, como águas costeiras ou interiores, nas quais as propriedades óticas também são influenciadas por partículas inorgânicas em suspensão e por CDOM, independentemente da concentração de fitoplâncton (Cherif et al. 2021), (Mobley, 2020)].

A identificação dos constituintes óticos da água (IOPs) via detecção remota baseia-se na forma espectral da refletância da água do mar cujo cálculo é descrito pela Equação (1), proposta por Morel & Prieur (1977).

$$R_{(\lambda)} = E_{u(\lambda)} / E_{d(\lambda)} \quad (1)$$

- $R_{(\lambda)}$ é a refletância da água no comprimento de onda (λ).
- $E_u(\lambda)$ é a irradiância de ressurgência (upwelling irradiance), logo abaixo da superfície da água.
- $E_d(\lambda)$ é a irradiância descendente (downwelling irradiance), logo acima da superfície da água.

Segundo Morel (1988), a refletância das águas do Caso 1 apresenta um mínimo na região azul-violeta, por volta de 440 nm do EM, devido à elevada absorção da luz azul pela clo-a, pigmento predominante no fitoplâncton (Mobley, 2020).

A clorofila também apresenta um segundo pico de absorção na região vermelha, próximo aos 665 nm do EM (Mobley, 2020), enquanto há um pico de refletância na região verde (~550 nm), conferindo à água uma tonalidade esverdeada (Sutcliffe et al. 2016).

A razão entre os comprimentos de onda do azul e do verde é amplamente utilizada para estimar a concentração de clo-a (Tran et al. 2023), no entanto, esta estimativa requer o uso de técnicas numéricas avançadas que combinam teoria ótica com dados *In Situ* (Sutcliffe et al. 2016), cuja discussão será apresentada nos próximos parágrafos.

Em contraste, as águas do Caso 2 tendem a apresentar valores de refletância mais elevados ao longo de todo o espectro visível, devido à presença de sedimentos em suspensão, partículas inorgânicas e elevada turbidez, que aumentam a dispersão da radiação solar e alteram o sinal ótico observado, ou seja, que afetam a absorção da radiação solar (Brown, et al. 1995).

Nestas condições, o padrão espectral da refletância deixa de ser predominantemente controlado pela absorção da clorofila-a na região do azul (~440 nm), como ocorre nas águas do Caso 1, passando a ser fortemente influenciado pela dispersão, em particular pela retroespalhamento das partículas presentes na coluna de água, sendo comum observar-se um máximo relativo da refletância na região do verde, em torno dos 560 nm (Mobley, 2020). O aumento da refletância aumenta à medida que a turbidez¹⁹ cresce.

As relações entre a refletância espectral e as concentrações de clorofila descritas por Morel & Prieur (1977) e Gordon & Morel (1983), foram fundamentais para compreender os processos de interação e dispersão da luz na água (Brown, et al. 1995).

¹⁹ A turbidez é uma medida da transparência da água. Refere-se a uma característica ótica que indica a quantidade de luz dispersa pelas partículas presentes na água quando iluminada. É normalmente expressa em unidades de turbidez, como nephelometric turbidity units (NTU). Fonte: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/turbidity-and-water>; mai2024

Esses estudos pioneiros estabeleceram os fundamentos para o desenvolvimento de algoritmos bióticos (Engenharia, 2023), capazes de estimar IOPs a partir de medições de refletância adquiridas por sensores remotos a bordo de satélites de observação da Terra (Moutzouris-Sidiris & Topouzelis, 2021).

No entanto, o funcionamento destes algoritmos necessitam de precisão e de calibração, tornando-se fundamental o recurso a dados *In Situ*, recolhidos diretamente do ambiente terrestre ou aquático (ESA, 2011c).

2.5. Dados *In Situ*

A expressão *In Situ*²⁰ tem origem no latim — *In*, que significa “em”, e *Situ*, ablativo singular de *Situs*, que significa “situação, posição ou local”.

As observações oceânicas *In Situ* são fundamentais para a compreensão do sistema oceânico, contribuindo para a melhoria da qualidade das previsões sobre o estado dos oceanos, para o conhecimento dos ecossistemas marinhos, para a investigação climática, bem como para a validação de dados de satélite e avaliação do impacto das estratégias de gestão no setor das pescas (EU, 2021).

Entre as variáveis oceânicas mais frequentemente analisadas com observações *In Situ* encontram-se, por exemplo, a altura da superfície do mar, a velocidade do vento, a temperatura, a salinidade e a cor do oceano (Lee-Lueng Fu, 2013).

Esta última variável – cor do oceano, permite rastrear o fitoplâncton e medir a concentração de Clo-a nos oceanos (NASA, 2021).

A concentração de Clo-a pode ser medida em laboratório. Contudo, a recolha de amostras de água *In Situ* nos oceanos (Schaeffer et al. 2013; cit. In Blanco et al. 2020), é realizada com recurso a sensores instalados em diversas plataformas, como navios

²⁰ Fonte: <https://dicionario.priberam.org/in%20situ>; fev2024

hidrográficos, bóias ancoradas ou veículos operados remotamente *Remotely Operated Vehicles* (ROV) (Kriesi, 2020).

Apesar de os processos laboratoriais associados à recolha e análise das amostras *In Situ* serem morosos, exigentes e dispendiosos (Schaeffer et al. 2013; cit. in Blanco et al. 2020), a obtenção de estimativas de Clo-a a partir da cor do oceano, utilizando técnicas de deteção remota por satélite, constitui uma alternativa mais económica, eficiente e aplicável a uma escala global (Franco, 2022).

Neste contexto, destaca-se o papel da União Europeia, através da utilização de dados recolhidos pelos satélites da constelação Sentinel, no âmbito do programa Copernicus da ESA, com especial enfoque nos Sentinel-2 e Sentinel-3 (ESA, 2024a).

Importa, ainda assim, sublinhar que o valor e a fiabilidade das observações por satélite dependem da componente *In Situ* (ESA, 2011c), os quais são essenciais para a calibração e validação dos dados de deteção remota, bem como para o desenvolvimento de algoritmos de processamento e, modelos de assimilação de dados (Dickey et al. 2006), já referido anteriormente no texto desta dissertação.

A recolha *In Situ* recorre a uma variedade de sensores especializados. No caso da clo-a, destacam-se os fluorómetros, que permitem a medição de fluorescência associada ao pigmento (Aveiro, 2021), e os espectro radiómetros subaquáticos, que captam a luz remanescente em diferentes comprimentos de onda, permitindo estimativas da refletância sub-superficial (Zhang et al. 2024).

A padronização destas medições é garantida por protocolos internacionais, como os do IOCCG, e os guias metodológicos da NASA Ocean Color (Mueller et al. 2003).

Como exemplo do nível funcional destes dados, frequentemente recolhidos, releva-se o programa global **Euro-Argo** (Figura 9), que disponibiliza milhares de flutuadores à deriva em todos os oceanos (ESA, 2011c).

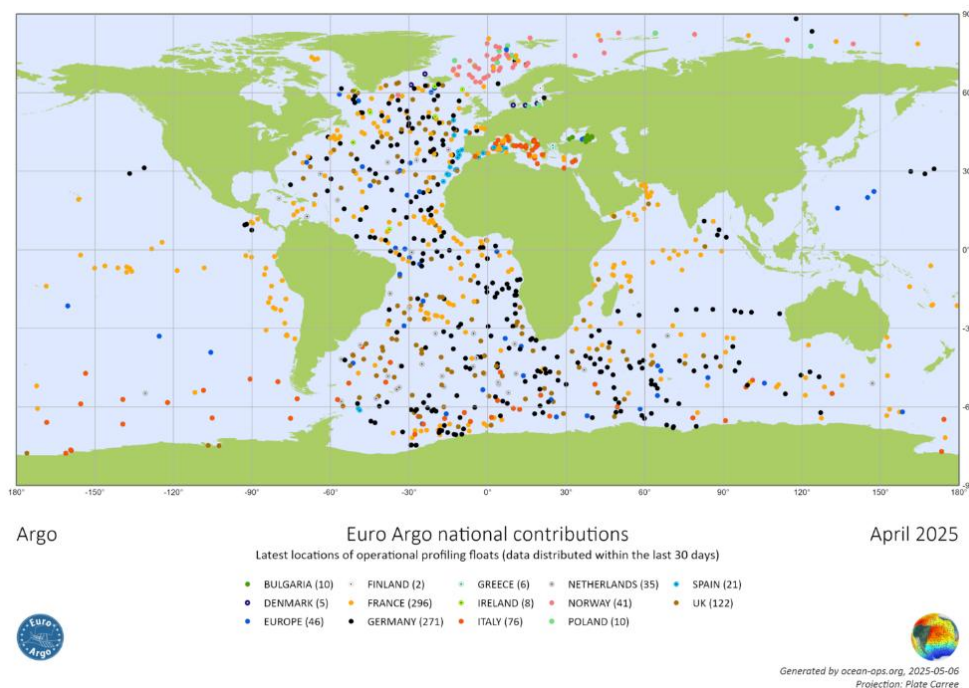


Figura 9 - Programas globais como o Euro Argos;
 Fonte: <https://www.euro-argo.eu/> mai2025

A vertente **Euro-Argo** integra sensores óticos e bioquímicos, que parametriza os valores da clo-a, oxigénio dissolvido, e turbidez (ERIC, 2025), que servem para apoio à calibração dos satélites, entre outras funcionalidades (ESA, 2011c). Outro exemplo relevante é o projeto **BOUSSOLE**²¹, no Mar Mediterrâneo, que combina medições *In Situ* contínuas com validação sistemática de satélites (NASA, 2025b).

Em síntese, qualquer programa de observação da Terra credível, deve assegurar, que os dados recolhidos por satélite são validados através de medições obtidas no terreno — ou seja dados *In Situ* (ESA, 2011c).

Tendo isto em consideração, no capítulo três iremos caracterizar os dados amostrais, que combinam observações de deteção remota e medições diretas no local - *In Situ*, bem como a respetiva área de estudo.

²¹ Fonte: https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1633360165-OB_DAAC.html; mai2025

3. Dados Amostrais e Área de Estudo

Neste capítulo, apresentam-se os dados amostrais utilizados no presente trabalho, obtidos por satélite e através das medições *In Situ*, com especial destaque para a sua abrangência geográfica (Dias, 2022a), doravante designada como área de estudo.

Os dados foram conseguidos no âmbito do projeto Aquimar²², que visa identificar locais apropriados para a aquicultura, a partir das áreas definidas no regime de planeamento do espaço marítimo «Maritime Spatial Planning» (MSP)²³, (DGRM, 2019), com base em características físicas, químicas e biológicas (Hidrográfico, 2023).

O AQUIMAR compreendeu diferentes campanhas científicas com recolha de dados *In Situ* (Hidrográfico, 2023). A área do presente estudo centra-se em duas zonas distintas da costa portuguesa (Figura 10), na costa noroeste, sensivelmente entre Caminha e a Foz do Doro, e na costa Algarvia, aproximadamente entre Sagres e Tavira, respetivamente.

3.1. Área de Estudo

Neste enquadramento, a área de estudo (Figura 10), situa-se na Zona Económica Exclusiva (ZEE), subárea do Continente (DGRM, 2018), nas coordenadas Geográficas (Tabela 1):

Tabela 1 - Coordenadas geográficas da Área de Estudo

	Norte	Sul
Área (A)	(41,735°N; -8,929°W) a (41,718°N; -9,27°W)	(41,011°N; -8,764°W) a (41,007°N; -9,27°W)
Área (E)	(37,074°N; -7,554°W) a (36,983°N; -8,999°W)	(36,963°N; -7,554°W) a (36,839°N; -8,997°W)

²² Fonte: <https://aquimar.hidrografico.pt/>; jul2025

²³ Fonte: https://oceans-and-fisheries.ec.europa.eu/ocean/blue-economy/maritime-spatial-planning_en; jul2025

Com base no polígono utilizado como extensão de corte dos dados em formato CSV, conforme descrito mais adiante neste estudo, foi possível definir as áreas de análise consideradas no presente trabalho, designadamente:

- A Área (A), apresenta uma extensão estimada de 4014,85 km²;
- A Área (E), apresenta uma extensão estimada de 5946,97 km².

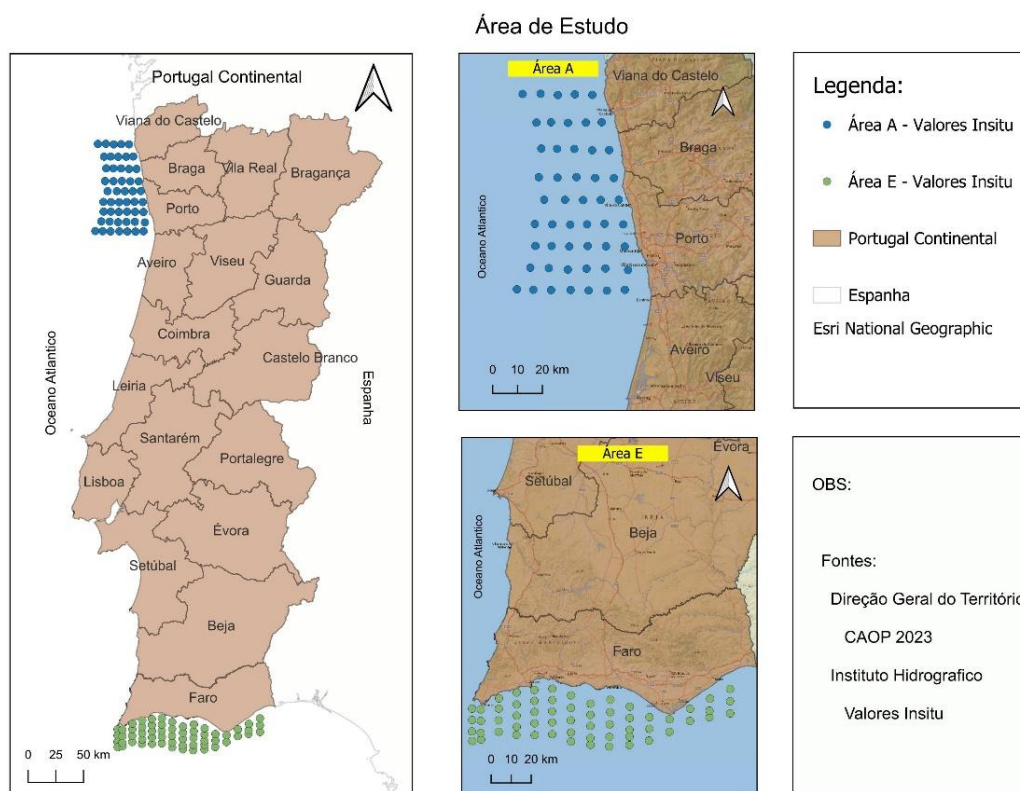


Figura 10 - Área de estudo

3.2. Dados *In Situ*

A colheita das amostras *In Situ* foram efetuadas no âmbito do Projeto Aquimar, em 5 áreas da zona costeira de Portugal Continental, denominadas (A, B, C, D, E), distribuídas por 4 campanhas oceanográficas realizadas entre outubro de 2018 a março de 2020 a bordo de duas embarcações hidrográficas da Marinha Portuguesa; o NRP D. Carlos II e o NRP Almirante Gago Coutinho (Hidrográfico, 2023).

Para o presente estudo, consideramos as quatro campanhas realizadas nas áreas (A) e (E), com os valores das concentrações de água do mar colhidas até à profundidade de 6

metros (Hidrográfico, 2023), porque é a zona onde se efetua a fotossíntese e onde os sensores dos satélites fazem a leitura da qualidade da água (Brown, et al. 1995).

Em complemento ao parágrafo anterior, identificam-se por datas as 4 campanhas realizadas nas áreas (A) e (E) (Tabela 2).

Tabela 2 - Campanhas efetuadas das recolhas de dados *In Situ*

CAMPANHAS	DATAS	ÁREA	EMBARCAÇÃO	REF
1ª campanha	18/10/2018 a 23/10/2018	A	NRP Alm. Gago Coutinho	C1A
	06/10/2018 a 23/10/2018	E		C1E
2ª campanha	05/05/2019 a 08/05/2019	A	NRP D. Carlos I	C2A
	14/04/2019 a 22/04/2019	E		C2E
3ª campanha	24/10/2019 a 26/10/2019	A	NRP Alm. Gago Coutinho	C3A
	10/10/2019 a 13/10/2019	E		C3E
4ª campanha	17/03/2020 a 19/03/2020	A	NRP Alm. Gago Coutinho	C4A
	28/02/2020 a 02/03/2020	E		C4E

Estas regiões foram selecionadas por duas causas fundamentais: (i) são as que, no projeto Aquimar, apresentam um bom número de amostras, o que pode ser uma vantagem para a interpolação posterior com as imagens de satélite; e (ii) revelam duas áreas oceanográficas distintas (Leitão, et al. 2019), com massas de água distintas (Bettencourt, et al. 2004), o que pode valorizar a investigação e os resultados.

Os dados amostrais *In Situ* foram recolhidos por meio de uma sonda multi-parâmetro Ocean Seven 320 Plus, «World Ocean Circulation Experiment- Conductivity Temperature Depth» (WOCE-CTD10), com sensores de pressão, temperatura e condutividade (CTD11) e 11 garrafas de amostragem de água Niskin de oito litros. No posicionamento geográfico foi utilizado o Global Navigation Satellite System (GNSS) processados no sistema de referência «Portugal Transverse Mercator 2006/European Terrestrial Reference System 1989» (PTTM06/ETR89) (EPSG:3763)(Dias, 2022c).

As análises das amostras foram realizadas nos laboratórios de química do Instituto Hidrográfico (IH), (Hidrográfico, 2023). A determinação da Clo-a seguiu uma modificação do método de Lorenzen (98), conforme descrito por Jeffrey & Humphrey (1975), de acordo com o procedimento aplicado pelo IH e citado por Dias (2022c).

3.3. Dados de Satélite

As imagens de satélite foram retiradas do Copernicus Data Space Ecosystem, <https://dataspace.copernicus.eu/>, o novo serviço da ESA, que oferece acesso imediato a grandes quantidades de dados de observação da Terra, abertos e gratuitos, originários dos satélites Copernicus Sentinel, que inclui as últimas imagens obtidas e o acesso ao arquivo com as imagens para o presente estudo de outubro de 2018 a março de 2020 (ESA, 2016b).

Para o processamento das imagens foi utilizada a aplicação Sentinel Application Platform 123 (SNAP), versão (9.0.0), desenvolvida pela Brockmann Consult Array Systems Computing e Cs para a ESA, cujo objetivo é o processamento de imagens científicas (ESA, 2025).

O «Simple RGB Composites (Sentinel-3)» das imagens de satélites foi calculados com base nas bandas dos 665, 560, 490 nm, que compreende a composição de cores verdadeiras nas faixas de luz visível vermelha (B04), verde (B03) e azul (B02), em RGB (8,6,4), resultando num colorido natural, que é uma boa representação da Terra (Sentinelhub, 2023).

A seleção das imagens de satélite (Tabela 3), para o cálculo da concentração de Clo-a, selecionadas com base na correspondência temporal das campanhas *In Situ* foram a base para o desenvolvimento do modelo de comparação, com os *valores In Situ*, conforme se detalha no próximo capítulo.

Tabela 3 - Seleção das imagens de satélite

CAMPANHAS	DATAS	ÁREA	IMAGENS SATÉLITE (retiradas de)	REF
1ª campanha	18/10/2018 a 23/10/2018	A	Copernicus Data Space Ecosystem Fonte: https://browser.dataspace.copernicus.eu/ ; nov2024	C1A
	06/10/2018 a 23/10/2018	E		C1E
2ª campanha	05/04/2019 a 08/05/2019	A		C2A
	14/04/2019 a 21/05/2019	E		C2E
3ª campanha	24/10/2019 a 26/10/2019	A		C3A
	10/10/2019 a 13/10/2019	E		C3E
4ª campanha	18/03/2020 a 19/03/2020	A		C4A
	28/02/2020 a 02/03/2020	E		C4E

Sobre este aspeto, no Capítulo 4, Materiais e Métodos, descreve-se de forma sistemática o processamento dos dados, a metodologia adotada, bem como a análise comparativa e estatística dos resultados obtidos.

4. Materiais e Métodos

Este capítulo descreve, os materiais e a metodologia adotada neste estudo, nomeadamente a estatística, o processamento de imagens, a elaboração e análise de mapas e o uso das ferramentas SNAP da ESA (ESA, 2025), e a aplicação QGIS 3.34.5 (QGIS, 2025).

4.1. Análise Estatística

Na análise estatística utilizada para relacionar a concentração de Clo-a obtida por satélite com os dados *In Situ*, recorreram-se ao coeficiente de correlação linear de Pearson (R) e ao coeficiente de determinação (R^2). Complementarmente, foram calculados a média ($\bar{X}$), o desvio padrão, a mediana (M), o intervalo interquartil (Interquartile Range, IQR), bem como o primeiro quartil (Q1) e o terceiro quartil (Q3), com vista à construção dos diagramas de caixa e bigodes (Pestana, 2020b) .

Além disso, aplicaram-se o erro absoluto e o erro médio absoluto (Tabela 4), (Pestana, 2020b), com o objetivo de avaliar a qualidade das medições relativamente aos valores reais. Esta avaliação encontra suporte nos dados apresentados no Capítulo 3, onde se descrevem as observações *In Situ* e os produtos de satélite, fundamentais para estabelecer a correspondência entre as diferentes fontes de informação (Cherif et al. 2021).

Tabela 4 – Indicadores estatísticos usadas na dissertação

Indicadores estatísticos	Fórmula	Legenda
Correlação de Pearson (r)	$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2][\sum (y_i - \bar{y})^2]}}$ Mede a força e direção da relação linear entre duas variáveis	r = Correlação de Pearson, x_i= valores da amostra do variável x, y_i= valores da amostra do variável y, $\bar{x}$= média do variável x, $\bar{y}$= média da variável y.
Coeficiente de Determinação (R^2)	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ Representa a proporção da variância explicada pela regressão	R^2= Coeficiente de determinação, y_i = valor observado, $\hat{y}_i$ = valor estimado pelo modelo, $\bar{y}$ = média dos valores observados, n = número de observações.
Média	$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	$\bar{X}$= A média da amostra,

	Valor médio dos dados	$\sum x_i$ = Somatório do número de observações N = Número de observações.
Mediana	Se n for ímpar $Mediana = [(n + 1)/2]^{th} \text{ term}$ Se n for par $Mediana = [(n/2)^{th} \text{ term} + \{(n/2) + 1\}^{th} \text{ term}] / 2$ Representa o ponto central de um conjunto de dados	
Desvio Padrão	$D_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$ Mede a dispersão dos dados em relação à média	Dp = Desvio Padrão, $\sum x_i$ = Número de observações, $\bar{x}$ = A média da amostra, N = Número de observações da amostra.
Intervalo Interquartil (IQR)	$IQR = Q_3 - Q_1$ Mede a dispersão da metade central de um conjunto de dados	IQR = Intervalo Interquartil, Q_3 = Terceiro quartil ou quartil superior, Q_1 = Primeiro quartil ou quartil inferior
Erro Absoluto (EA)	$AE = x_i - x $ Diferença absoluta entre o valor estimado e o valor observado	AE = Erro absoluto (<i>Absolute Error</i>), x_i = Valor real. X = Valor medido/observado.
Erro Médio Absoluto (EMA)	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - x }{n}$ Média dos erros absolutos entre os valores estimados e observados	MAE = Erro médio absoluto (<i>Mean Absolut Error</i>), n = O número da amostra, x_i = Valor real. X = Valor medido/observado, Σ = Símbolo da soma de todos os erros absolutos, $ x_i - y $ = O módulo dos erros absolutos.
Interpolação Inversa Ponderada (IDW)	$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z(x_i)}{d(x, x_i)^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d(x, x_i)^p} \right)} \wedge p$ Interpolação espacial ponderada pela distância (di), com potência (p)	$Z(x)$ = É o valor interpolado no ponto x , $Z(x_i)$ = É o valor conhecido no ponto x_i , $d(x, x_i)$ = É a distância entre o ponto x e o ponto x_i , p = É o parâmetro de potência que controla a influência da distância.

Embora subsistam outras propostas de classificação, a opção adotada neste trabalho corresponde à mais utilizada atualmente (Afonso, 2019a). Com base na tabela supra,

privilegiam-se a correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R^2), por serem os indicadores estatísticos mais recorrentes por inúmeros autores, como *p.ex.*, Moutzouris-Sidiris & Topouzelis, (2021), ou Cherif et al. (2021), na estimativa de produtos que relacionam a concentração de Clo-a com dados *In Situ*.

A correlação de Pearson (r), varia entre (-1) a (1), e mede o grau de associação linear entre duas variáveis x e y (Afonso, 2019b):

- O valor zero indica a inexistência de uma relação linear entre as duas variáveis (Sousa, 2019).
- Um (r) mais próximo de (1) indica uma relação linear positiva forte entre as duas variáveis (Sousa, 2019).
- Um (r) mais próximo de (-1), indica uma relação linear negativa forte entre as duas variáveis (Sousa, 2019).

Pestana e Gageiro (2014) « [...] *sugerem apenas por convenção, para ciências exatas, as seguintes interpretações com base nos valores absolutos de r : se $0 \leq |r| < 0,2$ não existe correlação ou é desprezável; se $0,2 \leq |r| < 0,7$ a correlação é moderada; se $0,7 \leq |r| < 0,9$ a correlação é forte; no extremo se $|r| \geq 0,9$ a correlação é muito forte* [...]» (Afonso, 2019a; Pestana, 2020a).

[...] *Quando o $|r|=0$ prefigura a inexistência de uma associação linear, isto não significa que as variáveis sejam independentes, mas antes pode existir outro tipo de associação não linear que deve ser explorada com base na teoria que a suporta* [...] (Pestana, 2020a).

Já quanto ao coeficiente de determinação (R^2) [...] *os valores assumem-se entre $0 \leq R^2 \leq 1$, e quanto mais perto estiver de +1 maior é a variação de uma variável que é explicada em média pela outra* [...] (Pestana, 2020a).

No que diz respeito com a utilização da média, trata-se de uma medida de tendência central que demonstra a concentração de dados de um determinado valor muito usado como índice estatístico (GeeksforGeeks, 2024c), o que vamos considerar na presente investigação, no entanto como é sensível a *outliers* (Pestana, 2020b), e será conjugado com outra medida de tendência central, a mediana.

A mediana representa o termo médio de um conjunto de dados, porque nos dá uma ideia de onde se encontra o valor central num conjunto de dados (GeeksforGeeks, 2024c), por sua vez é o percentil 50 no calculo interquartil, pelo que no presente estudo foi utilizada para o cálculo da média quando as distribuições apareciam com valores discrepantes, leia-se *outliers* (Pestana, 2020b).

O desvio padrão é uma medida que nos permite observar a dispersão dos dados em relação à média. Um desvio padrão baixo, ou pequeno, ou próximo de zero indica que os dados estão agrupados firmemente em torno da média (NLM, 2024), enquanto um desvio padrão elevado, indica que os pontos de dados distanciam-se em relação à média (Pestana, 2020a).

O intervalo interquartil «*Interquartil Range (IQR)*» é um conceito estatístico fundamental que nos permite entender a dispersão dos dados, sendo a distância entre o primeiro quartil (Q_1) e o terceiro quartil (Q_3) no universo do conjunto de observações, assim como, a sua variabilidade dentro dos 50% intermédios dos dados. O IQR não é afetado por *outliers* (GeeksforGeeks, 2024b).

A análise e interpretação do IQR foi efetuada com o recurso aos diagramas de caixa, mais conhecidas por «*boxplot*» ou caixa de bigodes (Pestana, 2020a), que nos permite identificar rapidamente os valores médios, a dispersão, a simetria, assim como, os valores discrepantes, leia-se *outliers*, dentro de um conjunto de dados (Mcleod, 2023).

No sentido de ilustrar as principais características da distribuição dos dados de forma conveniente recorreu-se a dois modelos de histograma (Canada, 2021): o gráfico de barras adjacentes; o gráfico de valores acumulados ou de Pareto; o gráfico de dispersão.

- «[...] O gráfico de barras adjacentes muito aplicado em variáveis métricas, onde a área de cada barra corresponde à frequência da classe a que respeita e em que a área total representa a totalidade das observações, [n ou 1] consoante a frequência seja absoluta ou relativa [...]» (Pestana, 2020b).
- O gráfico de valores acumulados ou de Pareto, ou histograma ordenado, contém colunas dispostas por ordem decrescente e uma linha que representa a percentagem total acumulada. «[...] Os gráficos de Pareto destacam os

principais fatores num conjunto de dados e são considerados, uma das sete ferramentas básicas do controlo da qualidade, pois facilitam a visualização dos problemas ou questões mais frequentes[...]» (Microsoft, 2025).

- O gráfico de dispersão é utilizado para representar a relação entre duas variáveis num gráfico bidimensional, conhecido como plano cartesiano. Normalmente, representa-se a variável independente no eixo x e a variável dependente no eixo y, permitindo visualizar de que forma a primeira, influência a segunda (Geeksforgeeks, 2024d).

Neste trabalho, tornou-se muito útil para comparar as diferenças entre as amostras dos valores reais da Clo-a *In Situ*, com os valores da Clo-a estimada a partir das imagens de satélite, como adiante no Capítulo 6 - Discussão dos resultados poderemos assinalar.

O erro absoluto é a diferença entre o valor observado ou medido e o valor real. enquanto o erro relativo, expressa essa diferença como uma percentagem do valor verdadeiro (Geeksforgeeks, 2024a), que para o presente estudo foram indicadores que nos possibilitaram estimar a precisão dos valores dados pelo modelo²⁴ (Microsoft, 2023), em relação aos valores reais, leia-se valores *In Situ*.

Em complemento ao erro absoluto e relativo, a estima da precisão dos valores aferidos foi completada com o erro médio absoluto «*Mean Absolute Error*» (MAE), métrica que nos refere a média de todos os erros absolutos dos dados reunidos entre valores estimados e verdadeiros/reais (Geeksforgeeks, 2024a).

A escolha desta métrica (MAE), na presente dissertação, prendeu-se pelo facto do seu constante uso por diversos autores na solução de problemas de regressão e avaliação de modelos, assim como a sua robustez a *outliers* o tornar particularmente útil em situações em que valores extremos possam influenciar significativamente o cálculo do erro (Soulpage, 2023).

²⁴ Algoritmo C2RCC (ver subcapítulo (2.3)).

Em complemento às escolhas estatísticas anteriores foi também utilizado na presente investigação uma técnica de interpolação para se perceber como a variável Clo-a se comportava espacialmente na área de estudo.

Várias técnicas de interpolação são utilizadas em software de sistema de informação geográfica (SIG), dos quais se destacam como exemplos ilustrativos a interpolação de Splines, interpolação de vizinhos naturais, ou polígonos de Theissen (Li, 2013); para uma lista mais exaustiva ver Li e Heap (2013).

No entanto é interessante recordar que nenhuma técnica de interpolação, por si só, parece ser universalmente ótima, todavia as técnicas evidenciam ter um bom desempenho obedecendo à natureza da variável que está a ser interpolada (Munyati, 2021), como adiante poderemos verificar.

No âmbito deste estudo, vamos considerar a seleção de uma das duas técnicas mais comuns: a interpolação por Kriging ou a distância inversa ponderada « *Inverse Distance Weighted* » (IDW) (Munyati, 2021).

A interpolação por Kriging divide-se em: Kriging ordinário, simples, universal, probabilístico, indicativo e disjuntivo (ESRI, 2021b). O Kriging depende de modelos matemáticos e estatísticos o que inclui desde logo a existência da probabilidade (ESRI, 2021a), leia-se «[...] presença de alguma incerteza quando se pretende obter conclusões para o todo, *p.ex.*, deduzir ou extrapolar dados [...]» (Afonso, 2019b).

Os métodos de Kriging estão dependentes da noção de autocorrelação, isto é, a correlação é geralmente considerada como a tendência de dois tipos de variáveis se relacionarem entre elas (ESRI, 2021a).

Dos diferentes tipos de Kriging existentes, nas mais usadas por exemplo, o Kriging ordinário e o Kriging simples, uma das principais premissas «[...] é a variável de interesse ter uma média constante em toda a área de estudo, mas por vezes há razões científicas, para rejeitar esta suposição e necessidade de autocorrelação [...]» (ESRI, 2021c).

Esta «[...] ...suposição... [...]» (ESRI, 2021c), exigiu do signatário alguma cautela no raciocínio, porque estimar valores de Clo-a em locais não amostrados no oceano – como

é a área de estudo do presente trabalho, com uma «[...] média constante [...]» (ESRI, 2021c), num ambiente altamente dinâmico como é o oceano (Maxwell, 2015), onde os níveis de Clo-a variam significativamente (Britannica, 2024a), devido a fatores como:

- a. Variabilidade sazonal: As concentrações de Clo-a podem mudar com as estações do ano devido à variação na luz solar, temperatura da água e disponibilidade de nutrientes (Brown, et al. 1995).
- b. Variações geográficas: Áreas costeiras, estuários e zonas de ressurgência costumam ter concentrações de Clo-a diferentes das regiões oceânicas mais profundas e afastadas (Britannica, 2024a).
- c. Eventos esporádicos: Fenômenos como afloramentos, tempestades e interações com correntes oceânicas podem alterar rapidamente as concentrações de Clo-a numa área específica (Chen, 2020).

Levaram o signatário, a ponderar que a opção pela interpolação Kriging poderia não seria a melhor solução, pelo que se avaliou a escolha do método IDW.

A interpolação IDW pertence à família determinística de técnicas de interpolação, que são sustentadas diretamente nos valores envolventes do ponto da amostra (Geography, 2024a), ou em fórmulas matemáticas reconhecidas (Gimond, 2023), para circunscrever a suavidade da interpolação resultante (Munyati, 2021).

A premissa básica do IDW é que «[...] *objetos que estão mais próximos uns dos outros são mais semelhantes do que os que estão mais distantes* [...] » – Primeira lei da Geografia de Tobler (Geography, 2024b).

O princípio anterior confirma-se na fórmula matemática (ver Tabela 4 - 8ª equação), pelo parâmetro de potência (p). Por padrão o (p) é igual a 2, ou seja, é o inverso da distância elevado a uma potência matemática de base 2 (ESRI, 2024a).

- a. Se (p) for maior, os valores interpolados começam a aproximar-se do valor do ponto de amostra mais próximo (ESRI, 2024a) - «[...] *objetos que estão mais próximos uns dos outros são mais semelhantes* [...] » (Geography, 2024b).
- b. Se (p) for menor, a influência dos pontos distantes aumenta exibindo uma superfície raster mais suave com menos detalhe (ESRI, 2024a)

A interpolação do IDW tem como vantagens: simplicidade no uso; é um método de baixo custo computacional que depende somente do número de amostras pontuais e de pontos de prognóstico (geralmente os pixels), (Pesquer et al. 2010); [...] não tem necessidade [...] de variograma²⁵ [...] (ODonohue, 2023), diferente da Kriging que exige o variograma para o cálculo (Munyati, 2021).

Para além das vantagens anteriores descobriu-se que o IDW sob condições de elevada autocorrelação espacial, é igual e por vezes mais bem-sucedido do que a Kriging [(Boman et al. 1995), (Gong et al. 2014; Gotway et al. 1996)].

Em complemento ao parágrafo anterior, destaca-se que os métodos de interpolação IDW e kriging [...] foram comparados para expressar a concentração de Clo-a num mapa de distribuição espacial, com o recurso ao coeficiente de determinação (R^2) de Pearson, e o erro quadrático médio *Root Mean Square Error* (RMSE) [...] (Kim et al. 2022).

[...] Os resultados obtidos indicaram que o método IDW apresentou valores de R^2 mais elevados e valores de RMSE inferiores aos do método de Kriging, evidenciando um melhor desempenho na estimativa das concentrações de Clo-a [...] (Kim et al. 2022).

Em consonância com os estudos prévios efetuados e considerando a análise comparativa das vantagens e limitações de ambos os métodos, o IDW foi selecionado como a técnica de interpolação mais adequada para o presente trabalho.

Posto isto, definida a técnica de interpolação, segue-se a exposição da metodologia aplicada na presente dissertação.

²⁵ O variograma constitui uma ferramenta fundamental da geoestatística, permitindo avaliar a autocorrelação espacial. Quantifica o grau em que a semelhança entre os valores de dados diminui à medida que aumenta a distância entre os pontos, revelando estruturas espaciais e padrões de dependência nos dados analisados (ESRI, 2025).

4.2. Metodologia

A metodologia utilizada nesta dissertação assentou num conjunto de objetivos pré-estabelecidos, conforme assinalado no Capítulo 1 ver subcapítulo (1.1) – Objetivos do Trabalho, aos quais se procurou dar resposta seguindo o fluxo seguinte (Figura 11).

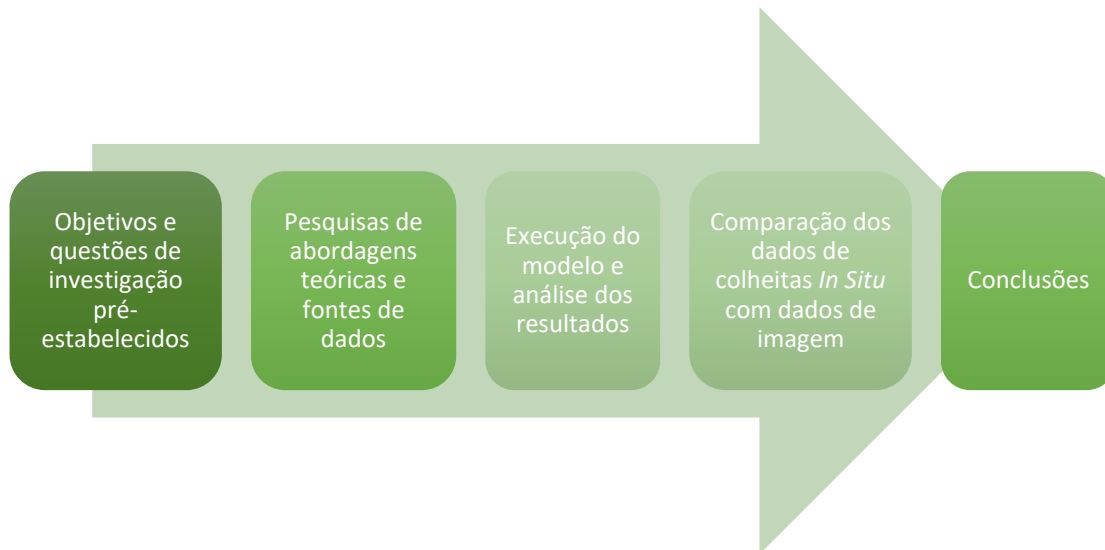


Figura 11 - Fluxo de trabalho seguido na metodologia

Neste pressuposto, foi realizado um «[...] conjunto de pesquisas de abordagens teóricas e de fontes de dados [...]» (Miranda, 2009), recorrendo a sites da internet, publicações científicas, intensa bibliografia e outras fontes, «[...] combinando dois ou mais pontos de vista [...]» (Miranda, 2009), sobre o mesmo tema, com o objetivo de responder ao conjunto de questões formuladas.

Adicionalmente, cumpriu-se a estrutura referida no subcapítulo (1.2) – Estrutura, culminando com a execução do modelo, a respetiva análise de resultados e a apresentação das conclusões finais.

Por fim, deu-se início à análise dos dados, começando pelos valores temporais de clorofila *In Situ* na área de estudo (ver Tabela 2), através da interpolação com recurso ao método IDW.

Para o cálculo dos valores de clorofila foi utilizada a ferramenta nativa de interpolação IDW, do QGIS 3.34.5, tendo sido considerado um pixel de 300 metros, de forma a

possibilitar a comparação com a [...] resolução espacial das imagens do Sentinel-3, que é também de 300 metros[...] (ESA, 2024d) .

No que diz respeito à seleção das imagens de satélite para o cálculo da concentração de Clo-a:

- a. Na área A foram escolhidas as imagens de: 20 de outubro de 2018, 05 de abril de 2019, 24 de outubro de 2019, 18 de março de 2020. As restantes imagens das campanhas desta área, não puderam ser editadas porque estavam com uma grande área coberta por nebulosidade (ver Tabela 5).
- b. Na área E foram escolhidas as imagens de: 17 de outubro de 2018, 14 de abril de 2019, 10 de outubro de 2019, 28 de fevereiro de 2020. As restantes imagens das campanhas desta área, não puderam ser editadas porque estavam com uma grande área coberta por nebulosidade (ver Tabela 5).

Tabela 5 - Imagens selecionadas para o cálculo da Clo-a

CAMPANHAS	IMAGEM SELECIONADA (S/nuvens)	AREA	IMAGENS NÃO SELECIONADAS (C/nuvens)	REF
1ª campanha	20/10/2018	A	18, 19, 21, 22, 23 (outubro de 2018)	C1A
	17/10/2018	E	06 a 16 e 18 a 23 (outubro de 2018)	C1E
2ª campanha	05/04/2019	A	06, 07, 08 (abril de 2019)	C2A
	14/04/2019	E	14 a 21 (abril de 2019)	C2E
3ª campanha	24/10/2019	A	25 a 26 (outubro de 2019)	C3A
	10/10/2019	E	11 a 13 (outubro de 2019)	C3E
4ª campanha	18/03/2020	A	17 e 19 (março de 2020)	C4A
	28/02/2020	E	29 fevereiro a 02 (março de 2020)	C4E

No seu processamento e edição recorreu-se ao algoritmo C2RCC disponível no menu «*Optical*» do SNAP, tendo sido necessário programar o processador (Brockmann, 2016), com os valores médios da salinidade e temperatura ver sub-anexos (8.2.1), (8.2.2), para as zonas da área de estudo, retirados/calculados das tabelas de atributos dos dados *In Situ* tal como descrito no subcapítulo (0).

O resultado da exportação da aplicação do algoritmo C2RCC para o ambiente SIG, não seguiu as recomendações do «...RUS Webinar - Ocean Colour Monitoring with Sentinel-3 - OCEA04...»²⁶ que refere «...exportar a banda clo-a em ficheiro GeoTIFF...».

A exportação neste formato Geotiff originava um erro, não apresentava os valores corretos da Clo-a existentes na aplicação nativa SNAP – a banda única Clo-a; exportava as 3 bandas - Red, Green, Blue (RGB), em lugar da banda Clo-a.

Este erro foi contornado com a exportação do resultado da aplicação do algoritmo C2RCC para o ambiente SIG, num ficheiro em formato Multidimensional Network Common Data Form (NetCDF4-C) (Lau, 2023; ESRI, 2024b), tal como descrito no sub-apêndice (9.1).

De seguida, foi criado um script em Python²⁷ (ver sub-apêndice 9.1.2), com o objetivo de ler o ficheiro NetCDF-4 e convertê-lo posteriormente num ficheiro Comma-Separated Values (CSV), contendo os valores da banda Clo-a.

Após a importação dos ficheiros CSV para o (QGIS 3.34.5), (ver sub-apêndice 9.1.3), procedeu-se à sua conversão para o formato shapefile com o sistema de referência EPSG:3763 (<https://epsg.io/3763>). De seguida, foram gerados as superfícies raster correspondentes à concentração de Clo-a, a partir das imagens.

A criação das superfícies raster exigiu a adoção de um método específico por parte do signatário, de modo a assegurar a compatibilidade do produto final com a aplicação QGIS.

Neste contexto, a conversão dos ficheiros CSV para shapefile resultou numa extensa malha de pontos, tal como descrito no sub-apêndice (9.1.3), que ultrapassava de forma significativa a área geoespacial das colheitas *In Situ*.

Assim, considerou-se adequado proceder ao recorte dessa malha de pontos (vulgo clip em SIG), de modo a ultrapassar o erro detetado no QGIS aquando do recorte de pontos e linhas no QGIS.

²⁶ Fonte: RUS Copernicus Training « <https://www.youtube.com/watch?v=8s3wXj-ACDs> » jan2025

²⁷ Criado na biblioteca Spider (Python 3.9), do signatário em Sun Nov 10 12:06:28 2024

Este procedimento permitiu restringir a malha apenas à área correspondente às estações *In Situ* e à linha de costa portuguesa, relativa a cada área de estudo em análise.

Para permitir uma comparação direta entre os dados de Clo-a obtidos *In Situ* e os valores extraídos das imagens de satélite Sentinel-3, recorreu-se à ferramenta nativa do QGIS «Amostrar valores de raster» (Raster → Extração → Amostrar valores de raster).

O procedimento anterior possibilitou a extração, para cada ponto de colheita *In Situ*, do valor correspondente da banda de Clo-a da imagem, assegurando a correspondência espacial exata entre ambos os conjuntos de dados (ver sub-subcapítulo (5.3))²⁸

A coloração dos mapas *raster* da concentração de Clo-a, foi realizada com recurso à paleta de cores *Greens*, pertencente à classe de cores sequencial (Matplotlib, 2012).

A escolha desta classe de cores, prende-se com o facto de ser particularmente adequada, para representar informações que tenham ordem num conjunto de dados espaciais (Matplotlib, 2012), em que [...] tons de verde são usados para destacar a presença de Clo-a [...] (Blanco et al. 2020).

Para além da aplicação da rampa de cores *Greens* na elaboração dos mapas temáticos no QGIS, foi utilizada na legenda uma simbologia classificada em sete classes, opção frequentemente adotada no ensino e na prática da cartografia temática em SIG, por permitir uma adequada discriminação dos intervalos de valores sem comprometer a legibilidade, assegurando um equilíbrio entre o nível de detalhe espacial e a clareza cartográfica.

Esta opção, permitiu uma comparação mais consistente entre os mapas derivados dos dados *In Situ* e os obtidos a partir das imagens de satélite, constituindo um apoio relevante na análise e validação dos resultados.

Como ferramentas de trabalho, foi utilizado o Notepad ++ (versão 8.7.5), para a inspeção e validação dos ficheiros de dados. Para a análise estatística dos valores de Clo-

²⁸ Fonte:

https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rasteranalysis.html#qgisrastersampling; jun2025

a, tanto *In Situ* como obtidos a partir das imagens, recorreu-se às funcionalidades disponibilizadas pelo SNAP, QGIS e Microsoft Excel, especialmente:

No SNAP utilizou-se a função histograma para a amostragem dos valores da Clo-a.

No QGIS recorreu-se à utilização da sua ferramenta nativa «Sample Raster Value», para extrair os valores dos píxeis dos *rasters* da banda Clo-a.

No Excel recorreram-se às funcionalidades de análise estatística, incluindo o cálculo de medidas de tendência central e dispersão, a correlação de Pearson, a elaboração de histogramas e diagramas de caixa e bigodes, bem como a construção de gráficos de dispersão com linhas de tendência e respetivo coeficiente de determinação (R^2).

Ainda no Excel, na construção dos histogramas para comparar num gráfico de colunas duplas (Imagem versus *In Situ*), e a respetiva linha de Pareto para a imagem (ver anexo (8.4), verificou-se que esta não era gerada automaticamente. A razão, prende-se com a explicação infra.

«[...] Apesar de o Microsoft Excel incluir, desde a versão de 2016, a funcionalidade de criação automática de Gráficos de Pareto, esta aplica-se apenas à análise de um único conjunto de dados categorizado (Microsoft, 2025) [...].

«[...] A comparação simultânea entre dois conjuntos distintos (por exemplo, valores *In Situ* versus valores de imagem), com respetivas linhas de Pareto, exige uma construção manual, incluindo o uso de fórmulas auxiliares, ordenação personalizada e gráficos combinados, não estando essa funcionalidade disponível de forma predefinida (Walkenbach, 2013) [...]».

A solução encontrada passou, então, pela construção manual do gráfico de valores acumulados ou de Pareto, seguindo os passos que se podem observar no sub-apêndice (9.2.1).

Em sùmula, esta metodologia (Figura 11), permitiu estimar a concentração de Clo-a, cujos resultados serão discutidos no próximo capítulo, à luz dos produtos gerados e da sua comparação com os dados *In Situ*.

5. Resultados

Muito sumariamente merece referência que no ambiente marinho, a Clo-a é um proxy da biomassa de fitoplâncton. Tons de verde são usados para destacar a presença de Clo-a, em que verdes escuros de alta intensidade indicam maiores concentrações de fitoplâncton, o que denota regiões muito produtivas dos oceanos (Blanco et al. 2020).

Referir também, que os mapas de Clo-a apresentam como unidade, miligramas de clorofila por metro cúbico e concentrações entre 0 a 30 mg/m³ Morel (1988), (Dias, 2022b).

O presente capítulo, apresenta todos os mapas temáticos resultantes da investigação, bem como a respetiva análise estatística, permitindo a caracterização espacial e a interpretação quantitativa dos padrões observados.

5.1. Mapas Temáticos — Valores *In Situ*

Com o intuito de aprofundar a análise estatística das superfícies raster resultantes da interpolação pelo método do IDW, aplicadas aos valores de Clo-a *In Situ* da Área A (Figuras 12 - 15), procedeu-se à construção da Tabela 6, onde se apresentam e analisam os principais indicadores estatísticos.

O mesmo procedimento foi adotado para os valores Clo-a *In Situ* da Área E (Figuras 16 - 19), cujos resultados se encontram sintetizados na Tabela 7, onde se resumem e interpretam os principais parâmetros obtidos.

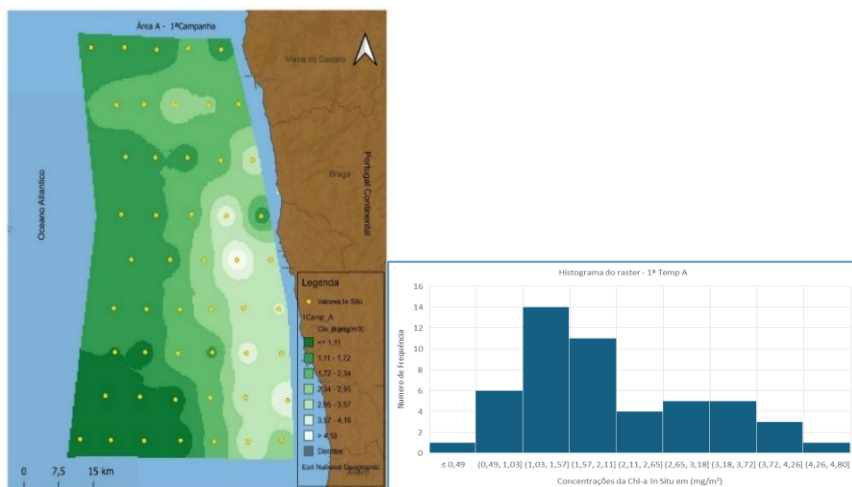


Tabela 6 - Dados amostrais Clo-a *In Situ* - Área A

Valores clo-a <i>In Situ</i> da área A – 4 temporadas											
Temporadas/Área	Histograma de barras						Histograma de valores acumulados				
	Figuras	Intervalo (mg/m ³)		Nº Max de frequências	Intervalo das frequências (mg/m ³)		Gráficos	80% = Intervalo (mg/m ³)		20% = Intervalo (mg/m ³)	
		Min	Max		Min	Max		Min	Max	Min	Max
1ªTemp A	Figura 12	≤0,49	3,57	14	1,03	1,57	(Gráfico 1)	0,49	3,57	2,34	4,80
2ª Temp A	Figura 13	≤0,70	14	16	0,70	4,92	(Gráfico 2)	0,7	4,5	6,4	14
3ªTemp A	Figura 14	≤0,29	3,60	18 e 19	0,29	1,39	(Gráfico 3)	0,29	1,24	1,24	3,63
4ªTemp A	Figura 15	≤0,13	2,45	25	0,13	0,52	(Gráfico 4)	0,13	0,79	0,79	2,45

De acordo com a Tabela 6, representativa das colheitas de amostras de Clo-a realizadas na **área de estudo A** durante quatro temporadas, e com base nos mapas temáticos apresentados nas (Figuras 12 - 15), verifica-se o seguinte:

- Nos histogramas de barras adjacentes, observam-se concentrações de Clo-a *In Situ* compreendidas entre ≤0,13 e 3,60 mg/m³, registrando-se a frequência máxima de 25 observações (Figura 15).
- Na análise dos histogramas de frequências acumuladas, constata-se que 80% dos dados de concentração de Clo-a se encontram no intervalo entre 0,13 a 4,5 mg/m³, enquanto os 20% remanescentes se distribuem entre 0,79 a 4,80 mg/m³.

Estes dados permitem estimar uma distribuição espacial de concentrações de Clo-a com valores considerados ótimos, segundo Morel (1988) citado por Dias (2022d), para esta área A.

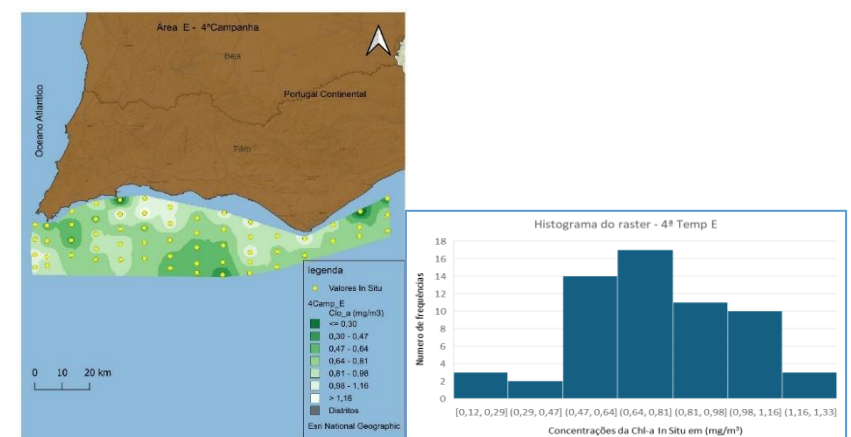
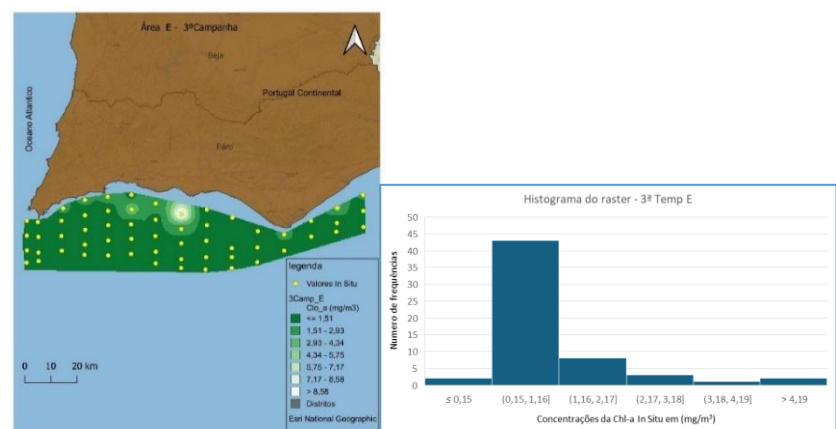
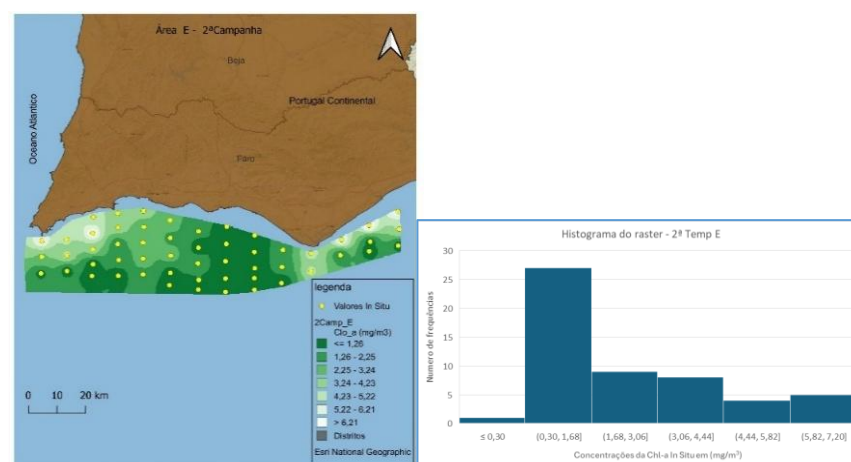
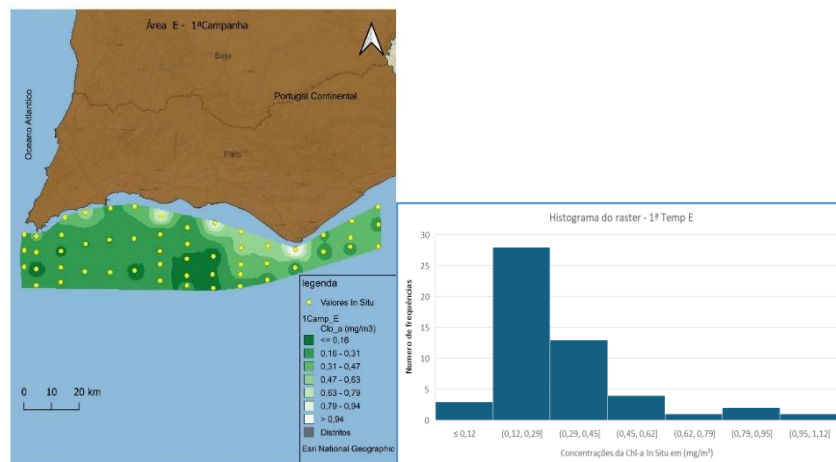


Tabela 7 - Dados amostrais Clo-a *In Situ* - Área E

Valores clo-a <i>In Situ</i> da área E – 4 temporadas											
Temporadas/Área	Histograma de barras adjacentes						Histograma de valores acumulados				
	Figuras	Intervalo (mg/m ³)		Nº Max de frequências	Intervalo das frequências (mg/m ³)		Gráficos	80% = Intervalo (mg/m ³)		20% = Intervalo (mg/m ³)	
		Min	Max		Min	Max		Min	Max	Min	Max
1ªTemp E	Figura 16	≤0,12	1,12	28	0,12	0,29	(Gráfico 5)	0,10	0,30	0,30	1,10
2ªTemp E	Figura 17	≤0,30	7,20	27	0,30	1,68	(Gráfico 6)	0,27	3,04	3,04	7,20
3ªTemp E	Figura 18	≤0,15	4,19	44	0,15	1,16	(Gráfico 7)	0,12	1,34	1,34	5,00
4ªTemp E	Figura 19	0,12	1,33	17	0,64	0,81	(Gráfico 8)	0,56	1,00	1,00	1,44

De acordo com a Tabela 7, representativa das colheitas de amostras de Clo-a realizadas na **área de estudo E**, durante quatro temporadas, e com base nos mapas temáticos s apresentados nas (Figuras 16 - 19), verifica-se o seguinte:

- Nos histogramas de barras adjacentes, observam-se concentrações de Clo-a *In Situ* compreendidas entre $\leq 0,12$ e $7,20 \text{ mg/m}^3$, registrando-se a frequência máxima de 44 observações (Figura 18).
- Na análise dos histogramas de frequências acumuladas, constata-se que 80% dos valores de concentração de Clo-a se encontram no intervalo entre 0,10 e $3,04 \text{ mg/m}^3$, enquanto os 20% remanescentes se distribuem entre 0,30 e $7,20 \text{ mg/m}^3$.

Estes dados, permitem estimar uma distribuição espacial de concentrações de Clo-a com valores considerados ótimos, segundo Morel (1988), citado por Dias (2022d), para esta área E.

5.2. Mapas Temáticos — Valores Extraídos das Imagens

Com o intuito de uma melhor análise dos dados estatísticos dos nos mapas temáticos, resultantes das imagens da banda da Clo-a da área A nas (Figuras 20 - 23), optou-se pela construção da Tabela 8, onde se resumem e interpretam os principais parâmetros obtidos.

O mesmo procedimento foi adotado para os valores das imagens da banda da Clo-a da área E nas (Figuras 24 - 27), apresentados na Tabela 9, onde são igualmente referidos e analisados os principais indicadores estatísticos.

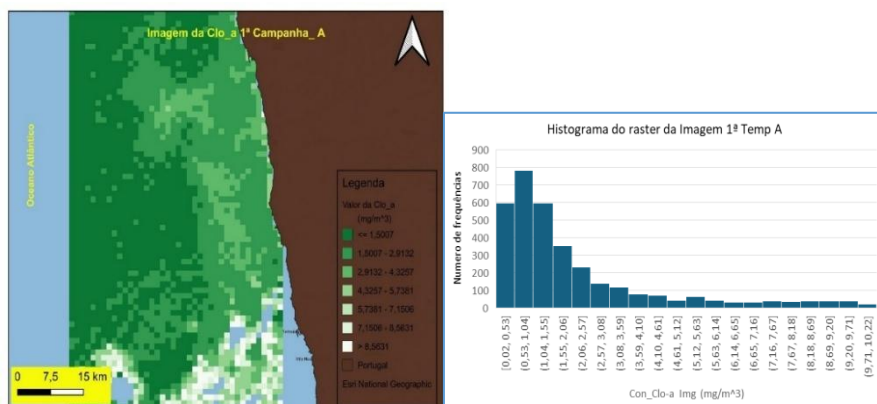


Figura 20 - Resultados da primeira campanha, área A: a) valores Imagem Clo-a; b) Histograma dos valores registados

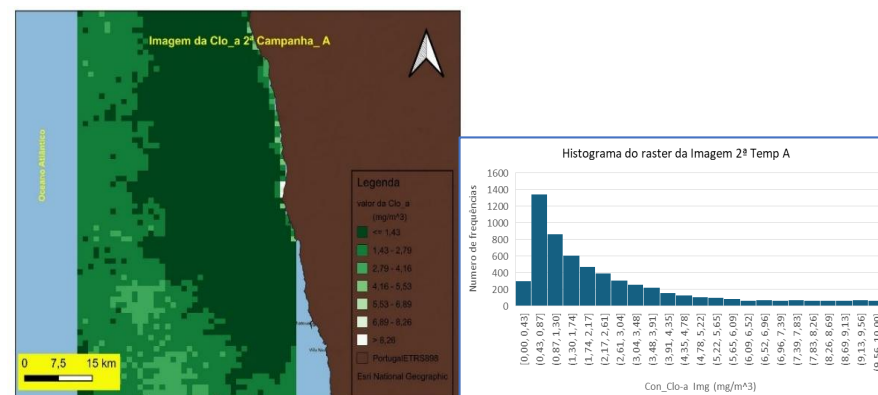


Figura 21 - Resultados da segunda campanha, área A: a) valores Imagem Clo-a; b) Histograma dos valores registados

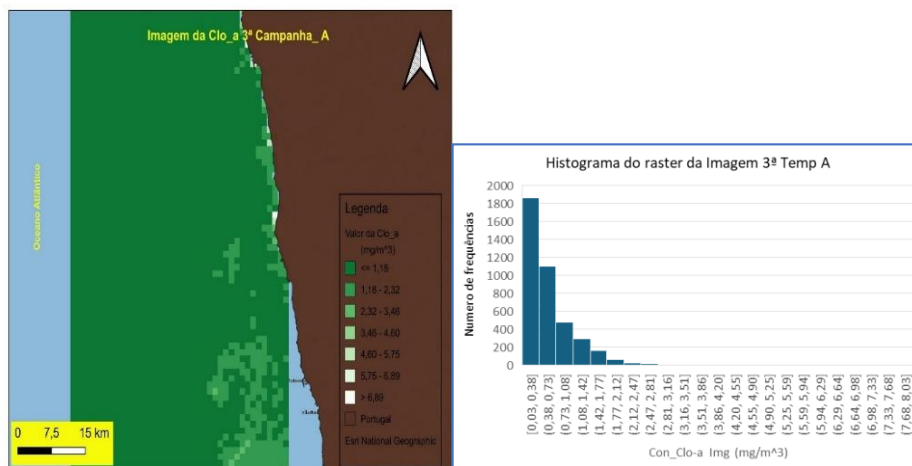


Figura 22- Resultados da terceira campanha, área A: a) valores Imagem Clo-a; b) Histograma dos valores registados

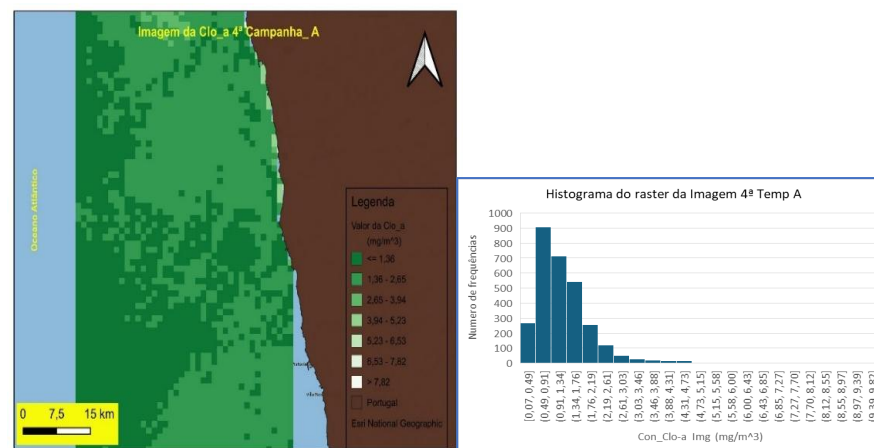


Figura 23 - Resultados da quarta campanha, área A: a) valores Imagem Clo-a; b) Histograma dos valores registados

Tabela 8 - Dados amostrais Clo-a Imagens - Área A

Valores clo-a das imagens rasters da área A – 4 temporadas											
Temporadas/Área	Histograma de barras adjacentes						Histograma de valores acumulados				
	Figuras	Intervalo (mg/m ³)		Nº Max de frequências	Intervalo das frequências (mg/m ³)		Gráficos	80% = Intervalo (mg/m ³)		20% = Intervalo (mg/m ³)	
		Min	Max		Min	Max		Min	Max	Min	Max
1ªTemp A	Figura 20	0,02	10,22	600 a 780	0,02	1,55	(Gráfico 9)	0,53	2,57	2,57	10,22
2ªTemp A	Figura 21	0,00	10,00	1380	0,43	0,87	(Gráfico 10)	0,44	3,52	3,52	10,52
3ªTemp A	Figura 22	0,03	8,03	1850	0,03	0,38	(Gráfico 11)	0,03	0,73	0,73	7,68
4ªTemp A	Figura 23	0,07	4,73	900	0,49	0,91	(Gráfico 12)	0,49	1,76	0,07	8,55

De acordo com a Tabela 8, representativa dos dados amostrais da Clo-a Imagens realizadas na **área de estudo A** durante quatro temporadas, e com base nos mapas temáticos apresentados nas (Figuras 20 - 23), verifica-se o seguinte:

- Nos histogramas de barras adjacentes, observam-se concentrações de clo-a compreendidas entre 0,00 e 10,22 mg/m³, registando-se a frequência máxima de 1850 observações na Figura 22.
- Na análise dos histogramas de frequências acumuladas, constata-se que 80% dos valores de concentração de Clo-a se encontram no intervalo entre 0,03 a 3,52 mg/m³, enquanto os 20% remanescentes se distribuem entre 0,07 a 10,52 mg/m³.
- A análise do histograma de frequências acumuladas (ver Gráfico 11), mostra que os 20% restantes se distribuem-se entre 0,73 e 7,68 mg/m³, em que os valores compreendidos entre 2,81 e 7,68 mg/m³ são iguais a zero.
- A análise do histograma de frequências acumuladas (ver Gráfico 12), indica que os 20% restantes distribuem-se entre 0,07 e 4,73 mg/m³, em que os valores compreendidos entre 4,73 e 8,55 mg/m³, são iguais a zero.

Estes dados apesar de valores iguais a zero permitem estimar uma distribuição espacial das concentrações de Clo-a compatível com os níveis considerados normais para a área em estudo A segundo Morel (1988), citado por Dias (2022d).

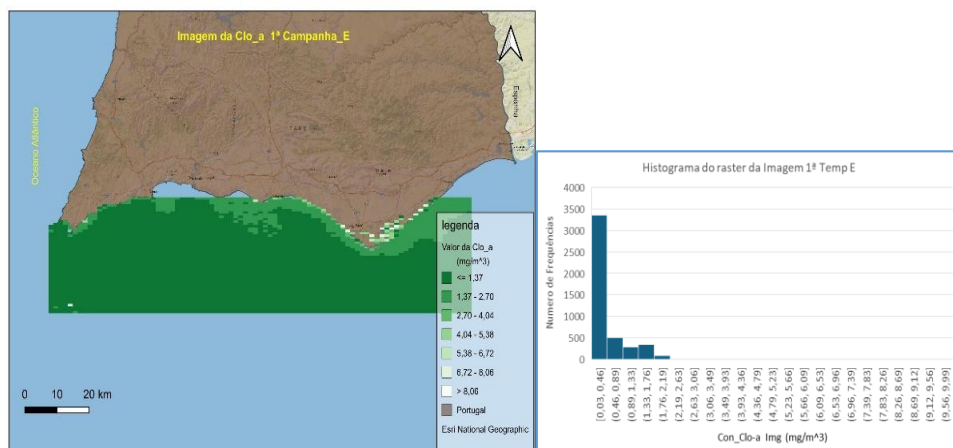


Figura 24 - Resultados da primeira campanha, área E: a) valores Imagem Clo-a; b) Histograma dos valores registados

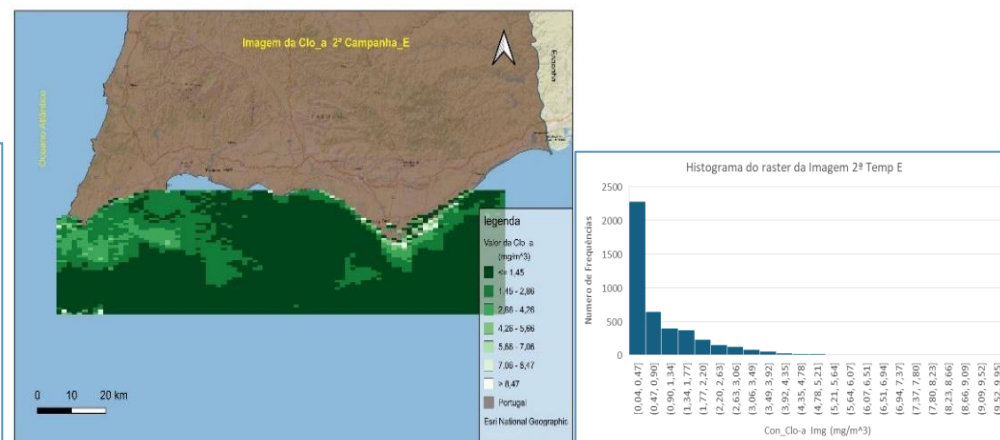


Figura 25 - Resultados da segunda campanha, área E: a) valores Imagem Clo-a; b) Histograma dos valores registados

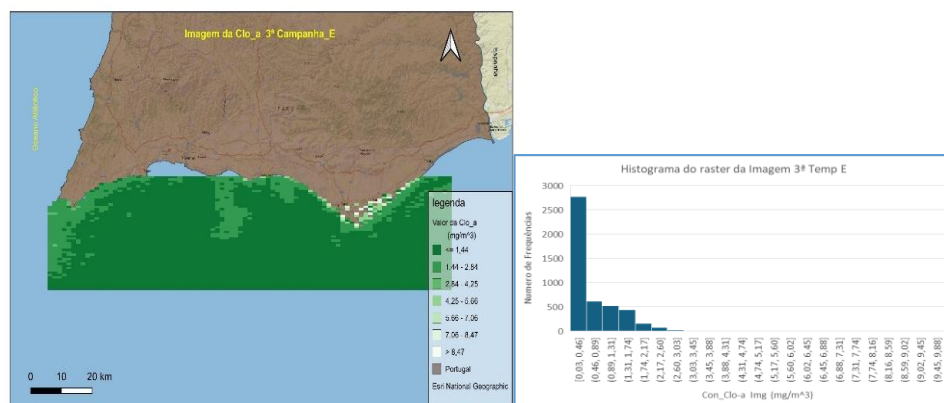


Figura 26- Resultados da terceira campanha, área E: a) valores Imagem Clo-a; b) Histograma dos valores registados

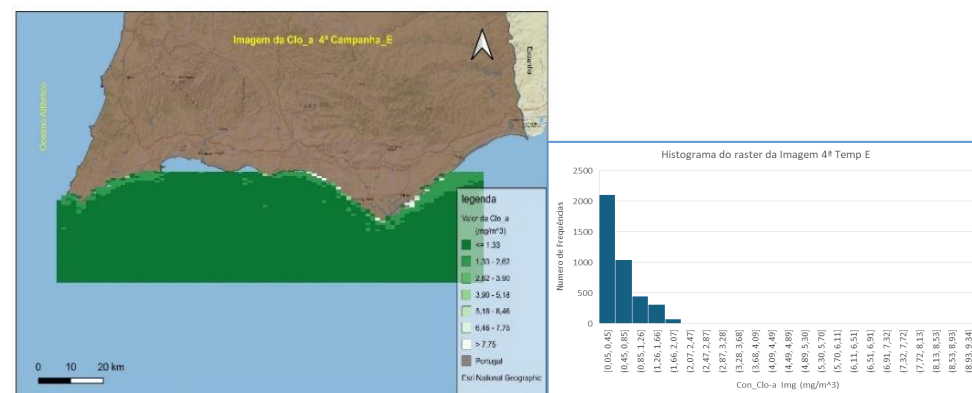


Figura 27 - Resultados da quarta campanha, área E: a) valores Imagem Clo-a; b) Histograma dos valores registados

Tabela 9 - Dados amostrais Clo-a Imagens - Área E

Valores clo-a das imagens rasters da área E – 4 temporadas											
Temporadas/Área	Histograma de barras adjacentes						Histograma de valores acumulados				
	Figuras	Intervalo (mg/m ³)		Nº Max de frequências	Intervalo das frequências (mg/m ³)		Gráficos	80% = Intervalo (mg/m ³)		20% = Intervalo (mg/m ³)	
		Min	Max		Min	Max		Min	Max	Min	Max
1ªTemp E	Figura 24	0,03	9,99	3475	0,03	0,46	(Gráfico 13)	0,03	0,89	0,89	9,99
2ªTemp E	Figura 25	0,04	9,95	2250	0,04	0,47	(Gráfico 14)	0,04	1,77	1,77	6,94
3ªTemp E	Figura 26	0,03	9,88	2750	0,03	0,46	(Gráfico 15)	0,03	1,31	1,31	8,59
4ªTemp E	Figura 27	0,05	9,34	2100	0,05	0,45	(Gráfico 16)	0,05	0,85	0,85	7,72

De acordo com a Tabela 9, que resume os dados amostrais de Clo-a provenientes das imagens **na área de estudo E**, ao longo de quatro campanhas, e com base nos mapas temáticos apresentados nas (Figura 24 - 27), verifica-se o seguinte:

- Nos histogramas de barras correspondentes, observam-se concentrações de clorofila-a compreendidas entre 0,03 e 9,99 mg/m³, registando-se a frequência máxima de 3475 observações (Figura 24; Gráfico 13).
- Para além desta informação, importa referir que, nas quatro campanhas, os valores compreendidos entre 2,07 e 9,99 mg/m³, apresentaram frequência igual a zero.
- A análise dos histogramas de frequências acumuladas revela que 80% dos valores de concentração de Clo-a se encontram no intervalo entre 0,03 e 1,34 mg/m³, enquanto os 20% remanescentes distribuem-se entre 0,85 e 9,99 mg/m³.
- A leitura detalhada dos histogramas de frequências acumuladas (Gráfico 13 - Gráfico 16), mostra que existem valores compreendidos entre (2,07 a 9,99 mg/m³), também apresentam frequência nula.

Apesar da ocorrência de frequências iguais a zero em determinados intervalos, estes dados permitem estimar uma distribuição espacial das concentrações de Clo-a compatível

com os níveis considerados normais para a área de estudo, de acordo com Morel (1988), citado por Dias (2022d).

5.3. Mapas Temáticos — Valores *In Situ* versus Valores Obtidos por Imagem

Com o objetivo de permitir uma análise comparativa entre os valores de Clo-a extraídos das imagens e os valores obtidos *In Situ*, recorreu-se ao método «...Amostrar valores de raster...» ver subcapítulo (4.2) - Metodologia.

Para tal, foram elaboradas duas tabelas-síntese (Tabela 10, Tabela 11), correspondentes às campanhas realizadas nas áreas A e E, nas quais se apresentam e interpretam os principais parâmetros estatísticos obtidos a partir dos mapas temáticos (Figuras 28 à Figura 35).

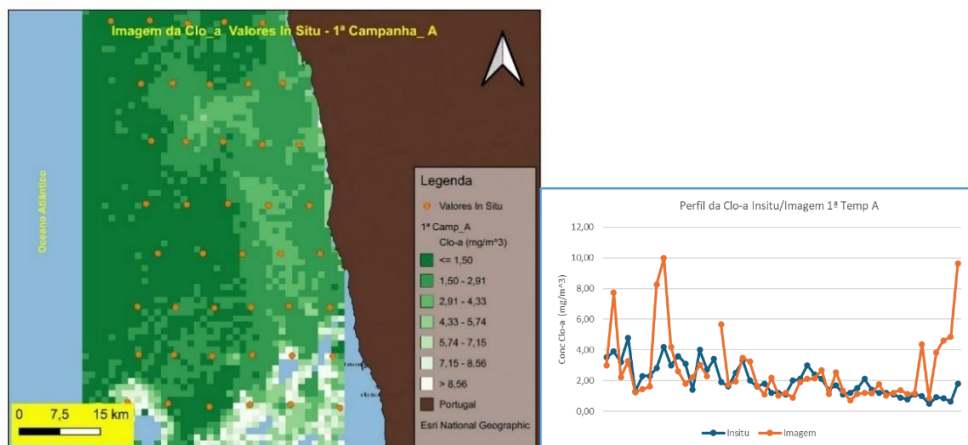


Figura 28 - Resultados da primeira campanha, área A: a) valores In Situ versus Imagem Clo-a; b) Gráfico de comparação do perfil dos valores registados

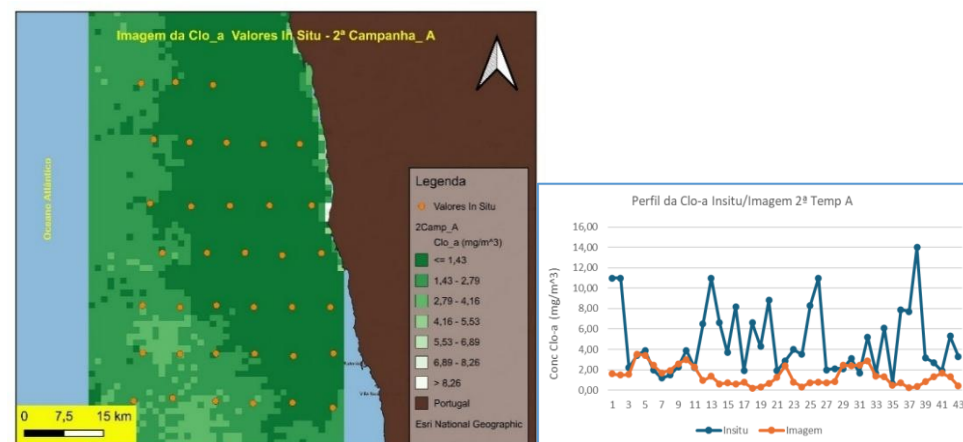


Figura 29 - Resultados da segunda campanha, área A: a) valores In Situ versus Imagem Clo-a; b) Gráfico de comparação do perfil dos valores registados

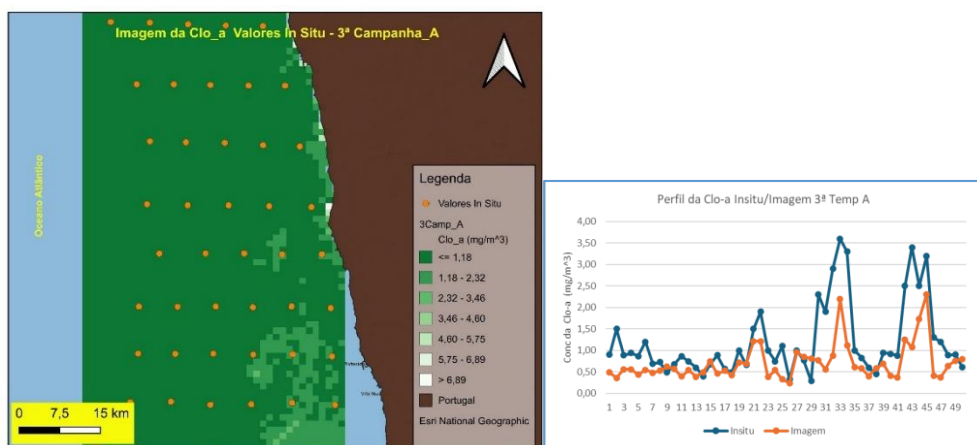


Figura 30 - Resultados da terceira campanha, área A: a) valores In Situ versus Imagem Clo-a; b) Gráfico de comparação do perfil dos valores registados

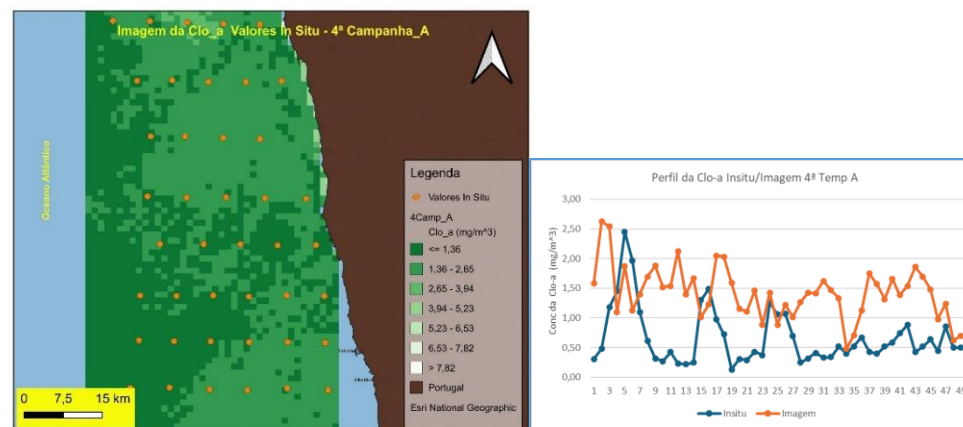


Figura 31 - Resultados da quarta campanha, área A: a) valores In Situ versus Imagem Clo-a; b) Gráfico de comparação do perfil dos valores registados

Tabela 10 - Dados amostrais Clo-a Imagens versus *In Situ* - Área A

Valores da Clo-a imagens versus <i>In Situ</i> da área A – 4 temporadas											
Temporadas/Área	Histograma de valores acumulados - Imagem						Histograma de valores acumulados Imagem VS <i>In Situ</i>				
	Figuras	Intervalo (mg/m ³)		Nº Max de frequências	Intervalo das frequências (mg/m ³)		Gráficos	80% = Intervalo (mg/m ³)		20% = Intervalo (mg/m ³)	
		Min	Max		Min	Max		Min	Max	Min	Max
1ªTemp A	Figura 28	0,69	9,98	30	0,69	2,24	(Gráfico 17,Gráfico 18)	0,00	3,79	3,79	9,98
2ªTemp A	Figura 29	0,22	3,55	15	0,22	0,78	(Gráfico 19,Gráfico 20)	0,00	2,99	2,99	3,55
3ªTemp A	Figura 30	0,24	2,70	31	0,24	0,65	(Gráfico 21,Gráfico 22)	0,00	1,06	1,06	2,70
4ªTemp A	Figura 31	1,32	3,00	21	1,32	2,16	(Gráfico 23,Gráfico 24)	0,00	2,16	2,16	3,00

Após o tratamento dos dados no QGIS, utilizando o método «Amostrar valores de raster» (ver Tabela 10), a relação existente entre os valores de Clo-a, obtidos por imagem e os dados *In Situ*, ao longo das quatro temporadas. Destacam-se os seguintes pontos:

- Nos histogramas de barras correspondentes, registam-se concentrações de Clo-a entre 0,22 e 9,98 mg/m³, sendo a frequência máxima de 31 ocorrências, observada na terceira temporada na (Figura 30).
- A análise dos histogramas de frequências acumuladas revela que 80% dos valores de concentração de Clo-a se encontram no intervalo entre 0,00 e 3,79 mg/m³, enquanto os 20% remanescentes distribuem-se entre 1,06 e 9,98 mg/m³.
- No que concerne aos gráficos comparativos com os dados *In Situ*. Em todas as temporadas, observa-se que os dados *In Situ* confirmam a tendência geral

observada nas imagens: predominância de valores de Clo-a, geralmente até aos 2 mg/m³.

- Nos gráficos de perfil das (Figuras 28 - 31) estima-se um padrão de clo-a que corrobora o intervalo 0,00 e 2,00 mg/m³ e valores atípicos, que serão comentados adiante.

Estes resultados permitem estimar uma distribuição espacial de concentrações de Clo-a compatível com níveis considerados normais para a área de estudo, conforme os critérios de Morel (1988), citado por Dias (2022d).

Esta constatação, reforça a validade da utilização da detecção remota como ferramenta eficaz na estimativa da qualidade da água em ambientes costeiros.

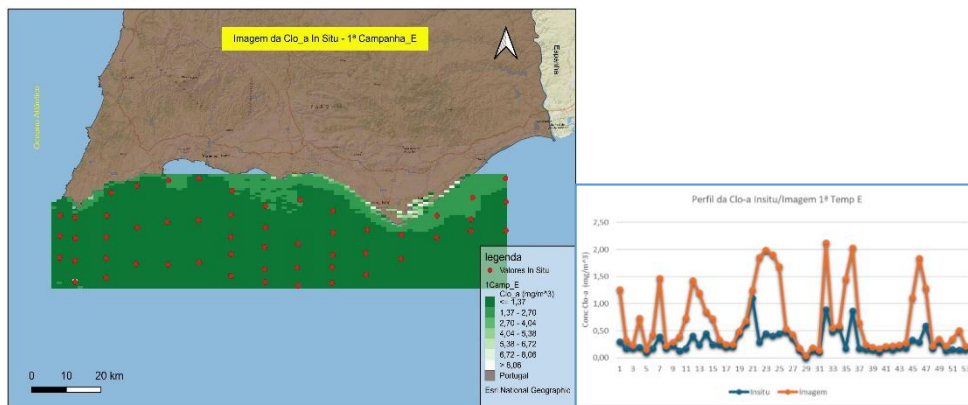


Figura 32 - Resultados da primeira campanha, área E: a) valores In Situ versus Imagem Clo-a; b) Gráfico de comparação do perfil dos valores registados

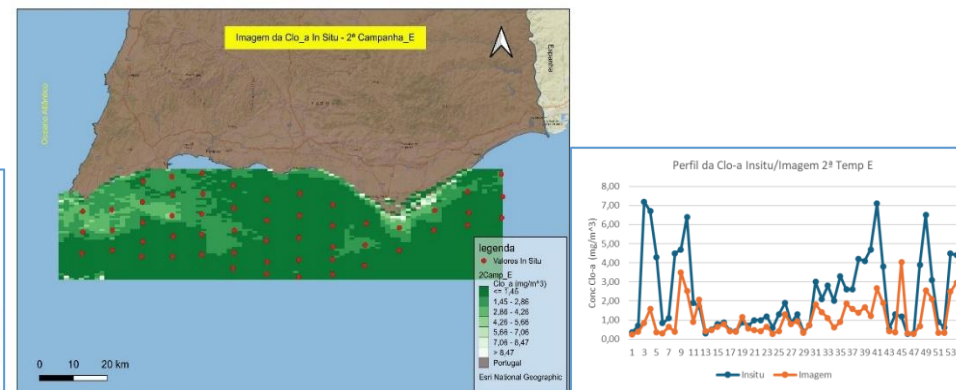


Figura 33- Resultados da segunda campanha, área E: a) valores In Situ versus Imagem Clo-a; b) Gráfico de comparação do perfil dos valores registados

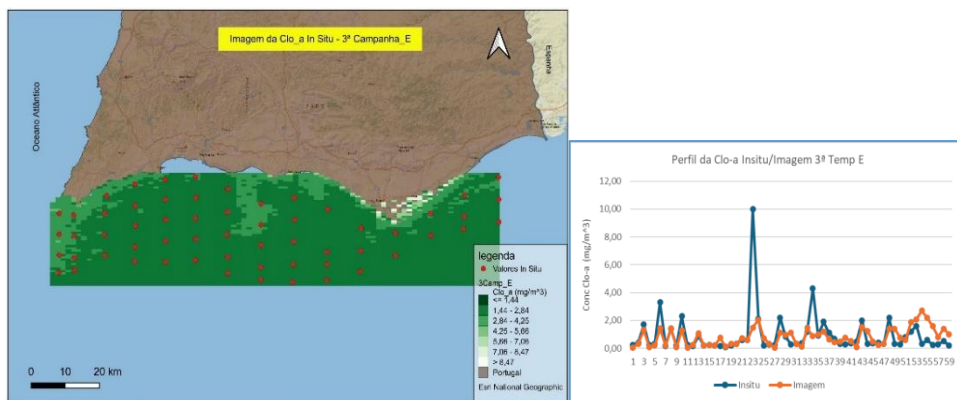


Figura 34- Resultados da terceira campanha, área E: a) valores In Situ versus Imagem Clo-a; b) Gráfico de comparação do perfil dos valores registados

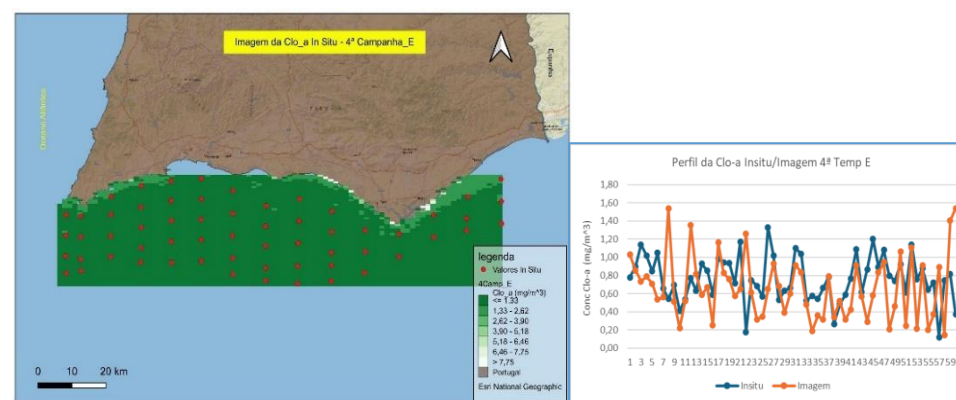


Figura 35- Resultados da quarta campanha, área E: a) valores In Situ versus Imagem Clo-a; b) Gráfico de comparação do perfil dos valores registados

Tabela 11 - Dados amostrais Clo-a Imagens versus *In Situ* - Área E

Valores da Clo-a imagens versus <i>In Situ</i> da área E – 4 temporadas											
Temporadas/Área	Histograma de valores acumulados - Imagem						Histograma de valores acumulados Imagem VS <i>In Situ</i>				
	Figuras	Intervalo (mg/m ³)		Nº Max de frequências	Intervalo das frequências (mg/m ³)		Gráficos	80% = Intervalo (mg/m ³)		20% = Intervalo (mg/m ³)	
		Min	Max		Min	Max		Min	Max	Min	Max
1ªTemp E	Figura 32	0,03	1,57	33	0,03	0,29	(Gráfico 25, Gráfico 26)	0,00	1,31	1,31	1,57
2ªTemp E	Figura 33	0,25	3,40	30	0,25	0,88	(Gráfico 27, Gráfico 28)	0,00	1,51	1,51	3,40
3ªTemp E	Figura 34	0,04	2,70	23	0,04	0,48	(Gráfico 29, Gráfico 30)	0,00	0,93	0,93	2,70
4ªTemp E	Figura 35	0,15	1,31	16	0,15	0,38	(Gráfico 31, Gráfico 32)	0,00	0,84	0,84	1,54

De acordo com a Tabela 11, é possível observar a relação existente entre os valores de Clo-a, obtidos por imagem e os dados *In Situ*, ao longo das quatro temporadas. Neste pressuposto destacam-se os seguintes pontos:

- Nos histogramas de barras acumulados, registam-se concentrações de Clo-a entre 0,03 e 3,40 mg/m³, sendo a frequência máxima de 33 incidentes, observada na primeira temporada na (Figura 32).
- A análise dos histogramas de frequências acumuladas revela que 80% dos valores de concentração de Clo-a se situam no intervalo 0,00 a 1,51 mg/m³, enquanto os 20% remanescentes se distribuem entre 0,84 e 3,40 mg/m³.
- Relativamente aos gráficos comparativos com os dados *In Situ*, verifica-se que em todas as temporadas, estes confirmam a tendência geral observada nas imagens, com predominância de valores de Clo-a até cerca de 1,30 mg/m³.

- Nos gráficos de perfil apresentados nas (Figuras 32 - 35), é possível estimar um padrão de concentração de Clo-a que se mantém, de forma consistente, dentro do intervalo entre 0,00 e 2,00 mg/m³, verificando-se, contudo, a presença de valores extremos, os quais serão estudados no capítulo discussão.

Estes resultados, demonstram o potencial da detecção remota como uma metodologia fiável para a monitorização da qualidade da água em zonas costeiras, permitindo deduzir, com precisão espacial, os níveis de Clo-a segundo os referenciais propostos por Morel (1988), citado por Dias (2022d).

Neste sentido, os padrões demonstrados nas figuras supracitadas servirão de base comparativa para a análise crítica a desenvolver no Capítulo 6 – Discussão, onde serão interpretadas as variações sazonais, os desvios registados e as possíveis causas para a ocorrência de valores atípicos identificados no presente estudo.

6. Discussão

O presente capítulo, centra-se na comparação entre os dados provenientes das imagens de satélite e os valores obtidos *In Situ*, bem como na avaliação da eficácia dos métodos aplicados para a estimativa da concentração de Clo-a. Serão ainda considerados os fatores ambientais, metodológicos e técnicos que poderão ter influenciado os resultados, com vista à validação e robustez das abordagens adotadas.

Uma leitura mais atenta do presente Capítulo 6 evidenciou a necessidade de uma análise preliminar entre as classes das legendas dos mapas, comparando os valores *In Situ* e os valores extraídos das imagens.

Essa comparação revelou diferenças pontuais na correspondência das classes, mas também confirmou padrões de proximidade que reforçam a consistência das conclusões estatísticas. A análise detalhada, com comentários complementares, encontra-se no subanexo (8.2.3), Tabela 24, embora o essencial se apresente já neste capítulo.

As principais conclusões retiradas desta análise serão apresentadas no Capítulo 7, onde se sintetizam os contributos do presente estudo e se apontam possíveis linhas de investigação futura.

6.1. Análise dos Gráficos de Dispersão, Diagramas de Caixa, Classes das Legendas dos Mapas *In Situ* e Imagens

No presente subcapítulo procede-se à análise dos gráficos de dispersão e dos diagramas de caixa, construídos a partir dos dados de concentração de Clo-a, visando avaliar a relação entre os valores *In Situ* e os estimados a partir das imagens de satélite.

Para efeitos de sistematização e consulta, a totalidade destes gráficos encontra-se compilada no anexo (8.5), constituindo um suporte complementar à interpretação crítica desenvolvida neste capítulo.

As análises estatísticas permitiram identificar as tendências, detetar possíveis *outliers* e avaliar a variabilidade e distribuição dos dados, constituindo uma base visual para a interpretação crítica dos resultados obtidos.

6.1.1. Discussão dos Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área A

Observando o conjunto de dados, quer na medição *In Situ*, quer nos dados capturados na imagem do satélite (Tabela 12), verifica-se, que a correlação de Pearson (r), e o coeficiente de determinação (R^2), da 1.ª à 4.ª temporada, os índices estatísticos apresentam valores muito baixos, o que pode ser interpretado, respetivamente, como correlação moderada pouco significativa, segundo Pestana e Gageiro (2014).

Tabela 12 - Distribuição dos Coeficientes de Pearson e R^2 da Clo-a *In Situ* e Imagem – Área A

Distribuições das Concentrações da Clo-a <i>In Situ</i> e Imagem – Área A							
Temporada/Área	Figuras	Com valores atípicos			Sem valores atípicos		
		Gráfico	Coeficiente Pearson $ r $	Coeficiente de Determinação (R^2)	Gráficos	Coeficiente Pearson $ r $	Coeficiente de Determinação (R^2)
1ªTemp A	Figura 28	(Gráfico 33)	0,39	0,15	(Gráfico 34)	0,71	0,50
2ªTemp A	Figura 29	(Gráfico 35)	-0,33	0,11	(Gráfico 36)	-0,60	0,37
3ªTemp A	Figura 30	(Gráfico 37)	0,75	0,56	(Gráfico 38)	0,72	0,52
4ªTemp A	Figura 31	(Gráfico 39)	0,00	0,02	(Gráfico 40)	-0,18	0,03
Média			0,36	0,21		0,55	0,36

Após o tratamento estatístico dos valores atípicos, que consistiu na identificação e remoção de outliers nos dados provenientes das imagens de satélite, procedeu-se ao cálculo dos coeficientes de determinação (R^2) e de correlação de Pearson (r) - Tabela 12.

Complementarmente, foram determinadas as estatísticas descritivas — média, mediana, desvio-padrão, valores máximo e mínimo, intervalo, quartis (Q1 e Q3) e intervalo interquartil (IQR) — resumidas na Tabela 13, bem como o erro relativo e absoluto, com o objetivo de caracterizar a dispersão e o desempenho das estimativas.

Na sequência deste procedimento estimou-se: os coeficientes de determinação (R^2) = [(0,50; 0,37; 0,52; 0,03) – com uma média = 0,36]; enquanto os coeficientes de correlação de Pearson (r) = [(0,71; 0,60; 0,72; -0,18) – com uma média = 0,55].

Neste sentido, os valores de média apresentados [(R^2) = 0,36; (r) = 0,55], revelam uma correlação global moderada, de acordo com Pestana e Gageiro (2014), entre os dados *In Situ* e os valores estimados pelas imagens, com particular relevo para três das quatro campanhas, que apresentam coeficientes superiores aos reportados por (Hafeez et al. 2019), cujo estudo obteve um (R^2 = 0,22), na aplicação do algoritmo C2RCC.

Tal resultado sugere que, apesar das limitações observadas numa das campanhas ($R^2 = 0,03$), a metodologia adotada neste trabalho apresenta, de um modo geral, um desempenho comparativamente mais robusto.

Tabela 13 - Valores Clo-a *In Situ* versus dados imagem – 1ª, 2ª, 3ª, 4ª Temporadas A

Valores da Clorofila de dados <i>In Situ</i> com dados da imagem 1ª Temp_A									
Figura 28	Média	Mediana	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Intervalo	Q1	Q3	IQR
Chl-a <i>In Situ</i>	2,03	1,80	1,04	4,80	0,49	4,31	1,20	2,85	1,65
Chl-a Imagem	2,71	1,95	2,21	9,98	0,69	9,29	1,18	3,24	2,06
Chl_a Img_Emédio	1,85	1,69	0,82	4,19	0,69	3,50	1,17	2,23	1,06
Valores da Clorofila de dados <i>In Situ</i> com dados da imagem 2ª Temp_A									
Figura 29	Média	Mediana	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Intervalo	Q1	Q3	IQR
Chl-a <i>In Situ</i>	3,85	3,15	2,32	8,80	0,70	8,10	2,00	5,50	3,50
Chl-a Imagem	1,40	1,32	0,91	3,55	0,22	3,33	0,71	2,27	1,56
Chl_a Img_Emédio	1,58	1,37	0,90	3,55	0,22	3,33	0,77	2,40	1,62
Valores da Clorofila de dados <i>In Situ</i> com dados da imagem 3ª Temp_A									
Figura 30	Média	Mediana	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Intervalo	Q1	Q3	IQR
Chl-a <i>In Situ</i>	1,21	0,89	0,85	3,60	0,45	3,15	0,90	1,35	0,45
Chl-a Imagem	0,71	0,57	0,43	2,31	0,24	2,06	0,43	0,80	0,37
Chl_a Img_Emédio	0,71	0,57	0,43	2,31	0,24	2,06	0,43	0,80	0,37
Valores da Clorofila de dados <i>In Situ</i> com dados da imagem 4ª Temp_A									
Figura 31	Média	Mediana	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Intervalo	Q1	Q3	IQR
Chl-a <i>In Situ</i>	0,67	0,52	0,39	1,96	0,23	1,73	0,40	0,88	0,48
Chl-a Imagem	1,42	1,42	0,44	2,62	0,48	2,14	1,12	1,67	0,54
Chl_a Img_Emédio	1,33	1,40	0,34	1,88	0,48	1,40	1,11	1,58	0,47

Por outro lado, ao analisar o conjunto de dados, quer os provenientes das medições *In Situ*, quer os extraídos das imagens de satélite – Área A (Tabela 13), estima-se:

- Na 1ª temporada A: O valor da média das concentrações de Clo-a é 2,03 mg/m³ a 1,85 mg/m³, respetivamente. Isto corresponde a um erro absoluto de 0,18 mg/m³ e um erro relativo de 8,86%, com um desvio padrão de 0,82 mg/m³.
- Na 2ª temporada A: O valor da média das concentrações de Clo-a é 3,85 mg/m³ a 1,58 mg/m³, respetivamente. Isto corresponde a um erro absoluto de 2,27 mg/m³ e um erro relativo de 58,96%, com um desvio padrão de 0,90 mg/m³.

- Na 3ª temporada A, o valor da média das concentrações de Clo-a é 1,21 mg/m³ a 0,71 mg/m³, respetivamente. Isto corresponde a um erro absoluto de 0,50 mg/m³ e um erro relativo de 41,32% com um desvio padrão de 0,43 mg/m³.
- Na 4ª temporada A: O valor da média das concentrações de Clo-a é 0,67 mg/m³ a 1,33 mg/m³, respetivamente. Isto corresponde a um erro absoluto de 0,66 mg/m³ e um erro relativo de 98,50 % com um desvio padrão de 0,34 mg/m³.

Na análise dos resultados por temporada na Área A, observa-se que, na 1.ª temporada, os resultados evidenciam um erro relativo de apenas 8,86%, o mais baixo de entre as quatro campanhas analisadas. O coeficiente de correlação de Pearson apresentou um valor de $|r| = 0,71$, associado a um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,50$, indicando uma associação linear forte entre os dados *In Situ* e os valores estimados a partir da imagem, segundo a classificação de Pestana e Gageiro (2014).

No que toca à comparação entre as classes das legendas dos mapas temáticos *In Situ* e da imagem para a 1ª temporada, referir que 80% dos valores *In Situ* se encaixam entre $\leq 1,50$ e 5,74 mg/m³ dos valores das imagens conforme Tabela 24, estimando-se uma boa aproximação entre ambas as fontes de dados.

Em complemento ao paragrafo anterior, referir também que cerca de 80% dos valores de Clo-a da imagem da 1ª temporada, em estado bruto e sem qualquer tratamento estatístico (Gráfico 9), situam-se entre 0,53 e 2,57 mg/m³, o que nos leva a inferir, como valores enquadrados nos limites típicos definidos por Morel (1988).

Na 2.ª temporada, o erro relativo sobe para 58,96%, evidenciando uma diferença mais acentuada entre os dados *In Situ* e os extraídos da imagem. Ainda assim, os coeficientes de Pearson ($r = |-0,60|$) e de determinação ($R^2 = 0,37$), revelam uma correlação moderada de acordo com o referido por Pestana e Gageiro (2014), demonstrando que os padrões de variação se mantêm consistentes apesar das diferenças absolutas.

Quanto à comparação entre as classes das legendas dos mapas temáticos *In Situ* e da imagem para a 2ª temporada, referir que 50% dos valores *In Situ* coincidem com o

intervalo $\leq 1,43$ e $5,53 \text{ mg/m}^3$ - valores das imagens conforme Tabela 24, estimando-se uma menor aproximação entre ambas as fontes de dados.

Importa destacar que cerca de 80% dos valores brutos de Clo-a da imagem da 2ª temporada, estão compreendidos entre $0,44$ e $3,52 \text{ mg/m}^3$, dentro da gama típica definida por Morel (1988).

Na 3ª temporada, verifica-se uma melhoria global, tanto em termos de erro como de correlação: o erro relativo desce para 41,32%, enquanto o coeficiente de Pearson ($r = |0,72|$) e o ($R^2 = 0,52$), evidenciam uma correlação forte, tal como exposto por Pestana e Gageiro (2014).

Em matéria de comparação entre as classes das legendas dos mapas temáticos *In Situ* e da imagem para a 3ª temporada, referir que 80% dos valores *In Situ* se encaixam entre $\leq 1,18$ e $4,60 \text{ mg/m}^3$ dos valores das imagens Tabela 24, estimando-se uma boa aproximação entre ambas as fontes de dados.

Para além do anterior, a análise do histograma dos valores sem tratamento estatístico da imagem (Gráfico 11), mostra que cerca de 80% dos valores se concentram num intervalo mais restrito, entre $0,03$ e $0,73 \text{ mg/m}^3$. Esta distribuição poderá indiciar alguma subestimação sistemática por parte do algoritmo, embora os valores continuem compatíveis com as concentrações esperadas em águas de Caso 1 Morel (1988).

No caso da 4.ª temporada da área A, os indicadores estatísticos evidenciam: uma correlação negativa de Pearson ($r = |-0,18|$); e um coeficiente de determinação reduzido ($R^2 = 0,03$), em consonância com os critérios de interpretação de Pestana e Gageiro (2014).

Estes resultados, associados a um erro relativo muito elevado (98,50%), indicam um desempenho bastante fraco do algoritmo. Em consequência, observa-se uma fraca relação entre os dados *In Situ* e os valores estimados pela imagem, o que compromete alguma fiabilidade do produto nesta campanha.

No que concerne à comparação entre as classes das legendas dos mapas temáticos *In Situ* e da imagem para a 4ª temporada, referir que 60% dos valores *In Situ* se encaixam

no intervalo entre $\leq 1,36$ e $5,23 \text{ mg/m}^3$ - valores das imagens Tabela 24, estimando-se uma menor correspondência entre ambas as fontes de dados.

Em complemento ao parágrafo anterior, a análise do histograma da imagem não processado (Gráfico 12), revela que cerca de 80% dos valores de Clo-a se situam entre $0,49$ e $1,76 \text{ mg/m}^3$, intervalo que se encaixa nos valores referidos por Morel em (1988).

Com o último padrão analisado, permite-nos estimar que a imagem da 4ª temporada se revela ambientalmente coerente com os padrões esperados para a zona costeira analisada, o que confirma a sua utilidade em análise preliminar para identificar a área como boa qualidade da água.

Posto isto, os resultados obtidos para a área A, mantêm-se coerentes com os limites definidos por Morel (1988), demonstrando que o algoritmo C2RCC, embora sensível a variações sazonais e óticas locais, apresenta capacidade para capturar padrões espaciais e sazonais da Clo-a de forma razoavelmente robusta. A sua utilização mostra-se, assim, pertinente como ferramenta de triagem e monitorização preliminar em estudos de qualidade da água em zonas costeiras.

6.1.2. Discussão dos Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área E

Analisando o conjunto de dados da Área E, tanto os provenientes das medições *In Situ* como os extraídos das imagens de satélite, Tabela 14, nota-se que os valores da correlação de Pearson (r) e do coeficiente de determinação (R^2), ao longo das quatro campanhas (1.ª temporada à 4.ª), revelam uma correlação moderada, tal como apontado por Pestana e Gageiro (2014), entre os dois conjuntos de dados.

Tabela 14 - Distribuição dos Coeficientes de Pearson e R^2 da Clo-a *In Situ* e Imagem – Área E

Distribuições dos coeficientes de Pearson e determinação <i>In Situ</i> e Imagem – Área E							
Temporada/Área	Figuras	Com valores atípicos			Sem valores atípicos		
		Gráficos	Coeficiente Pearson $ r $	Coeficiente de Determinação (R^2)	Gráficos	Coeficiente Pearson $ r $	Coeficiente de Determinação (R^2)
1ªTemp E	Figura 32	(Gráfico 41)	0,34	0,10	(Gráfico 42)	0,60	0,36
2ªTemp E	Figura 33	(Gráfico 43)	0,58	0,34	(Gráfico 44)	0,74	0,55
3ªTemp E	Figura 34	(Gráfico 45)	0,37	0,14	(Gráfico 46)	0,69	0,47
4ªTemp E	Figura 35	(Gráfico 47)	0,16	0,03	(Gráfico 48)	0,51	0,27
Média			0,36	0,15		0,63	0,41

À semelhança do que se referiu para a área A; após o tratamento estatístico dos valores atípicos, que consistiu na identificação e remoção de outliers nos dados provenientes das imagens de satélite, procedeu-se ao cálculo dos coeficientes de determinação (R^2) e de correlação de Pearson (r).

Complementarmente, foram determinadas as estatísticas descritivas — média, mediana, desvio-padrão, valores máximo e mínimo, intervalo, quartis (Q1 e Q3) e intervalo interquartil (IQR) — sintetizadas na Tabela 15, bem como os erros relativo e absoluto, com o objetivo de caracterizar a dispersão e o desempenho das estimativas.

Na sequência deste procedimento, os coeficientes de determinação obtidos (R^2) = [(0,36; 0,55; 0,47; 0,27) – com uma média = 0,41]; enquanto os coeficientes de correlação de Pearson obtidos (r) = [(0,60; 0,74; 0,69; 0,51) – com uma média = 0,63].

Neste sentido, os valores de média apresentados [(R^2) = 0,46; (r) = 0,63], apontam para uma correlação global moderada, segundo Pestana e Gageiro (2014), entre os dados *In Situ* e os estimados por satélite, com especial destaque nas quatro campanhas, cujos

coeficientes de determinação superam claramente os valores reportados por Hafeez et al. (2019), cujo estudo obteve um $R^2 = 0,22$, com a aplicação do algoritmo C2RCC.

De forma complementar, ao analisar o conjunto de dados da Área E, tanto os provenientes das medições *In Situ* como os capturados por satélite (ver Tabela 15), é possível estimar por temporada os seguintes indicadores estatísticos.

Tabela 15 - Valores Clo-a *In Situ* versus dados imagem – 1ª, 2ª, 3ª, 4ª Temporadas E

Valores da Clorofila de dados <i>In Situ</i> com dados da imagem 1ª Temp_E									
Figura 32	Média	Mediana	Desvio Padrão	Màximo	Mínimo	Intervalo	Q1	Q3	IQR
Chl-a <i>In Situ</i>	0,29	0,20	0,18	0,89	0,10	0,79	0,16	0,41	0,25
Chl-a Imagem	0,42	0,09	0,50	1,57	0,03	1,54	0,05	0,74	0,69
Chl_a Img_Emédio	0,22	0,07	0,29	1,24	0,03	1,20	0,05	0,26	0,21
Valores da Clorofila de dados <i>In Situ</i> com dados da imagem 2ª Temp_E									
Figura 33	Média	Mediana	Desvio Padrão	Màximo	Mínimo	Intervalo	Q1	Q3	IQR
Chl-a <i>In Situ</i>	2,23	1,30	1,89	7,10	0,27	6,83	0,72	3,85	3,14
Chl-a Imagem	1,11	0,74	0,91	4,03	0,25	3,79	0,41	1,61	1,20
Chl_a Img_Emédio	1,06	0,74	0,82	3,50	0,25	3,25	0,41	1,58	1,17
Valores da Clorofila de dados <i>In Situ</i> com dados da imagem 3ª Temp_E									
Figura 34	Média	Mediana	Desvio Padrão	Màximo	Mínimo	Intervalo	Q1	Q3	IQR
Chl-a <i>In Situ</i>	0,66	0,34	0,63	2,30	0,10	2,20	0,25	0,87	0,62
Chl-a Imagem	0,82	0,72	0,63	2,70	0,04	2,66	0,26	1,30	1,04
Chl_a Img_Emédio	0,77	0,72	0,56	2,09	0,04	2,05	0,26	1,26	1,01
Valores da Clorofila de dados <i>In Situ</i> com dados da imagem 4ª Temp_E									
Figura 35	Média	Mediana	Desvio Padrão	Màximo	Mínimo	Intervalo	Q1	Q3	IQR
Chl-a <i>In Situ</i>	0,75	0,75	0,24	1,20	0,12	1,08	0,59	0,93	0,34
Chl-a Imagem	0,66	0,61	0,35	1,54	0,15	1,39	0,36	0,88	0,52
Chl_a Img_Emédio	0,59	0,50	0,27	1,11	0,15	0,96	0,35	0,83	0,48

Neste pressuposto:

- 1ª temporada E: A média das concentrações de Clo-a foi de 0,29 mg/m³ (*In Situ*) e 0,22 mg/m³ (imagem), o que corresponde a um erro absoluto de 0,07 e um erro relativo de 24,13 %, com um desvio padrão de 0,29 mg/m³.
- 2ª temporada E: A média situou-se em 2,23 mg/m³ (*In Situ*) e 1,06 mg/m³ (imagem), correspondendo a um erro absoluto de 1,17 mg/m³ e um erro relativo de 52,46 %, com um desvio padrão de 0,82 mg/m³.

- 3ª temporada E: Registaram-se médias de 0,66 mg/m³ (*In Situ*) e 0,77 mg/m³ (imagem), originando um erro absoluto de 0,05 mg/m³ e um erro relativo de 7,57 %, com um desvio padrão de 0,56 mg/m³.
- 4ª temporada E: As médias observadas foram de 0,75 mg/m³ (*In Situ*) e 0,59 mg/m³ (imagem), resultando num erro absoluto de 0,16 mg/m³ e num erro relativo de 21,33 %, com um desvio padrão de 0,27 mg/m³.

A análise comparativa das quatro temporadas revela diferentes níveis de correspondência entre os dados *In Situ* e os valores extraídos das imagens, refletindo variações tanto nos erros relativos como na intensidade da correlação estatística.

Na 1.ª temporada área E, o erro relativo foi de 24,13%, com um coeficiente de Pearson ($r = |0,60|$) e um ($R^2 = 0,36$), indicando uma correlação moderada, conforme referido por Pestana e Gageiro (2014).

No que concerne à comparação entre classes das legendas dos mapas temáticos *In Situ* e da imagem para a 1ª temporada E, referir que 80% dos valores *In Situ* situam-se abaixo dos limites inferiores do intervalo $\leq 1,37$ e 5,38 mg/m³ dos valores das imagens Tabela 24, estimando-se uma menor aproximação entre ambas as fontes de dados.

No que diz respeito aos valores brutos do histograma da imagem de Clo-a, 1ª temporada E (Gráfico 13), cerca de 80 % situaram-se no intervalo de 0,03 a 0,89 mg/m³, coerente com o limite típico identificado por Morel (1988).

Na 2.ª temporada área E, apesar de um erro relativo mais elevado (52,46%), os coeficientes de Pearson ($r = |0,74|$) e de determinação ($R^2 = 0,55$), evidencia uma correlação forte, segundo Pestana e Gageiro (2014), o que nos leva a estimar que o sensor é consistente na deteção da tendência geral da Clo-a.

No tocante à comparação entre as classes das legendas dos mapas temáticos *In Situ* e da imagem para a 2ª temporada – Tabela 24, referir que 70% dos valores *In Situ* se encaixam entre o intervalo $\leq 1,45$ e 5,56 mg/m³ dos valores das imagens, estimando-se uma menor aproximação entre ambas as fontes de dados.

Em relação aos valores brutos do histograma da imagem 2ª Temporada (Gráfico 14), 80% se encaixam no intervalo entre 0,04 e 1,77 mg/m³, mantendo-se também dentro da gama bióptica expetável com os limites típico segundo Morel (1988).

A 3.ª temporada área E, destaca-se por apresentar o erro relativo mais reduzido (7,57%), destas quatro campanhas, com uma correlação igualmente forte ($r = |0,69|$), e ($R^2 = 0,47$), conforme sinalizado por Pestana e Gageiro (2014).

Relativamente à comparação entre as classes das legendas dos mapas temáticos *In Situ* e da imagem para a 3ª temporada E, Tabela 24, referir que 80% dos valores *In Situ* se encaixam entre $\leq 1,44$ e 7,06 mg/m³ dos valores das imagens, estimando-se uma boa aproximação entre ambas as fontes de dados.

Quanto aos valores do histograma do raster bruto da 3ª temporada E (Gráfico 15), mostram-se bem concentrados entre 0,03 e 1,31 mg/m³, o que reforça a qualidade da estimativa, em coerência ótica com os limites típicos estabelecidos segundo Morel (1988).

Por último, a 4.ª temporada área E, apresenta um erro relativo de 21,33%, mas com os coeficientes de correlação mais baixos do conjunto das quatro temporadas ($r = |0,51|$), $R^2 = (0,27)$, no entanto indica uma correlação moderada, de acordo com Pestana e Gageiro (2014).

Relativamente à comparação entre as classes das legendas dos mapas temáticos *In Situ* e da imagem para a 4ª temporada E, referir que 80% dos valores *In Situ* situam-se abaixo dos limites inferiores do intervalo $\leq 1,33$ e 5,18 mg/m³ dos valores das imagens Tabela 24, estimando-se uma menor aproximação entre ambas as fontes de dados.

Ainda assim, os valores de Clo-a do histograma dos valores brutos da 4.ª temporada área E (ver Gráfico 16), mantêm-se no intervalo de 0,05 a 0,81 mg/m³, mais uma vez dentro dos limites característicos estabelecidos por Morel (1988).

Apesar das flutuações nos índices de correlação e nos erros relativos, ao longo das quatro campanhas realizadas na área E, 80% dos valores brutos de Clo-a extraídos das imagens permaneceram dentro de intervalos compatíveis com a gama definida por Morel (1988).

Os resultados obtidos, demonstram a capacidade do sensor em captar padrões espaciais e sazonais coerentes com a realidade bióptica observada, reforçando a validade do algoritmo C2RCC como ferramenta fiável para estimativas preliminares da concentração de Clo-a em ambientes dominados por propriedades óticas associadas ao fitoplâncton.

6.2. Discussão dos Resultados face aos Objetivos do Trabalho

Tendo em conta os resultados apresentados nos sub-subcapítulos anteriores, importa agora refletir sobre o seu alinhamento com os objetivos definidos no início deste estudo.

A análise crítica do desempenho do algoritmo C2RCC nas diferentes áreas e campanhas sazonais, bem como a comparação com os dados *In Situ*, fornece os elementos necessários para aferir em que medida foi possível atingir as metas estabelecidas, nomeadamente no que respeita à validação da aplicação de dados de deteção remota Sentinel-3 OLCI na monitorização da Clo-a em ambientes costeiros.

Considerando os resultados obtidos nas áreas A, e E ao longo das quatro temporadas analisadas, observa-se que o desempenho do algoritmo C2RCC variou em função das características temporais e espaciais de cada campanha.

De um modo geral, verificou-se uma capacidade razoável de captação dos padrões espaciais e sazonais da concentração de Clo-a, com coeficientes de correlação Pearson (r), e de determinação (R^2) a indicarem associações moderadas a fortes, conforme referido por Pestana e Gageiro (2014), em várias campanhas nomeadamente nas 1.ª e 3.ª temporadas de ambas as áreas.

Contudo, em temporadas, como a 4.ª temporada (na Área A), os resultados revelaram um erro relativo elevado e uma correlação fraca segundo Pestana e Gageiro (2014), enquanto na 2.ª temporada (na Área E), os resultados revelaram um erro relativamente elevado, mas uma correlação forte, conforme assinalado por Pestana e Gageiro (2014), comprometendo alguma fiabilidade dos dados derivados da imagem para uma análise quantitativa rigorosa, possivelmente devido a fatores como:

- A fraca correlação, segundo Pestana e Gageiro (2014), e o elevado erro relativo verificados na 4ª temporada (área A), e 2ª temporada (área E), podem ser atribuídos, [...] não apenas à tendência do algoritmo C2RCC para sobrestimar ou subestimar os valores de C_{lo-a} [...] (Liu et al. 2021), mas também a outros fatores: (i) [...] como desfasamentos temporais entre os dados imagem versus *In Situ* [...] (Delaney et al. 2023); (ii) [...] diferenças de escala espaciais [...] (ESA, 2024d); (iii) [...] limitações na correção atmosférica ou elevada heterogeneidade ótica local [...] (Zaneveld, 2013).

A exposição detalhada destes fatores encontra-se desenvolvida no subanexo (8.1.1), onde são apresentados os respetivos enquadramentos técnicos e metodológicos, constituindo documentação complementar à análise sintética aqui apresentada.

- Importa recordar, que durante os períodos das campanhas *In Situ*, apenas uma imagem por temporada reuniu condições adequadas de qualidade (sem cobertura significativa de nuvens), para ser processada e analisada. As restantes imagens disponíveis no intervalo dessas campanhas não foram consideradas devido à elevada nebulosidade (Tabela 5).
 - Neste contexto, na 4.ª temporada (Área A), decorrida entre 17 e 19 de março de 2020, apenas a imagem de 18 de março pôde ser utilizada. O mesmo ocorreu na 2.ª temporada (Área E), entre 14 e 21 de abril de 2019, em que apenas a imagem de 14 de abril foi aproveitada.
 - ✓ [...]Este desfasamento temporal entre os dados *In Situ* e os dados de satélite[...] (Delaney et al. 2023; Zaneveld, 2013), poderá ter contribuído para as limitações observadas.
 - ✓ Acresce a diferença de escala espacial, com o sensor [...] OLCI do Sentinel-3 a operar com resolução de 300 metros [...] (ESA, 2024d), [...] enquanto as medições *In Situ* são pontuais [...] (Pan et al. 2024), o que poderá ter induzido a estes erros adicionais (Urraca et al. 2024).

- Cumpre referir também que [...] as estatísticas de validação²⁹ representam apenas uma aproximação das incertezas associadas aos produtos de satélite, já que as medições *In Situ* também podem apresentar erros (Urraca et al. 2024) e, por vezes, não coincidem plenamente em termos temporais, espaciais ou espectrais [...] (Mélin, 2019).
- Neste pressuposto, a avaliação da qualidade dos produtos não devem considerar apenas as métricas estatísticas do erro, mas também a coerência biótica dos valores obtidos, especialmente em ambientes opticamente complexos como é o caso da água (IOCCG, 2006).

Apesar das limitações verificadas nos resultados — na 4.ª temporada da Área A e na 2.ª temporada da Área E —, uma constante positiva ao longo de todas as campanhas foi o facto de cerca de 80% dos valores brutos de Clo-a extraídos das imagens (histogramas dos *raster* de valores acumulados; e histogramas comparativos da Clo-a imagem versus *In Situ*) se manterem dentro dos limites biópticos característicos das águas de Caso 1 (0 a 30 mg/m³), definidos por Morel (1988).

Por outro lado, apesar dos erros relativos elevados e correlações variáveis entre temporadas, os valores estimados de Clo-a mantiveram-se, de forma consistente, dentro dos limites biópticos definidos para águas de Caso 1 Morel (1988), o que confirma a plausibilidade física dos dados, mesmo quando a certeza estatística para análise quantitativa rigorosa se revelou algo limitada.

No que respeita aos coeficientes de correlação de Pearson e de determinação, verifica-se que, considerando as quatro campanhas realizadas nas áreas A e E, **os valores médios obtidos** apontam para uma correlação global moderada entre os dados *In Situ* e os valores estimados a partir das imagens, de acordo com a classificação proposta por Pestana e Gageiro (2014), (ve: Tabela 12 - Tabela 14).

²⁹ Validação é a comparação entre observações de campo e dados de satélite, tem sido a maneira tradicional de avaliar produtos de satélite (Mélin, 2019).

Se analisarmos especificamente por temporadas verifica-se:

- Uma **correlação forte**, de acordo com Pestana e Gageiro (2014): na 1ª e 3ª temporadas da (área A); na 2ª e 3ª temporada (área E).
- Uma **correlação moderada**, segundo Pestana e Gageiro (2014): na 2ª e 4ª temporadas da (área A); na 1ª e 4ª temporada (área E).

Os resultados supra, em concordância com as análises abordadas nos parágrafos anteriores, ajudam a reforçar a adequação bióptica geral do algoritmo no contexto dos ambientes costeiros analisados.

De um modo geral, a análise dos produtos obtidos permite asseverar que o algoritmo C2RCC demonstrou potencial na estimativa espacial da concentração de Clo-a em ambientes costeiros, ainda que com limitações pontuais em determinadas campanhas. A sua utilidade é particularmente evidente em aplicações exploratórias e na identificação de padrões de variação sazonal.

7. Conclusões

A Clo-a, é o principal pigmento responsável pela fotossíntese e está presente em todos os organismos fotossintetizantes, incluindo o fitoplâncton. Trata-se do principal indicador do estado trófico dos ecossistemas marinhos.

Neste contexto, a monitorização da Clo-a assume particular relevância em ambientes costeiros, caracterizados por elevada variabilidade espacial e temporal, onde as técnicas de deteção remota oferecem uma abordagem complementar às medições *In Situ*.

A presente dissertação teve como objetivo central avaliar a aplicabilidade de dados de deteção remota, adquiridos pelo sensor OLCI da missão Sentinel-3 e processados com o algoritmo C2RCC, na estimativa da concentração de Clo-a em ambientes costeiros da costa atlântica portuguesa. A investigação foi conduzida com base num objetivo principal e dois objetivos secundários, relembrados em seguida.

Objetivo principal: «Avaliar o potencial da deteção remota por satélite na estimativa de concentração da Clo-a em ambientes costeiros portugueses».

Primeiro objetivo secundário: «Estimar a concentração de clorofila na Costa Portuguesa através da aplicação do algoritmo C2RCC, com recurso a imagens multiespectrais colhidas pelo sensor OLCI da constelação Sentinel-3».

Segundo objetivo secundário: «Comparar os valores de Clo-a calculados através o algoritmo C2RCC e as concentrações obtidas em laboratório através de processamentos de amostras de água colhidas *In Situ*, obtidas durante quatro campanhas oceanográficas (Out2018, Mai2019, Out2019 e Mar2020), levadas a cabo pelo (IH) no âmbito de caracterização geral de áreas aquícolas para estabelecimento de culturas marinhas, integradas no projeto Aquimar».

Com respeito ao primeiro objetivo secundário conclui-se que:

1. A análise integrada dos resultados obtidos ao longo das quatro temporadas evidenciam o potencial do algoritmo C2RCC para estimar a concentração de Clo-a em diferentes contextos sazonais e espaciais.
2. Os resultados demonstraram que o C2RCC apresenta, em geral, um desempenho satisfatório na deteção de padrões espaciais e sazonais da Clo-a, com coeficientes de correlação de Pearson e de determinação (R^2) de moderados a fortes, particularmente nas 1.ª e 3.ª campanhas.
3. Ainda que tenham sido registados erros relativos elevados em determinadas campanhas como as das - 4.ª da área A e a 2.ª da área E, os valores extraídos das imagens mantiveram-se, em cerca de 80% dos casos, dentro dos intervalos típicos para águas de Caso 1 (0 a 30 mg/m³), conforme os limites estabelecidos por Morel (1988), o que valida o seu uso em contextos de caracterização geral de áreas aquícolas.

Assim, o C2RCC revela uma ferramenta válida para monitorização preliminar e identificação de padrões espaciais, em contextos de elevada diversidade ótica, como os que caracterizam as zonas costeiras atlânticas portuguesas.

Relativamente ao segundo objetivo secundário mencionar que:

1. A análise estatística da comparação entre dados observados e estimados permitiu aferir, de forma mais rigorosa, a precisão do algoritmo, destacando-se novamente os melhores desempenhos nas 1.^a e 3.^a campanhas.
2. A comparação entre as classes das legendas dos mapas das imagens e os mapas dos valores *In Situ* conferiu maior consistência à informação anterior, permitindo aferir os intervalos típicos para águas de Caso 1 (0 a 30 mg/m³), conforme os limites estabelecidos por Morel (1988).

A análise estatística selecionada mostrou-se adequada com o que se pretendia estimar, deduzindo resultados que reforçam a consistência geral do modelo, embora se reconheçam limitações pontuais, como já aludido nas conclusões do primeiro objetivo secundário.

Por fim, no tocante ao objetivo principal, de acordo com os resultados obtidos pelos objetivos secundários, referir que a deteção remota se revela uma boa opção na estimativa de concentração da Clo-a em ambientes costeiros portugueses, logrando ser uma forma menos complexa de medição da qualidade da água, menos demorada e menos dispendiosa.

No que concerne com o projeto Aquimar, atrevo-me a referir de acordo com os resultados obtidos neste estudo, que o ambiente costeiro português tem boa qualidade de água, logo é expectável uma boa produção no domínio da aquicultura.

No domínio metodológico, destacam-se três contribuições relevantes:

- A adoção da interpolação IDW, pela sua simplicidade e baixo custo computacional;
- A resolução de um problema técnico no software SNAP, que impedia a exportação correta da banda de Clo-a em formato GeoTIFF. A solução passou pela exportação em formato NetCDF-4 e posterior conversão para CSV através de um script desenvolvido em Python, o que permitiu garantir a integridade dos dados utilizados na análise espacial.

- A criação manual de gráficos de Pareto para duas variáveis, em virtude das limitações do Microsoft Office 365 (Microsoft, 2025), reforçou a avaliação da qualidade dos produtos obtidos, possibilitando uma comparação mais eficaz entre valores *In Situ* e satélite.

Em termos globais, a análise dos resultados evidencia a adequação bioóptica do algoritmo C2RCC no contexto das áreas costeiras portuguesas analisadas, validando-o como ferramenta preliminar para a monitorização ambiental e identificação de padrões espaciais e sazonais da qualidade da água.

Tal como qualquer trabalho científico, esta dissertação não se esgota nos resultados aqui apresentados. Futuras investigações poderão aprofundar a análise das causas dos erros estatísticos identificados, ou mesmo comparar o desempenho do algoritmo C2RCC com novas missões, por exemplo, com a missão da NASA [...] lançada em 08 de fevereiro de 2024, com o nome de Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem (PACE)³⁰, cujo objetivo é realizar medições e fornecer registos de dados sobre ecologia marinha, cor dos oceanos... [...](NASA, 2024).

Deixam-se assim abertos múltiplos caminhos para investigações futuras.

³⁰ Fonte: <https://science.nasa.gov/mission/pace/>; jun2025

Referências Bibliográficas

- Ana Sutcliffe, Ana C. Brito, Carolina Sá, Fátima Sousa, Dmitri Boutov, & Brotas, V. (2016). *Observação da Terra: uso de imagens de temperatura da superfície do mar e cor do oceano para a monitorização de águas costeiras e oceânicas* (S. e. S. DGRM - Direção-Geral de Recursos Naturais, Ed.) https://www.researchgate.net/publication/312875913_OBSERVACAO_DA_TERRA_uso_de_imagens_de_temperatura_da_superficie_do_mar_e_cor_do_oceano_para_a_monitorizacao_de_aguas_costeiras_e_oceanicas
- Anabela Afonso, C. N. (2019a). Probabilidades e Estatística. In U. d. Évora (Ed.), *Probabilidades e Estatística* (pp. 53-75). <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/25959/3/ProbabilidadesEstatistica2019.pdf>
- Anabela Afonso, C. N. (2019b). Probabilidades Estatística. In U. d. Évora (Ed.), *Probabilidades e Estatística* (pp. 61). <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/25959/3/ProbabilidadesEstatistica2019.pdf>
- Astoreca, R., Rousseau, V., & Lancelot, C. (2009). Coloured dissolved organic matter (CDOM) in Southern North Sea waters: Optical characterization and possible origin. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85(4), 633-640. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.10.010>
- Aveiro, U.-U. d. (2021). *Método de medição rápida não sequencial da resposta da fluorescência da Clorofila a*. Retrieved 16 junho 2021 from <https://www.ua.pt/pt/perfil-tecnologico-13021>
- Bhargava, A., Sachdeva, A., Sharma, K., Alsharif, M. H., Uthansakul, P., & Uthansakul, M. (2024). Hyperspectral imaging and its applications: A review. *Heliyon*, 10(12), e33208. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33208>
- Blanco, A. C., Manuel, A., Jalbuena, R., Ticman, K., Medina, J. M., Gubatanga, E., Santos, A., Sta. Ana, R., Herrera, E., & Nadaoka, K. (2020). Estimation of Chl-a Concentration in Laguna Lake Using Sentinel-3 Olci Images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W11, 17-21. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W11-17-2020>
- Bloesch, J. (2009). Sediments of Aquatic Ecosystems. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00210-6>
- Blondeau-Patissier, D., Gower, J. F. R., Dekker, A. G., Phinn, S. R., & Brando, V. E. (2014). A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. *Progress in Oceanography*, 123, 123-144. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.12.008>
- Boman, G. K., Molz, F. J., & Güven, O. (1995). An evaluation of interpolation methodologies for generating three-dimensional hydraulic property distributions from measured data. *Groundwater*, 33(2), 247-258.

- Britannica, I. (2024a). *Marine ecosystem*. Retrieved 2024 from <https://www.britannica.com/biography/Timothy-Parsons>
- Britannica, I. (2024b). *Optical properties*. Retrieved 27-02-2024 from <https://www.britannica.com/science/seawater/Optical-properties>
- Brockmann, C., Doerffer, Roland, Peters, Marco, Stelzer, Kerstin, Embacher, Sabine, Ruescas, Ana. (2016). Evolution of the C2rcc Neural Network for Sentinel 2 and 3 or the Retrieval of Ocean <https://doi.org/https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016ESASP.740E..54B/abstract> (Living Planet Symposium)
- By Sam Lau, J. G., and Deb Nolan. (2023). *NetCDF Data*. https://learningds.org/ch/14/web_netCDF.html
- C. Munyati, N. I. S. (2021). Comparative suitability of ordinary kriging and Inverse Distance Weighted interpolation for indicating intactness gradients on threatened savannah woodland and forest stands *Environmental and Sustainability Indicators*, 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100151>
- Canada, G. o. (2021, 2021-09-02). *Histogram*. Retrieved mai2025 from <https://www150.statcan.gc.ca/n1/edu/power-pouvoir/ch9/histo/5214822-eng.htm>
- Canada., G. o. (2015, 2019-08-06). *Remote Sensing Tutorials*. Retrieved 11-02-2024 from <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>
- Cherif, E. K., Mozetič, P., Francé, J., Flander-Putrlé, V., Faganeli-Pucer, J., & Vodopivec, M. (2021). Comparison of In-Situ Chlorophyll-a Time Series and Sentinel-3 Ocean and Land Color Instrument Data in Slovenian National Waters (Gulf of Trieste, Adriatic Sea). *Water*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/w13141903>
- Conor Delaney, V. M., Kevin French, Sita Karki,, Vicky Veerkamp, M. A. A. G., Jenny Hanafin,, & Alastair McKinstry, E. J. a. A. G. (2023). Remote Sensing of Irish Surface Waters [The EPA is responsible for protecting and improving the nvironment as a valuable asset for the people of Ireland. We are committed to protecting people and the environment from the harmful effects of radiation and pollution]. 20 a 22. https://www.epa.ie/publications/research/water/Research_Report-443.pdf
- DGRM. (2018). Zonas Marítimas sob Soberania e ou Jurisdição Portuguesa. <https://www.dgrm.pt/am-ec-zonas-maritimas-sob-jurisdicao-ou-soberania-nacional>;
- DGRM. (2019, dec 2019). *Plano de Situação do Ordenamento do Espaço Marítimo Nacional*. Retrieved abr 14 from <https://www.dgrm.pt/psoem>
- Dias, T. G. (2022a). *Three-Dimensional Mapping of Ocean Variables and Marine Ecosystems Characterization on the Portuguese Coast* Nova Information Management School]. <http://hdl.handle.net/10362/146525>
- Dias, T. G. (2022b). *Three-Dimensional Mapping of Ocean Variables and Marine Ecosystems Characterization on the Portuguese Coast* Nova Information Management School]. <http://hdl.handle.net/10362/146525>
- Dias, T. G. (2022c). *Three-Dimensional Mapping of Ocean Variables and Marine Ecosystems Characterization on the Portuguese Coast* Nova Information Management School]. <http://hdl.handle.net/10362/146525>

- Dickey, T., Lewis, M., & Chang, G. (2006). Optical oceanography: Recent advances and future directions using global remote sensing and in situ observations. *Reviews of Geophysics*, 44(1). <https://doi.org/10.1029/2003rg000148>
- Donlon, C., Berruti, B., Buongiorno, A., Ferreira, M. H., Féménias, P., Frerick, J., Goryl, P., Klein, U., Laur, H., Mavrocordatos, C., Nieke, J., Rebhan, H., Seitz, B., Stroede, J., & Sciarra, R. (2012). The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 37-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.024>
- Engenharia, A. (2023, 23/07/2023). *Avaliação de Dados de Ondas Internas*. Retrieved mar 24 from <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-avaliacao-de-dados-de-ondas-internas/>
- Engenharia, A. (2025). *Pixels and Resolution in Remote sensing*. <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-pixels-and-resolution-in-remote-sensing/>
- ERIC, E.-A. (2025). *European contribution to the Argo programme*. Retrieved 16 mai from <https://www.euro-argo.eu/>
- ESA, E. S. A. (2011a). ATBD 2.9 — Pigment Index Retrieval in Case 1 Waters. (4), 9-2. <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/meris/atbd>
- ESA, E. S. A. (2011b). CoastColour-Overview_And_Outcome_BC_poster_20111011_DINA4.pdf. https://www.coastcolour.org/Poster_20111020/CoastColour-Overview_And_Outcome_BC_poster_20111011_DINA4.pdf
- ESA, E. S. A. (2011c). *Copernicus In Situ Component*. Retrieved abr 17 from <https://insitu.copernicus.eu/state-of-play/understanding-in-situ-data>
- ESA, E. S. A. (2015a). *Eduspace*. Retrieved 22-02-2024 from https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_PT/SEMAVD65P1G_0.html
- ESA, E. S. A. (2015b, 2015). *Elementos de Detecção Remota*. Retrieved 14/02/2024 from https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_PT/SEM9S365P1G_0.html
- ESA, E. S. A. (2016a). *OC4Me Chlorophyll*. Retrieved mar 30 from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-olci/level-2/oc4me-chlorophyll>
- ESA, E. S. A. (2016b). *Sentinel-3 OLCI User Guide*. Retrieved 11-02-2024 from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci>
- ESA, E. S. A. (2024a, 2024). *Europe's eyes on Earth: the EU's Copernicus Programme*. Retrieved 12-02-2024 from <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/copernicus-programme>
- ESA, E. S. A. (2024b). *Geophysical Measurements*. Retrieved mar 11 from <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-olci-instrument#Instrument>
- ESA, E. S. A. (2024c). *Overview of Sentinel-3 Mission*. Retrieved 12-02-2024 from <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-mission>
- ESA, E. S. A. (2024d, 2024). *S3 OLCI Instrument*. Retrieved 12-02-2024 from <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-olci-instrument>
- ESA, E. S. A. (2025). *Snap Download*. <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>

- ESRI. (2024a). Multidimensional raster data. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/help/data/imagery/an-overview-of-multidimensional-raster-data.htm>
- ESRI. (2024b). What is netCDF data. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/multidimensional/what-is-netcdf-data.htm>
- ESRI. (2025). Variogram. <https://support.esri.com/en-us/gis-dictionary/variogram>
- ESRI, E. S. R. I. (2021a). *How Kriging works*. Retrieved ago 12 from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- ESRI, E. S. R. I. (2021b). *Understanding how to create surfaces using geostatistical techniques*. Retrieved ago 12 from <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/understanding-how-to-create-surfaces-using-geostatistical-techniques.htm>
- ESRI, E. S. R. I. (2021c). *Understanding ordinary kriging*. Retrieved ago 15 from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/understanding-ordinary-kriging.htm>
- ESRI, E. S. R. I. (2024a). *How inverse distance weighted interpolation works*. Retrieved ago 19 from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>
- ESRI, E. S. R. I. (2024b). *Pixel size of image and raster data*. Retrieved 20-02-2024 from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.1/help/data/imagery/pixel-size-of-image-and-raster-data-pro-.htm>
- EU., E. C. s. (2021). *In situ Observations*. Retrieved mar 8 from https://www.eu4oceanobs.eu/eu_ocean_observing/collect-data/in-situ/
- Eunju Kim et al. S.-H. N., Chang Hyuk Ahn, Saeromi Lee, Jae-Wuk Koo, Tae-Mun Hwang (2022). Comparison of spatial interpolation methods for distribution map an unmanned surface vehicle data for chlorophyll-a monitoring in the stream. www.elsevier.com/locate/eti. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102637>
- Evelyn Brown, Angela Colling, Dave Park, John Phillips, Dave Rothery, & John Wright. (1995). *Seawater Its Composition, Properties and Behaviour*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-3715-2.X5000-X>
- Evelyn Brown, Angela Colling, John Phillips, Dave Rothery, & John Wright (1995). *Seawater Its Composition, Properties and Behaviour* (Second edition 1995 ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-3715-2.X5000-X>
- Florida, U. o. S. (1999). *Project Oceanography 1999* <https://www.marine.usf.edu/pjocan/packets/sp99/sp99.htm>
- Florida, U. o. S. (2019). An Ocean-Colour Time Series for Use in Climate Studies_ The Experience of the Ocean-Colour Climate Change Initiative (OC-CCI).pdf. *Webpage*. <https://doi.org/doi:10.3390/s19194285>
- Franco, S. (2022). Satellite-derived phytoplankton chlorophyll variability and long-term trends (1998-2021) in the Western Iberian Basin. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/56946>

- Fukushim, H. (1997). Factors to be Considered In Securing the Quality of Atmospheric Correction of Satellite Ocean Color Data. (22-02-2024). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0964-2749\(97\)80019-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0964-2749(97)80019-4)
- Geeksforgeeks. (2024a, 05 Aug, 2024). *Absolute Error and Relative Error: Formula and Equation*. Retrieved Ago 09 from <https://www.geeksforgeeks.org/absolute-error-and-relative-error-formula-and-equation/#absolute-error-and-relative-error-practice-questions>
- GeeksforGeeks. (2024b, 05 Jun, 2024). *Interquartile Range in Statistics*. Retrieved 05 ago from <https://www.geeksforgeeks.org/interquartile-range/>
- GeeksforGeeks. (2024c, 25 Jul, 2024). *Mean, Median and Mode*. Retrieved 31 JUL from <https://www.geeksforgeeks.org/mean-median-mode/#measures-of-central-tendency>
- Geeksforgeeks. (2024d, 16 May, 2024). *Scatter Plot*. Retrieved 21mai from <https://www.geeksforgeeks.org/scatter-plot/>
- Geography, G. (2024a, 2024). *Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation*. Retrieved ago 19 from <https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/>
- Geography, G. (2024b). *Tobler's First Law of Geography*. Retrieved ago 19 from <https://gisgeography.com/tobler-first-law-of-geography/>
- Gordon Gong it al. S. M., Sid E. O'Bryant. (2014). Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. www.elsevier.com/locate/envres, Volume 130, 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.12.005>
- Gotway, C. A., Ferguson, R. B., Hergert, G. W., & Peterson, T. A. (1996). Comparison of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 60(4), 1237-1247.
- Gower, J., King, S., Borstad, G., & Brown, L. (2004). Detection of Intense Plankton Blooms Using the Meris Optical Imager on Envisat. *Gayana (Concepción)*, 68(2). <https://doi.org/10.4067/s0717-65382004000200044>
- Group, E. P. S. (2025a). ETRS89 / Portugal TM06. *Find a coordinate system and get position on a map. Powered by EPSG database 12.013*. <https://epsg.io/3763>
- Group, E. P. S. (2025b). WGS 84 -- WGS84 - World Geodetic System 1984, used in GPS. <https://epsg.io/4326>
- Hafeez, S., Wong, M. S., Ho, H. C., Nazeer, M., Nichol, J., Abbas, S., Tang, D., Lee, K. H., & Pun, L. (2019). Comparison of Machine Learning Algorithms for Retrieval of Water Quality Indicators in Case-II Waters: A Case Study of Hong Kong. *Remote Sensing*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/rs11060617>
- Hidrográfico, I. (2023). Projeto Aquimar. <https://doi.org/https://www.hidrografico.pt/iprojeto/29#main>
- Hieronymi, M., Bi, S., Müller, D., Schütt, E. M., Behr, D., Brockmann, C., Lebreton, C., Steinmetz, F., Stelzer, K., & Vanhellemont, Q. (2023). Ocean color atmospheric correction methods in view of usability for different optical water types. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1129876>
- Inc, A. (2025). How to avoid common errors in site measurements. <https://attentive.ai/blog/how-to-avoid-common-errors-in-site-measurements>

- Institution, W. H. O. (2021). *Phytoplankton*. Retrieved mar 9 from <https://www.whoi.edu/know-your-ocean/ocean-topics/ocean-life/ocean-plants/phytoplankton/>
- IOCCG. (2000). *Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically Complex, Waters*. <https://www.ioccg.org/reports/report3.pdf>
- IOCCG. (2018). Measure water-leaving radiance. https://ioccg.org/wp-content/uploads/2018/07/lee-lecture-5_lw-mea.pdf
- IOCCG, I. O. C. C. G. (2006). Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. *IOCCG Report Number 5, 2006*, 109. <https://ioccg.org/wp-content/uploads/2015/10/ioccg-report-05.pdf>
- James B. Campbell. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (G. Press, Ed. Fifth Edition ed.). https://books.google.pt/books/about/Introduction_to_Remote_Sensing_Fifth_Edi.html?id=NkLmDjSS8TsC&redir_esc=y
- James L. Mueller, G. S. F. a. C. R. M., Editors, J. L. Mueller, A. M., Robert Frouin, Curtiss Davis, Robert Arnone, Kendall Carder, Z.P., Lee, R. G. S., Stanford Hooker, Curtis D. Mobley, Scott McLean, Brent Holben, Mark, Miller, C. P., Kirk D. Knobelspiesse, Giulietta S. Fargion, John Porter and Ken, & Voss, A. (2003). Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III: . https://seabass.gsfc.nasa.gov/wiki/System_Description/Protocols_Ver4_VolIII.pdf
- Jin Li, A. D. H. (2013). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. 17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Joan Brown, A. C., Dave Park, John Phillips, Dave Rothery, John Wriarth. (1995). *Seawater: Its Composition, Properties and Behaviour* (O. O. University, Ed. First Edition ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-3715-2.X5000-X>
- Kriesi, R. U.-E. W. T. b. (2020, 2020). *How are Data about the Ocean Collected*. <https://datalab.marine.rutgers.edu/ooi-lab-exercises/lab-1-the-collection-of-oceanographic-data/lab-1-1/>
- Kringen, D. (2024). What is the “a” in Chlorophyll-a? *South Dakota State University*. <https://extension.sdstate.edu/what-chlorophyll> (South Dakota State University)
- Kupidura, P., & Lesisz, K. (2022). The Impact of the Type and Spatial Resolution of a Source Image on the Effectiveness of Texture Analysis. *Remote Sensing*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/rs15010170>
- Kyryliuk, D., & Kratzer, S. (2019). Evaluation of Sentinel-3A OLCI Products Derived Using the Case-2 Regional CoastColour Processor over the Baltic Sea. *Sensors (Basel)*, 19(16). <https://doi.org/10.3390/s19163609>
- Laignel, B., Vignudelli, S., Almar, R., Becker, M., Bentamy, A., Benveniste, J., Birol, F., Frappart, F., Idier, D., Salameh, E., Passaro, M., Menende, M., Simard, M., Turki, E. I., & Verpoorter, C. (2023). Observation of the Coastal Areas, Estuaries and Deltas from Space. *Surveys in Geophysics*, 44(5), 1309-1356. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09757-6>
- Lee-Lueng Fu, R. M. (2013). Chapter 4 - Remote Sensing of the Global Ocean Circulation. *International Geophysics*, Volume 103, 2013, Pages 2083-2111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391851-2.00004-0>

- Liang, S. L. (2018). Sea Surface Albedo. *Comprehensive Remote Sensing, Volume 5*, 163-185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10371-9>
- Liu, B., D'Sa, E. J., Maiti, K., Rivera-Monroy, V. H., & Xue, Z. (2021). Biogeographical trends in phytoplankton community size structure using adaptive sentinel 3-OLCI chlorophyll a and spectral empirical orthogonal functions in the estuarine-shelf waters of the northern Gulf of Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112154>
- Long, R. J. (2011). The Marine Strategy Framework Directive: A new European approach to the regulation of the marine environment, marine natural resources and marine ecological resources. <MSFDarticleJENRL.pdf>. https://www.researchgate.net/publication/260964363_The_Marine_Strategy_Framework_Directive_A_new_European_approach_to_the_regulation_of_the_marine_environment_marine_natural_resources_and_marine_ecological_resources
- López-Serrano, P., Corral-Rivas, J., Díaz-Varela, R., Álvarez-González, J., & López-Sánchez, C. (2016). Evaluation of Radiometric and Atmospheric Correction Algorithms for Aboveground Forest Biomass Estimation Using Landsat 5 TM Data. *Remote Sensing*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/rs8050369>
- Luís Pesquer et al. A. C. s., Xavier Pons. (2010). Parallel ordinary kriging interpolation incorporating automatic variogram fitting. *Computers & Geosciences*, 464-473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.10.010>
- Mantas, V. M. J. S. (2016). Detecção remota de frentes oceânicas ao largo da costa Portuguesa (2003 – 2014).
- Manuel Gimond, G. (2023, 2023-12-15). *Chapter 14 Spatial Interpolation*. Retrieved ago 21 from <https://mgimond.github.io/Spatial/spatial-interpolation.html>
- Matplotlib. (2012, 2012 -2024). *Choosing Colormaps in Matplotlib*. Retrieved set 02 from <https://matplotlib.org/stable/users/explain/colors/colormaps.html>
- Matsushita, B., Yang, W., Chang, P., Yang, F., & Fukushima, T. (2012). A simple method for distinguishing global Case-1 and Case-2 waters using SeaWiFS measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 74-87. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.02.008>
- Mélin, F. (2019). From Validation Statistics to Uncertainty Estimates: Application to VIIRS Ocean Color Radiometric Products at European Coastal Locations. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.790948>
- Miaoju Chen, C. B. P., Anas Ghadouani and Christine Hanson. (2020). Influence of Storm Events on Chlorophyll Distribution Along the Oligotrophic Continental Shelf Off South-Western Australia. 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00287>
- Microsoft. (2023, 05 mar, 2023). *Componente Avaliar Modelo*. <https://learn.microsoft.com/pt-pt/azure/machine-learning/component-reference/evaluate-model?view=azureml-api-2>
- Microsoft. (2025). *Crie um gráfico de Pareto*. Retrieved 21mai from <https://support.microsoft.com/en-us/office/create-a-pareto-chart-a1512496-6dba-4743-9ab1-df5012972856>
- Minnesota, U. o. (2024, September 5, 2023). *Remote Sensing of Water Resources*. Retrieved abr 26 from <https://water.rs.umn.edu/chlorophyll>

- Miranda, R. J. P. (2009). *METODOLOGIA*. *Repositorio Universidade de Lisboa*. https://repositorio.ulisboa.pt/bitstream/10451/5489/9/ulfc096328_3_metodologia.pdf
- Mobley, C. (2020). Reflectances. 2024(mar 22), 140-147. <https://www.oceanopticsbook.info/view/inherent-and-apparent-optical-properties/reflectances>
- Mobley, C. (2021a). *HydroLight Sequoia Scientific HydroLight-Sequoia Scientific*. <https://oceanopticsbook.info/view/radiative-transfer-theory/level-2/hydrolight> (Ocean Optics Web Book)
- Mobley, C. (2021b, May 19, 2021). *Inherent Optical Properties*. Retrieved 01/03/2024 from <https://www.oceanopticsbook.info/view/inherent-and-apparent-optical-properties/inherent-optical-properties>
- Morel, A. (1988). Optical Modeling of the Upper Ocean in Relation to Its Biogenous Matter Content (Case I Waters). *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 93, 10749 - 10768. <https://hal.science/hal-03277765/document>
- Morel, A., & Gentili, B. (2004). Radiation transport within oceanic (case 1) water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C6). <https://doi.org/10.1029/2003jc002259>
- Morel, A., Huot, Y., Gentili, B., Werdell, P. J., Hooker, S. B., & Franz, B. A. (2007). Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach. *Remote Sensing of Environment*, 111(1), 69-88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.012>
- Morel, A., & Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color1. *Limnology and Oceanography*, 22(4), 709-722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- Moutzouris-Sidiris, I., & Topouzelis, K. (2021). Assessment of Chlorophyll-a concentration from Sentinel-3 satellite images at the Mediterranean Sea using CMEMS open source in situ data. *Open Geosciences*, 13(1), 85-97. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0204>
- NASA. (2012, 2012). *NOMAD: NASA bio-Optical Marine Algorithm Dataset*. <https://seabass.gsfc.nasa.gov/wiki/NOMAD>
- NASA. (2021, November 21, 2022). *Breathing Life into the Ocean*. Retrieved mar 8 from <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150656/breathing-life-into-the-ocean>
- NASA. (2024). *PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem) Mission*. Retrieved 04 jun from <https://www.eoportal.org/satellite-missions/pace-mission#summary>
- NASA. (2025a). AERONET. <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- NASA. (2025b). SeaBASS BOUSSOLE. [https://doi.org/http://www.obs-
vlfr.fr/Boussole/html/project/introduction.php](https://doi.org/http://www.obs-vlfr.fr/Boussole/html/project/introduction.php)
- NLM, N. L. o. M. (2024). *Finding and Using Health Statistics*. Retrieved 03 Ago from <https://www.nlm.nih.gov/oet/ed/stats/02-900.html>
- ODonohue, D. (2023, 01 may 2023). *Inverse Distance Weighting: A Comprehensive Guide to Understanding and Implementing IDW Interpolation*. <https://mapscaping.com/understanding-inverse-distance-weighting/>
- Pan, F., Wu, X., Zeng, Q., Tang, R., Wang, J., Lin, X., You, D., Wen, J., & Xiao, Q. (2024). A coarse pixel-scale ground “truth” dataset based on global in situ site measurements to support validation and bias correction of satellite surface albedo

- products. *Earth System Science Data*, 16(1), 161-176.
<https://doi.org/10.5194/essd-16-161-2024>
- Pedro, V. (2016). *Deteção Remota Com O QGIS*. 14dec2016. Retrieved 19mai from
<https://www.qgis.pt/detecao-remota-com-o-qgis/>
- Pestana, M. H., & Gageiro, J. N. (2020a). *Análise de Dados para Ciencias Sociais* (I. Sílabo, Ed.). <https://www.wook.pt/livro/analise-de-dados-para-ciencias-sociais-maria-helena-pestana/16037318>
- Pestana, M. H., & Gageiro, J. N. (2020b). *Análise de Dados para Ciencias Sociais* (I. Sílabo, Ed.). <https://www.wook.pt/livro/analise-de-dados-para-ciencias-sociais-maria-helena-pestana/16037318>
- Program, U. S. G. C. R. (2024). *Ocean Chlorophyll Concentrations*. Retrieved abr 05 from
<https://www.globalchange.gov/indicators/ocean-chlorophyll-concentrations>
- Qu, Y. (2018). Definition of Reflectance Quantities. 5.07 - *Sea Surface Albedo*, 5, 163-185.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10371-9>
- QGIS. (2025). *Download QGIS*. <https://qgis.org/download/>
- Sá, C. G. V. d. (2013). *Ocean Colour off the Portuguese Coast: Chlorophyll a products validation and applicability* Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências].
<https://repositorio.ul.pt/handle/10451/10592>
- Sara M. Maxwell, E. L. H., Rebecca L. Lewison, outros.. (2015). Dynamic ocean management: Defining and conceptualizing real-time management of the ocean., 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.03.014>
- Saul Mcleod, P. (2023, July 31, 2023). *Box Plot Explained: Interpretation, Examples, & Comparison*. Retrieved Ago 07 from
<https://www.simplypsychology.org/boxplots.html>
- Schiller, R. D. H. (2010). The MERIS Case 2 water algorithm. *International Journal of Remote Sensing, Volume 28*, (Issue 3-4: MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer)), 517-535.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431160600821127>
- Sentinelhub. (2023). *Simple RGB Composites (Sentinel-3)*. Retrieved mai 22 from
<https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-3/composites/>
- Silva, G. S. d. M., & Garcia, C. A. E. (2021). Evaluation of ocean chlorophyll-a remote sensing algorithms using in situ fluorescence data in Southern Brazilian Coastal Waters. *Ocean and Coastal Research*, 69, 19. <https://doi.org/10.1590/2675-2824069.20-014gsdms>
- Soulpage. (2023). *Mean Absolute Error* Retrieved Ago 09 from <https://soulpageit.com/ai-glossary/mean-absolute-error-explained/>
- Sousa, Á. (2019). Coeficiente de Correlação de Pearson e Coeficiente de correlação de Spearman. O que medem e em que situações devem ser utilizados? *Correio dos Açores*, 21 Março de 2019, 19. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10400.3/5365>
- Tran, M. D., Vantrepotte, V., Loisel, H., Oliveira, E. N., Tran, K. T., Jorge, D., Mériaux, X., & Paranhos, R. (2023). Band Ratios Combination for Estimating Chlorophyll-a from Sentinel-2 and Sentinel-3 in Coastal Waters. *Remote Sensing*, 15(6).
<https://doi.org/10.3390/rs15061653>

- University of Hawai'i. (2025). Practices of Science: Scientific Error. *Exploring Our Fluid Earth*. <https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/>
- Urraca, R., Lanconelli, C., & Gobron, N. (2024). Impact of the Spatio-Temporal Mismatch Between Satellite and In Situ Measurements on Validations of Surface Solar Radiation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(10). <https://doi.org/10.1029/2024jd041007>
- USGS. (2024). *What is remote sensing and what is it used for?* Retrieved 11-02-2024 from <https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used>
- Walkenbach, J. (2013). *Excel 2013 Bible*. Wiley Publishing. https://books.google.co.ug/books?id=jxtcCwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbvpt_reviews#v=onepage&q&f=false
- Werdell, P. J., McKinnis, L. I. W., Boss, E., Ackleson, S. G., Craig, S. E., Gregg, W. W., Lee, Z., Maritorena, S., Roesler, C. S., Rousseaux, C. S., Stramski, D., Sullivan, J. M., Twardowski, M. S., Tzortziou, M., & Zhang, X. (2018). An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing. *Progress in Oceanography*, 160, 186-212. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.01.001>
- Zaneveld, J. R. V. (2013). Fifty years of Inherent Optical Properties. *Methods in Oceanography*, 7, 3-20. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2014.03.002>
- Zhang, Y., Wang, K., Yue, W., Liu, S., Yu, J., & Ye, X. (2024). Optical Design and Stray Light Analysis of Underwater Spectral Radiometer. *Applied Sciences*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/app14083172>

8. Anexos

8.1. Informação Complementar Sobre os Resultados

8.1.1. Fatores que Podem Contribuir para a Limitação Estatística

Os desencontros estatísticos observados neste estudo, caracterizados por um erro relativo algo elevado e uma correlação de Pearson reduzida entre os valores *In Situ* e os estimados pelo algoritmo C2RCC, poderão ser explicados por um conjunto de fatores técnicos, ambientais e metodológicos que podem afetar a fiabilidade da validação por satélite.

Importa, antes de mais, compreender que o algoritmo C2RCC pode sobrestimar os valores de *Clo-a* em ambientes ricos em CDOM ou partículas em suspensão, onde a refletância é elevada e o modelo interpretar erroneamente esse sinal como clorofila (Liu et al. 2021).

Por outro lado, pode ocorrer subestimação em águas mais límpidas ou com fraca retrodispersão³¹, em que o sinal espectral associado à clorofila é reduzido ou mascarado por outros constituintes óticos (Hieronymi et al. 2023).

Além destas limitações intrínsecas ao modelo, destacam-se outros fatores que poderão contribuir para resultados estatísticos insatisfatórios, especialmente:

- O desfasamento temporal entre a aquisição da imagem de satélite e a recolha das amostras de campo, pode comprometer a compatibilidade dos dados, sobretudo em zonas costeiras onde a qualidade da água varia rapidamente em resposta a marés, descargas fluviais ou eventos meteorológicos (Delaney et al. 2023).
- A diferença de escala espacial também é relevante, uma vez que o sensor OLCI do Sentinel-3 tem uma resolução de 300 metros (ESA, 2024d), ao passo que [...] as medições *In Situ* são pontuais[...] (Pan et al. 2024).

³¹ Detecção Remota; Energia eletromagnética que é refletida de volta à sua origem por terreno ou partículas na atmosfera. Fonte: <https://support.ESRI.com/en-us/gis-dictionary/backscatter>; jun2025

- [...] Em áreas com gradientes ambientais acentuados, como zonas de transição estuarina ou de descarga costeira, isto pode-se dever, em grande parte, à escassez de observações *In Situ* do nível da água, o que pode originar desvios significativos entre os dois conjuntos de dados [...](Laignel et al. 2023).
- A heterogeneidade ótica local resultante da presença simultânea de clorofila, CDOM e partículas não algais (Zaneveld, 2013), pode interferir com o sinal espectral e induzir em erros na estimativa da Clo-a (Astoreca et al. 2009), uma vez que o C2RCC não é calibrado para todas as variações regionais e biópticas (Kyryliuk & Kratzer, 2019).
- Possíveis erros na correção atmosférica, provocados por neblina, aerossóis ou limitações do modelo atmosférico, os quais afetam a refletância de entrada no algoritmo e (Serrano et al. 2016), por consequência, a qualidade do produto final (ESA, 2024c).
- Não se deve negligenciar a qualidade das medições de campo, que pode ser comprometida por condições adversas (*p.ex.*; temperaturas extremas, vento ou fraca visibilidade, profundidade inadequada, erros de calibração e a observação humana), podem afetar diretamente a precisão das medições (Inc, 2025), ou ausência de replicações (Hawai'i, 2025).

Estes fatores, isolados ou em conjunto, poderão ajudar a explicar alguma fraca correlação estatística registada nestas campanhas, reforçando a necessidade de interpretação crítica dos dados de validação.

8.2. Tabelas dos Parâmetros de Processamento do Processador C2RCC de Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores *In Situ*

Importa lembrar que o processador permite a personalização de parâmetros auxiliares, de modo a adaptar-se às propriedades óticas locais — neste caso, a salinidade e a temperatura (Kiryliuk & Kratzer, 2019).

Estes parâmetros foram definidos com base na correspondência temporal com as campanhas *In Situ*, considerando o cálculo da média das colunas de salinidade e temperatura das tabelas de valores amostrais recolhidos nas quatro campanhas realizadas no âmbito do projeto Aquimar, para as áreas de estudo A e E (Hidrográfico, 2023).

Nos subanexos (8.2.1), (8.2.2), apresentam-se as tabelas com os valores médios de salinidade e temperatura das áreas de estudo A e E, utilizados pelo processador C2RCC, fundamentais para a sua adaptação às propriedades óticas locais (Kiryliuk & Kratzer, 2019).

No subanexo (8.2.4), apresenta-se a tabela de comparação das legendas dos mapas dos valores de Clo-a *In Situ* e das imagens, seguida dos subanexos (8.2.4), (8.2.5), onde se podem visualizar os histogramas de Pareto dos raster gerados a partir dos valores *In Situ* — áreas de estudo A e E.

8.2.1. Tabelas dos Valores Médios Globais de Salinidade e Temperatura Utilizados como Parâmetros de Entrada no Processador C2RCC – Área A

Os valores das variáveis de salinidade e temperatura, necessários ao processamento do C2RCC para a área de estudo A, correspondem às médias globais calculadas a partir dos dados amostrais *In Situ*, conforme sintetizado nas Tabelas 16 a 19, e foram posteriormente utilizados como parâmetros de entrada no processamento das imagens OLCI.

Tabela 16 - Valores de variáveis - processador C2RCC - 1ºTemp A

Parâmetros de Processamento do C2RCC - OLCI		
Imagem de Satélite de 20181020 - 1ª temporada A		
Nome	Valores	Unidades
Salinidade	35,55	PSU
Temperatura	16,19	°C

Tabela 17- Valores de variáveis - processador C2RCC - 2ºTemp A

Parâmetros de Processamento do C2RCC - OLCI		
Imagem de Satélite de 20190505 - 2ª temporada A		
Nome	Valores	Unidades
Salinidade	35,56	PSU
Temperatura	14,65	°C

Tabela 18- Valores de variáveis - processador C2RCC - 3ºTemp A

Parâmetros de Processamento do C2RCC - OLCI		
Imagem de Satélite de 20191025 - 3ª temporada A		
Nome	Valores	Unidades
Salinidade	35,37	PSU
Temperatura	15,89	°C

Tabela 19- Valores de variáveis - processador C2RCC - 4ºTemp A

Parâmetros de Processamento do C2RCC - OLCI		
Imagem de Satélite de 20200318 - 4ª temporada A		
Nome	Valores	Unidades
Salinidade	35,71	PSU
Temperatura	13,37	°C

8.2.2. Tabelas dos Valores Médios Globais de Salinidade e Temperatura Utilizados como Parâmetros de Entrada no Processador C2RCC – Área E

Os valores das variáveis de salinidade e temperatura, necessários ao processamento do C2RCC para a área de estudo E, correspondem às médias globais calculadas a partir dos dados amostrais *In Situ*, conforme sintetizado nas Tabela 20 e Tabela 23, e foram posteriormente utilizados como parâmetros de entrada no processamento das imagens OLCI

Tabela 20 - Valores de variáveis - processador C2RCC - 1ªTemp E

Parâmetros de Processamento do C2RCC - OLCI		
Imagem de Satélite de 20181017 - 1ª temporada E		
Nome	Valores	Unidades
Salinidade	36,67	PSU
Temperatura	22,59	°C

Tabela 21 - Valores de variáveis - processador C2RCC - 2ªTemp E

Parâmetros de Processamento do C2RCC - OLCI		
Imagem de Satélite de 20190422 - 2ª temporada E		
Nome	Valores	Unidades
Salinidade	36,11	PSU
Temperatura	15,79	°C

Tabela 22 - Valores de variáveis - processador C2RCC - 3ªTemp E

Parâmetros de Processamento do C2RCC - OLCI		
Imagem de Satélite de 20191010 - 3ª temporada E		
Nome	Valores	Unidades
Salinidade	36,19	PSU
Temperatura	18,20	°C

Tabela 23 - Valores de variáveis - processador C2RCC - 4ªTemp E

Parâmetros de Processamento do C2RCC - OLCI		
Imagem de Satélite de 20200227 - 4ª temporada E		
Nome	Valores	Unidades
Salinidade	36,33	PSU
Temperatura	15,70	°C

8.2.3. Tabela de Comparação das Legendas dos Mapas dos Valores Clo-a *In Situ* e Imagens

A relação entre os valores de clorofila-a obtidos *In Situ* e os valores estimados a partir das imagens de satélite, resultante da comparação efetuada no presente estudo, é sintetizada na Tabela 24, servindo de apoio aos comentários subsequentes.

Tabela 24 - Comparação das legendas dos mapas dos valores Clo-a - *In Situ* e Imagens

Comparação das legendas dos raster dos valores Clo-a (<i>In Situ</i> com as Imagens de satélite)										
Temporadas/Área	Número de Intervalos usados na classificação dos dados da Clo-a = 7 Classes em (mg/m ³)									
	Figuras	In Situ	Classe - 1	Classe - 2	Classe - 3	Classe - 4	Classe - 5	Classe - 6	Classe - 7	Obs.
		Imagens								
1ª Temp A	(Figura 12)		<=1,11	1,11 - 1,72	1,72 - 2,34	2,34 - 2,95	2,95 - 3,57	3,57 - 4,18	>4,18	
	(Figura 20)		<=1,50	1,50 - 2,91	2,91 - 4,33	4,33 - 5,74	5,74 - 7,15	7,15 - 8,56	>8,56	
2ª Temp A	(Figura 13)		<=2,61	2,61 - 4,50	4,50 - 6,40	6,40 - 8,29	8,29 - 10,19	10,19 - 12,08	>12,08	
	(Figura 21)		<=1,43	1,43 - 2,79	2,79 - 4,16	4,16 - 5,53	5,53 - 6,89	6,89 - 8,26	>8,26	
3ª Temp A	(Figura 14)		<=0,76	0,76 - 1,24	1,24 - 1,71	1,71 - 2,18	2,18 - 2,65	2,65 - 3,12	>3,12	
	(Figura 22)		<=1,18	1,18 - 2,32	2,32 - 3,46	3,46 - 4,60	4,60 - 5,75	5,75 - 6,89	>6,89	
4ª Temp A	(Figura 15)		<=0,46	0,46 - 0,79	0,79 - 1,12	1,12 - 1,46	1,46 - 1,79	1,79 - 2,12	>2,12	
	(Figura 23)		<=1,36	1,36 - 2,65	2,65 - 3,94	3,94 - 5,23	5,23 - 6,53	6,53 - 7,82	>7,82	
1ª Temp E	(Figura 16)		<=0,16	0,16 - 0,31	0,31 - 0,47	0,47 - 0,63	0,63 - 0,79	0,79 - 0,94	>0,94	
	(Figura 24)		<=1,37	1,37 - 2,70	2,70 - 4,04	4,04 - 5,38	5,38 - 6,72	6,72 - 8,06	>8,06	
2ª Temp E	(Figura 17)		<=1,26	1,26 - 2,25	2,25 - 3,24	3,24 - 4,23	4,23 - 5,22	5,22 - 6,21	>6,21	
	(Figura 25)		<=1,45	1,45 - 2,86	2,86 - 4,26	4,26 - 5,66	5,66 - 7,06	7,06 - 8,47	>8,47	
3ª Temp E	(Figura 18)		<=1,51	1,51 - 2,93	2,93 - 4,34	4,34 - 5,75	5,75 - 7,17	7,17 - 8,58	>8,58	
	(Figura 26)		<=1,44	1,44 - 2,84	2,84 - 4,25	4,25 - 5,66	5,66 - 7,06	7,06 - 8,47	>8,47	
4ª Temp E	(Figura 19)		<=0,30	0,30 - 0,47	0,47 - 0,64	0,64 - 0,81	0,81 - 0,98	0,98 - 1,16	>1,16	
	(Figura 27)		<=1,33	1,33 - 2,62	2,62 - 3,90	3,90 - 5,18	5,18 - 6,46	6,46 - 7,75	>7,75	

Nos parâmetros referentes à Área A, a correspondência entre as classes das imagens e os valores *In Situ* revela algumas variações entre as campanhas.

- Na 3.^a Temporada A, observa-se uma melhor concordância, com cerca de 80% dos valores *In Situ* enquadrados nos intervalos das imagens entre $\leq 1,18$ e $4,60 \text{ mg/m}^3$, refletindo uma boa aproximação entre ambas as fontes de dados.
- Na 1.^a Temporada A, essa coincidência estimá-la-ia como moderada, abrangendo aproximadamente 70% dos valores *In Situ*, encaixados nas classes das imagens entre $\leq 1,50$ e $5,74 \text{ mg/m}^3$, refletindo aproximação entre ambas as fontes de dados sendo o remanescente das classes das imagens com limites superiores mais elevados, provavelmente devido a fatores como *p.ex.*, [...]sobrestimação das imagens...[...] (Liu et al. 2021).
- Já na 4.^a Temporada A, estima-se que aproximadamente 60% dos valores *In Situ* coincidem com as classes das imagens entre $\leq 1,36$ e $5,23 \text{ mg/m}^3$, sendo o remanescente das classes das imagens com limites superiores mais elevados, possivelmente devido a fatores como *p.ex.* [...]...sobrestimação das imagens...[...] (Liu et al. 2021).
- Quanto à menor correspondência, esta verifica-se na 2.^a Temporada A, onde se estima que aproximadamente 50% dos valores *In Situ* se enquadram nas classes das imagens entre $\leq 1,43$ e $5,53 \text{ mg/m}^3$, uma vez que os dados *In Situ* atingem concentrações superiores às estimadas por satélite.

De forma geral, a correspondência tende a ser melhor nas campanhas com concentrações de Clo-a entre os $0,76$ e $4,60 \text{ mg/m}^3$, sendo menos eficaz nas classes de valores extremos (muito baixos ou muito altos), revelando algumas limitações na sensibilidade do algoritmo às variações locais, tendo em conta *p.ex.* [...] heterogeneidade ótica local resultante da presença simultânea de clorofila, CDOM e partículas não algais [...] (Zaneveld, 2013), já apresentados no subanexo (8.1.1).

No que diz respeito aos padrões da Área E, a relação entre as classes das imagens e os valores *In Situ* revelam algumas variações entre as diferentes campanhas:

Neste pressuposto, nas 1.^a e 4.^a Temporadas E, estima-se:

- Que cerca de 80% dos valores *In Situ* situam-se abaixo dos limites inferiores das classes nas imagens entre $\leq 1,37$ e $5,38 \text{ mg/m}^3$, o que poderá indiciar [...] alguma sobrestimação da concentração de Clo-a pelo algoritmo [...] (Liu et al. 2021), nesta área de baixos valores.

Por outro lado, nas 2.^a e 3.^a Temporadas E, estimaram-se melhores correspondências assim:

- Na 2.^a Temporada E, cerca de 70% dos valores *In Situ* coincidem com as classes das imagens entre $\leq 1,45$ e $5,56 \text{ mg/m}^3$, refletindo aproximação entre ambas as fontes de dados.
- Já na 3.^a Temporada E, cerca de 80% dos valores *In Situ* coincidem com os intervalos das imagens entre $\leq 1,44$ e $7,06 \text{ mg/m}^3$ demonstrativo de uma boa aproximação entre ambas as fontes de dados.

Assim sendo, na Área E, os limites superiores das classes definidas nas imagens e os intervalos efetivamente observados *In Situ* revelaram algumas discrepâncias, evidenciando limitações na sensibilidade do algoritmo. No entanto, os intervalos das imagens compreendidos entre $1,44$ e $7,06 \text{ mg/m}^3$, permitem referir a existência de uma boa aproximação entre ambas as fontes de dados nesta zona do estudo.

Em suma, as diferenças nas classes de classificação que refletem limitações entre os dados *In Situ* e as imagens de satélite, nas duas áreas de estudo, podem estar associadas, conforme já referido, [...]...à sobrestimação do algoritmo...[...] (Liu et al. 2021), ou à [...]...resolução espacial das imagens ...[...] (ESA, 2024d), ou outros fatores cuja análise mais detalhada sobre estas limitações pode-se ver no subanexo (8.1.1).

Contudo, importa referir, que os valores de Clo-a estimados nas duas áreas, ao longo das quatro campanhas, apesar das limitações assinaladas, situam-se dentro dos intervalos compatíveis com a gama definida por Morel (1988), para águas de Caso 1 (0 a 30 mg/m^3), o que permite inferir o potencial do algoritmo C2RCC, na estimativa da concentração de Clo-a em ambientes oceânicos.

8.2.4. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores *In Situ* — Área A

Gráfico 1- Histograma em valores acumulados do raster de valor *In Situ*, 1ª temporada/campanha - A

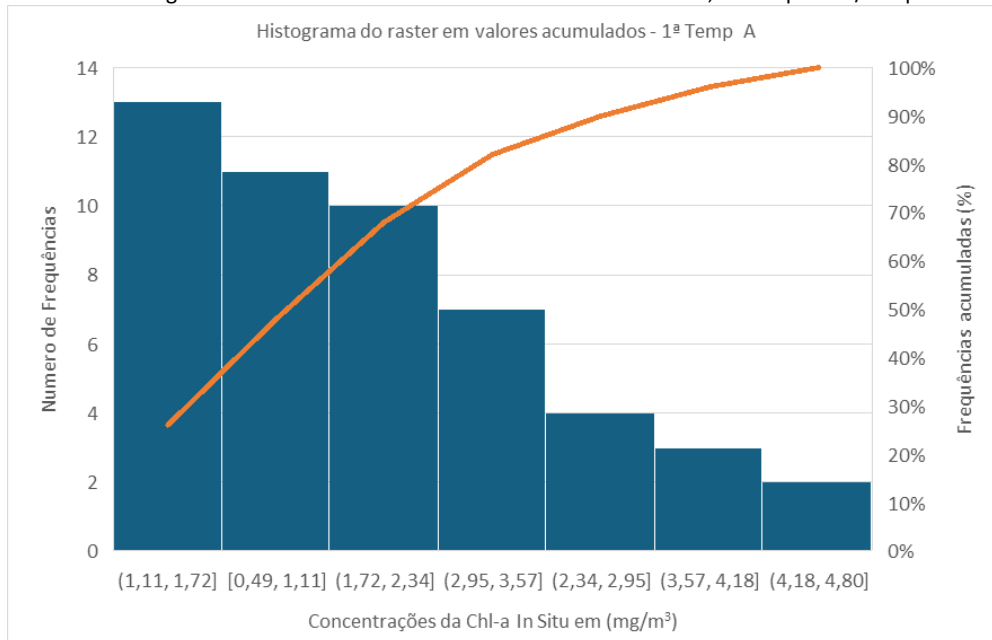


Gráfico 2 - Histograma em valores acumulados do raster de valor *In Situ*, 2ª temporada/campanha - A

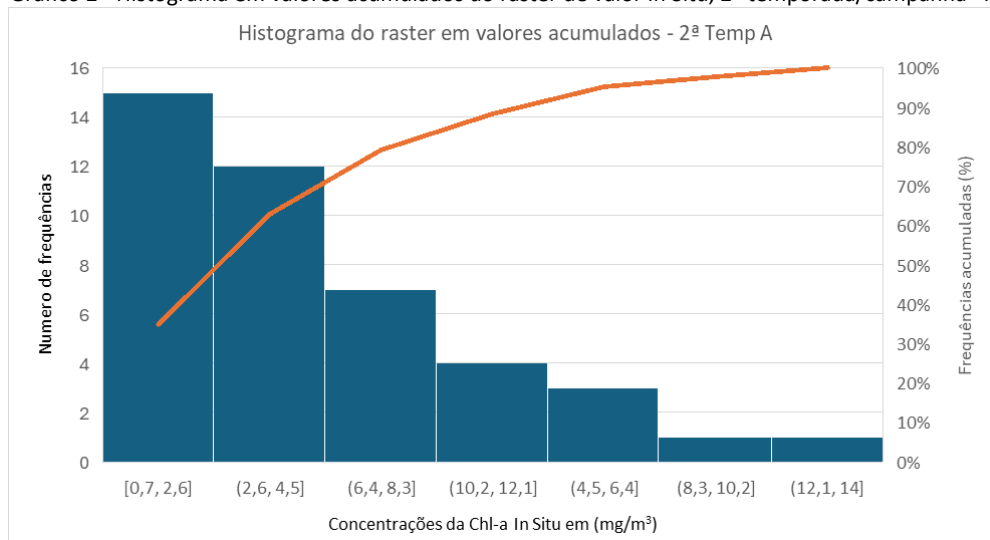


Gráfico 3- Histograma em valores acumulados do raster de valor In Situ, 3ª temporada/campanha - A

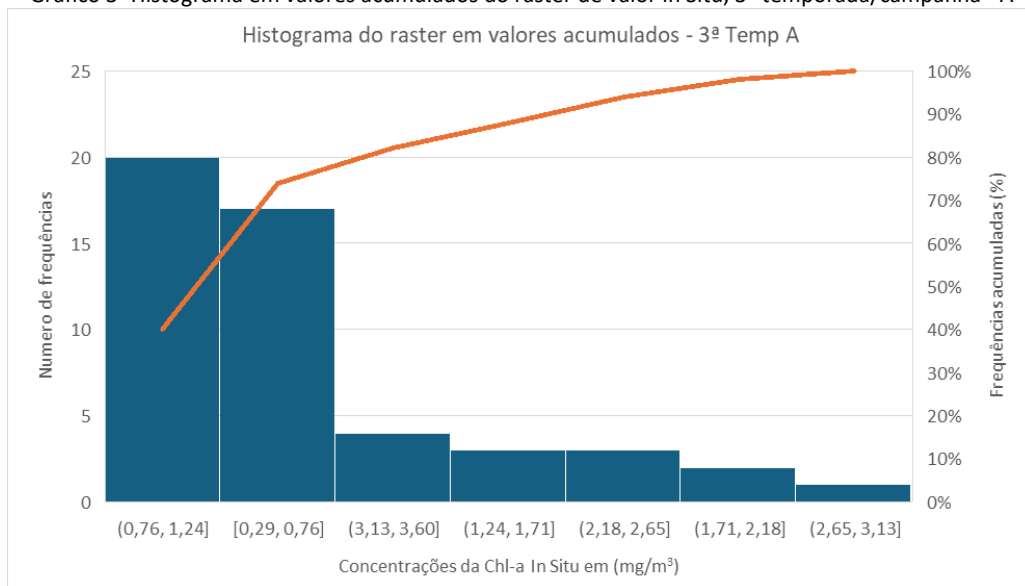
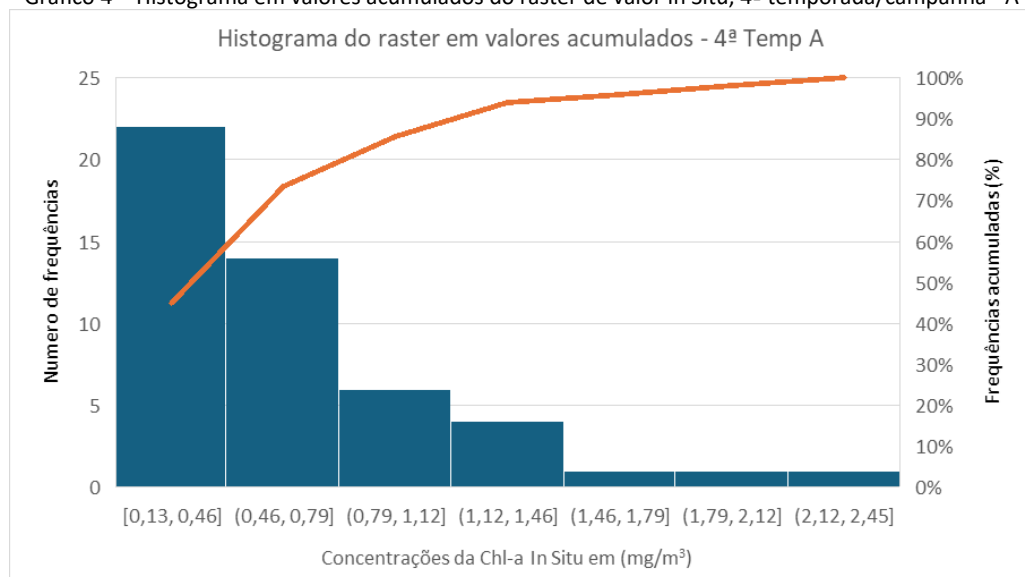


Gráfico 4 - Histograma em valores acumulados do raster de valor In Situ, 4ª temporada/campanha - A



8.2.5. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores *In Situ* — Área E

Gráfico 5- Histograma em valores acumulados do raster de valor *In Situ*, 1ª temporada/campanha - E

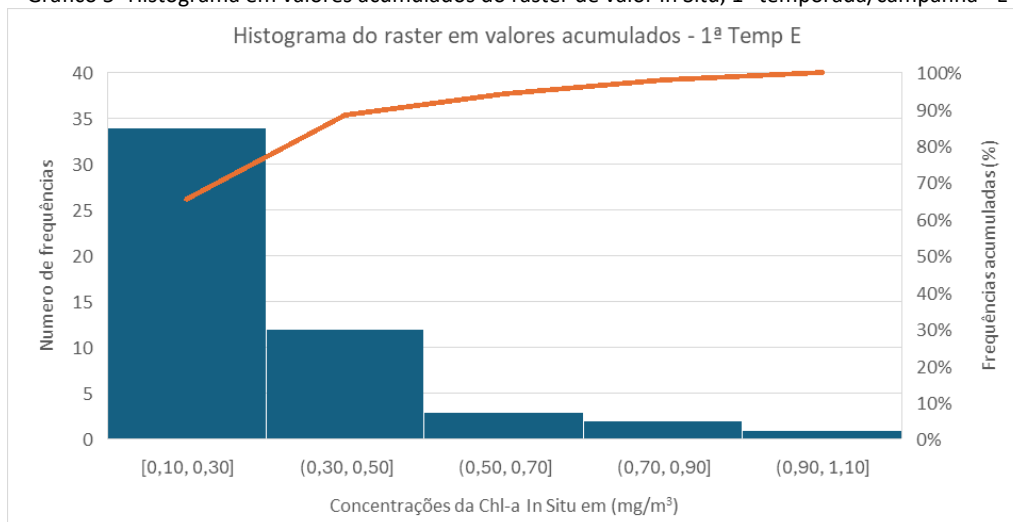


Gráfico 6 - Histograma em valores acumulados do raster de valor *In Situ*, 2ª temporada/campanha - E

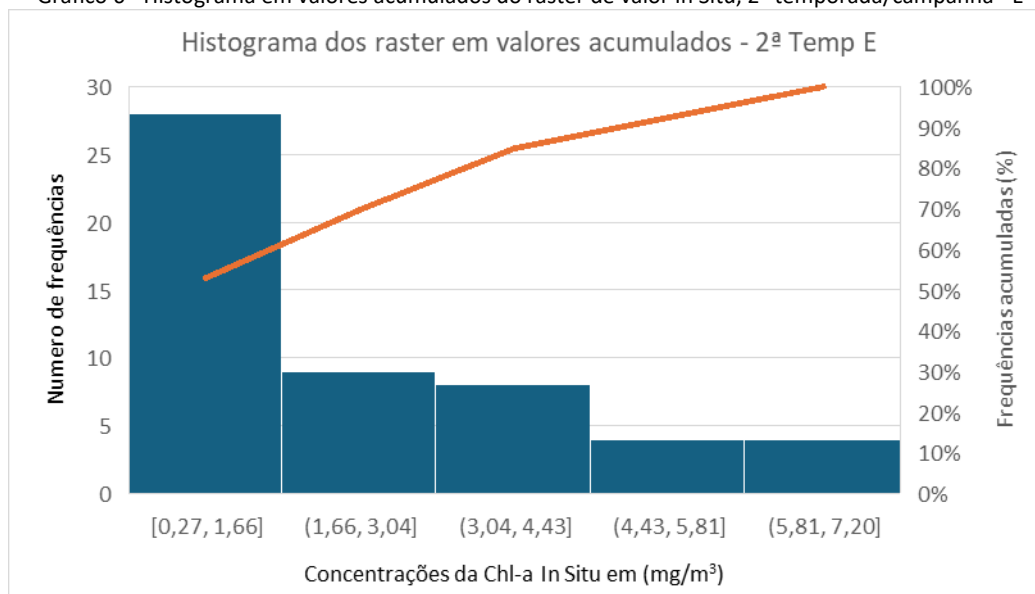


Gráfico 7 - Histograma em valores acumulados do raster de valor In Situ, 3ª temporada/campanha - E

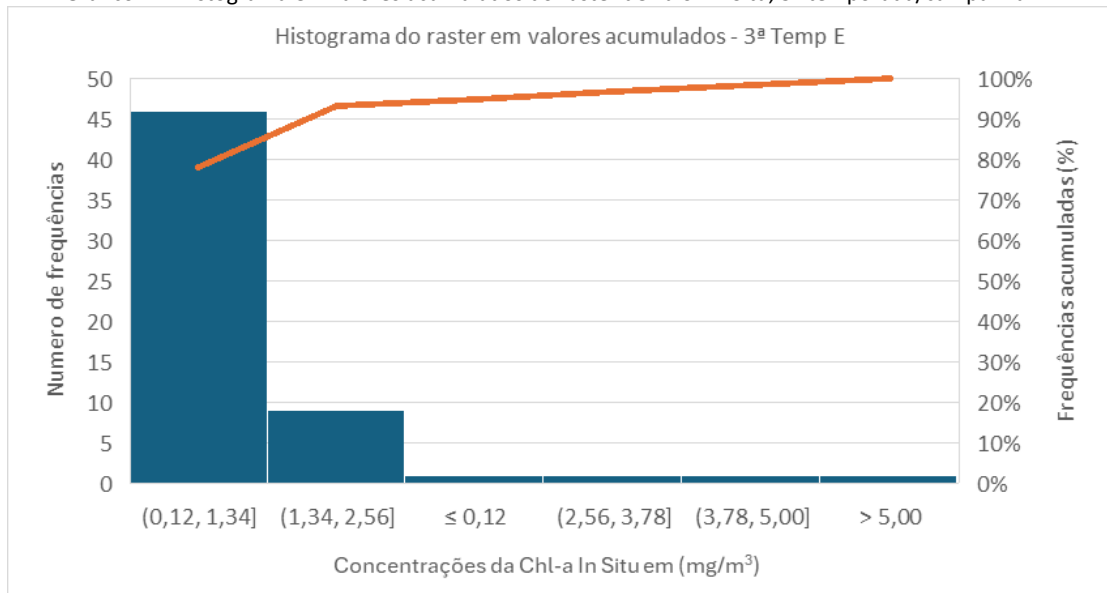
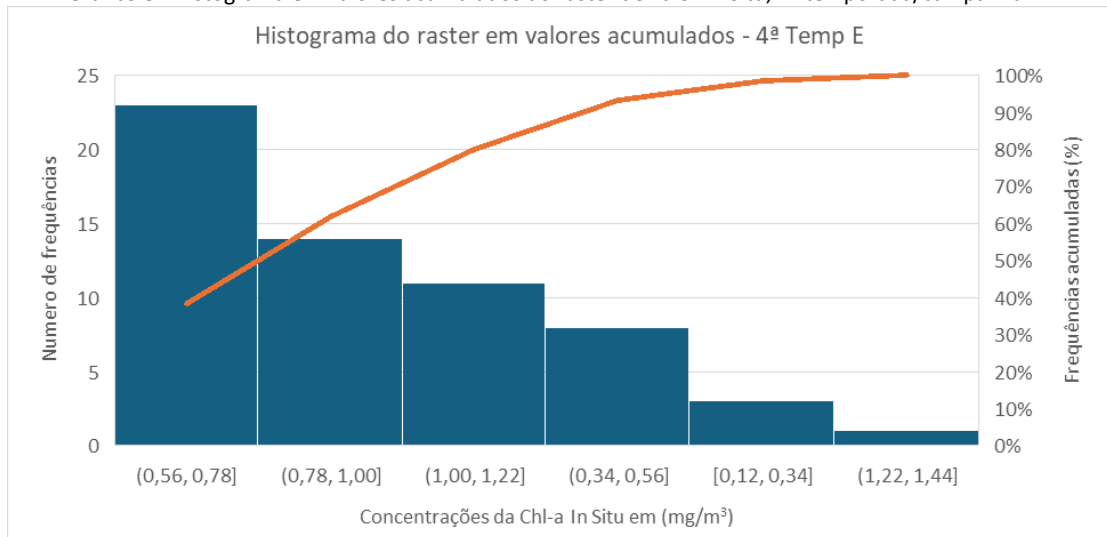


Gráfico 8 - Histograma em valores acumulados do raster de valor In Situ, 4ª temporada/campanha - E



8.3. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores das Imagens

Neste anexo, apresentam-se os subanexos (8.3.1), (8.3.2), onde se podem visualizar os histogramas de Pareto dos rasters gerados a partir dos valores das imagens — áreas de estudo A e E.

8.3.1. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a partir de Valores das Imagens — Área A

Gráfico 9 - Histograma em valores acumulados do raster de valor da imagem, 1ª temporada/campanha - A

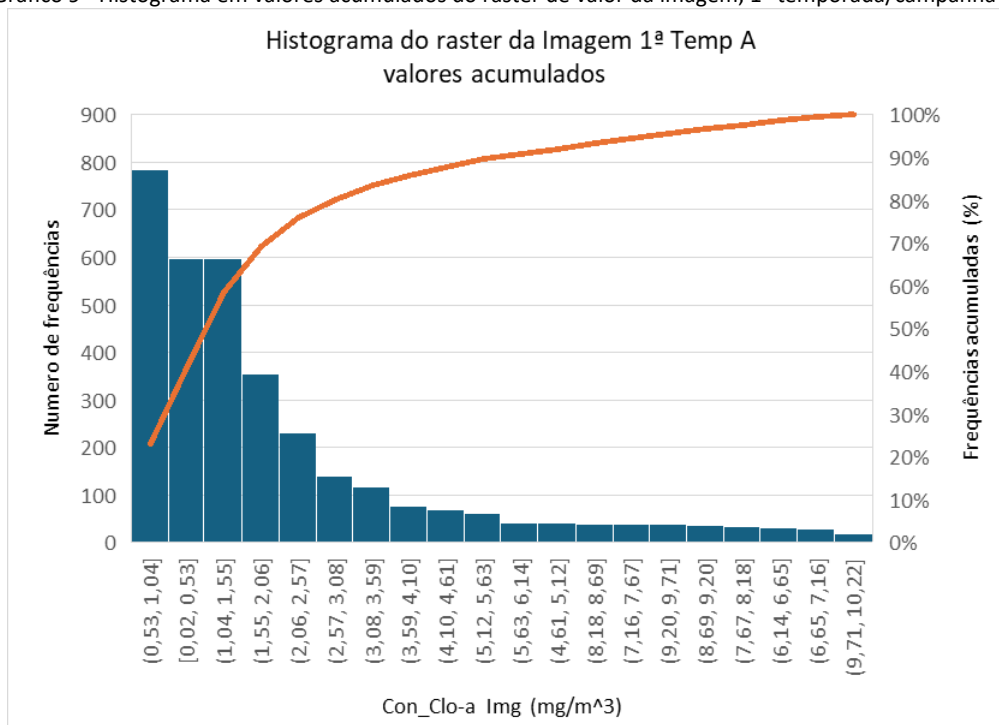


Gráfico 10 - Histograma em valores acumulados do raster de valor da imagem, 2ª temporada/campanha - A

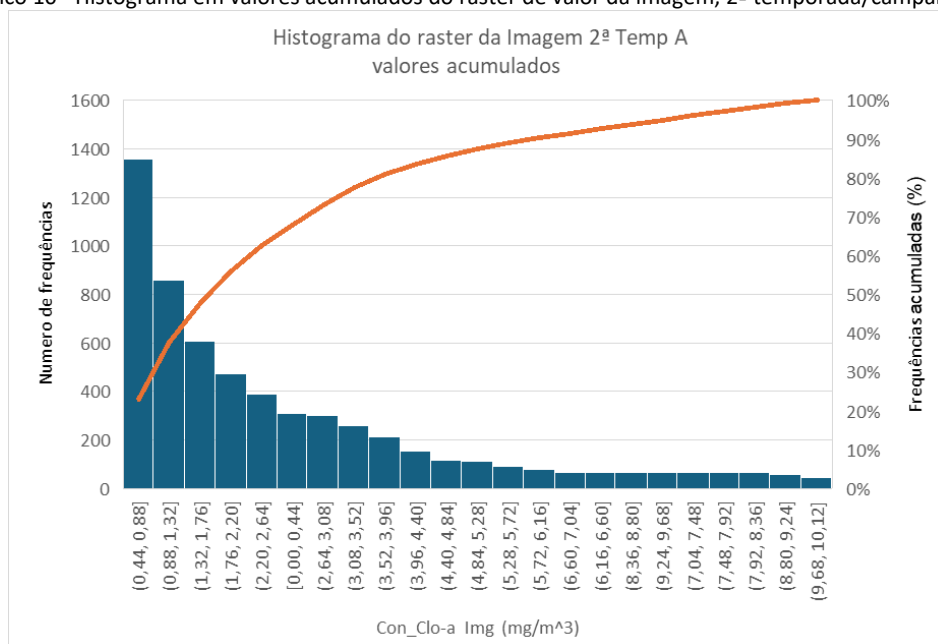


Gráfico 11 - Histograma em valores acumulados do raster de valor da imagem, 3ª temporada/campanha - A

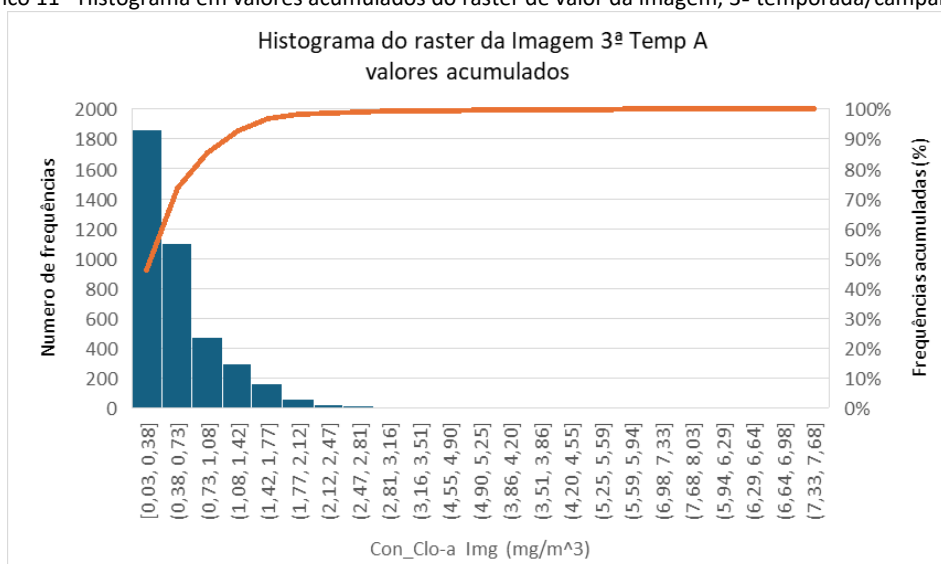
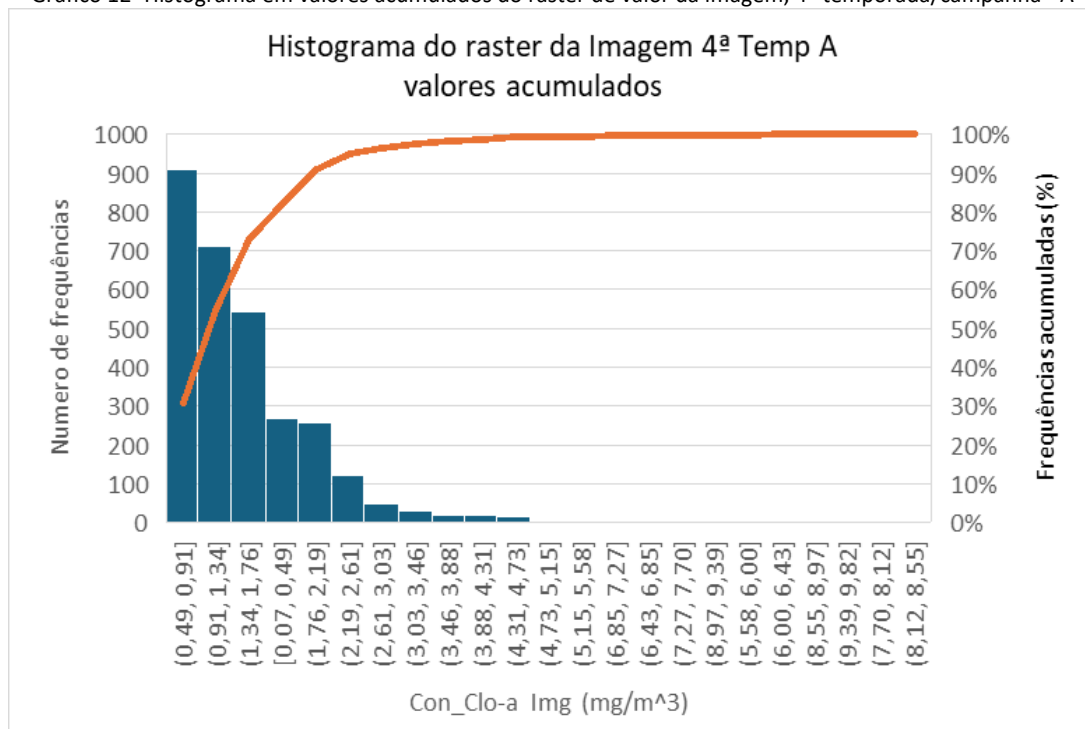


Gráfico 12- Histograma em valores acumulados do raster de valor da imagem, 4ª temporada/campanha - A



8.3.2. Histogramas de Pareto dos Rasters Gerados a Partir de Valores das Imagens — Área E

Gráfico 13 - Histograma em valores acumulados do raster de valor da imagem, 1ª temporada/campanha - E

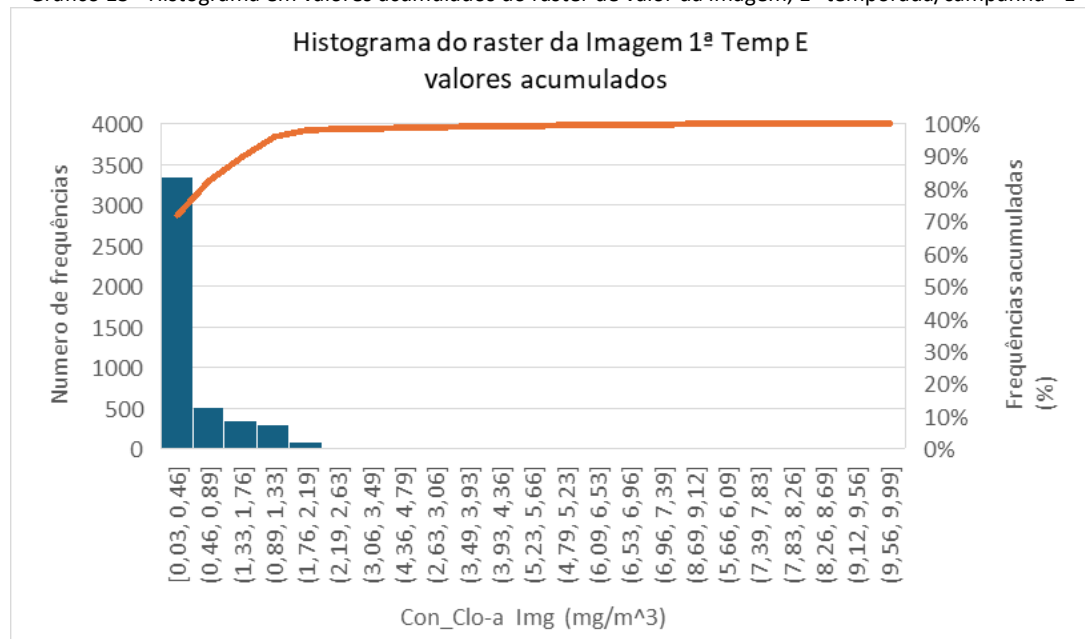


Gráfico 14 - Histograma em valores acumulados do raster de valor da imagem, 2ª temporada/campanha - E

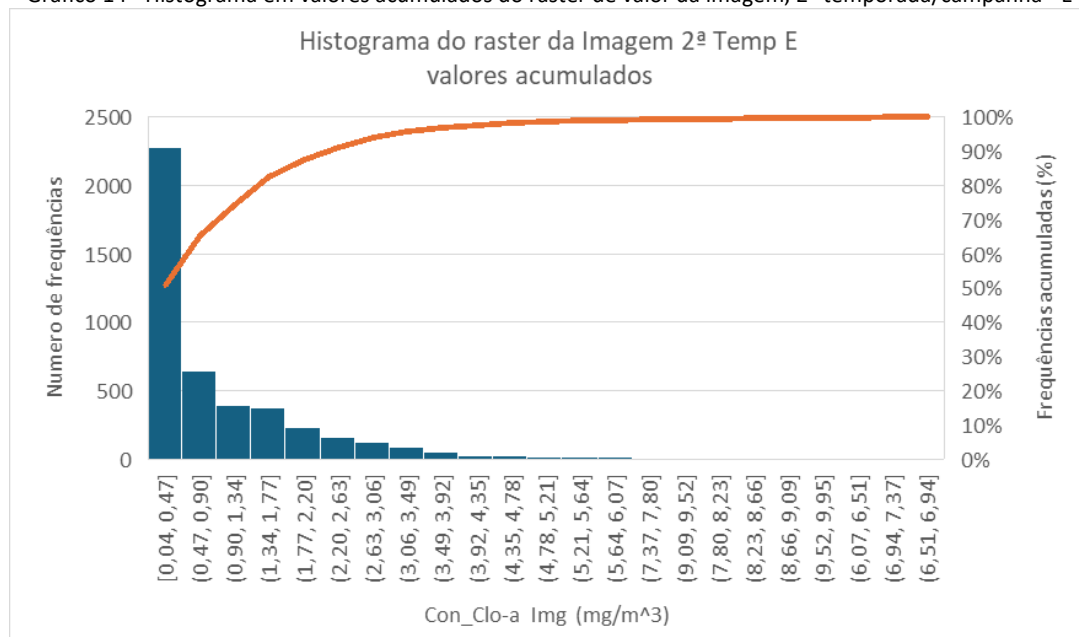


Gráfico 15 - Histograma em valores acumulados do raster de valor da imagem, 3ª temporada/campanha - E

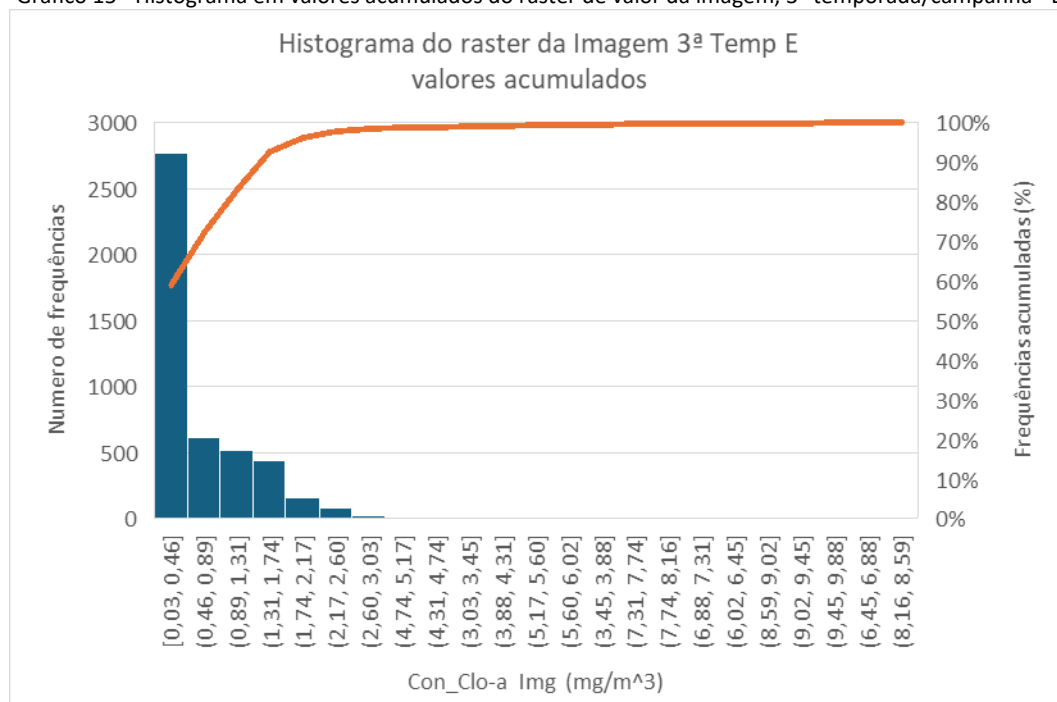
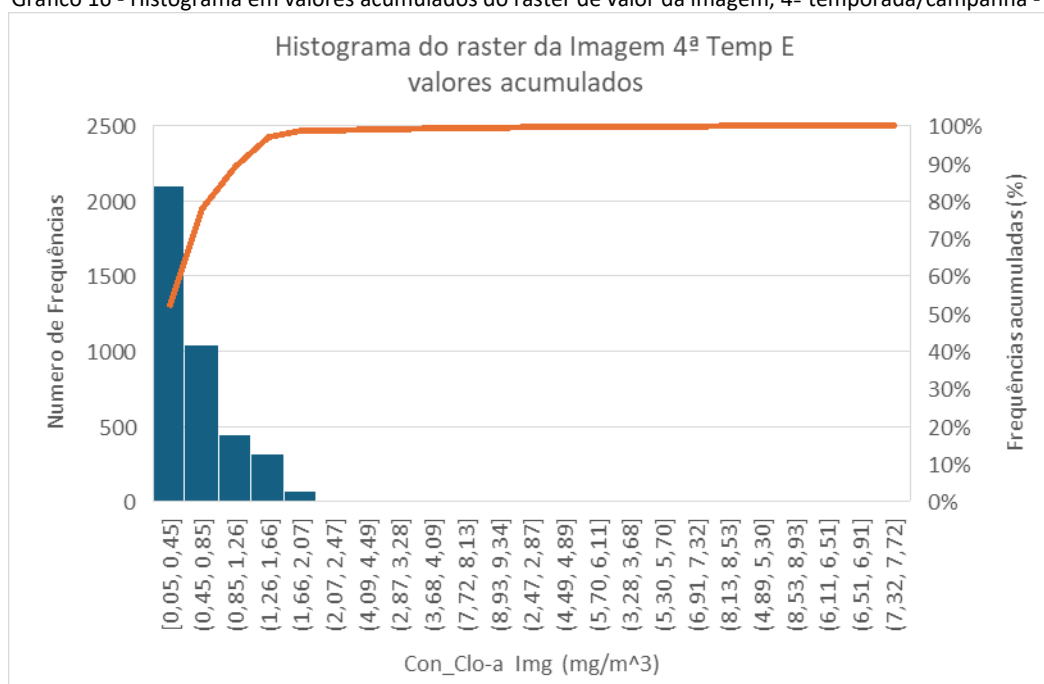


Gráfico 16 - Histograma em valores acumulados do raster de valor da imagem, 4ª temporada/campanha - E



8.4. Histogramas de Pareto após Amostragem de Valores Raster

Neste anexo, apresentam-se os subanexos (8.4.1), (8.4.2), onde se podem visualizar os histogramas de Pareto das imagens de Clo-a e comparação *In Situ* — áreas de estudo A e E.

8.4.1. Histogramas de Pareto das Imagens de Clorofila-a e Comparação *In Situ* — Área A

Gráfico 17 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, 1ª temporada/campanha - A

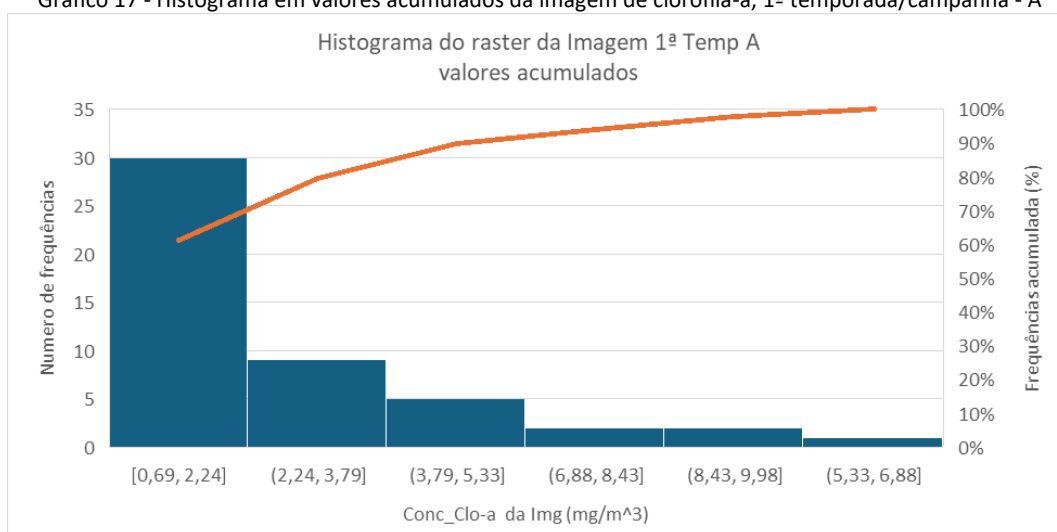


Gráfico 18 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, comparação com *In Situ*, 1ª temporada/campanha - A

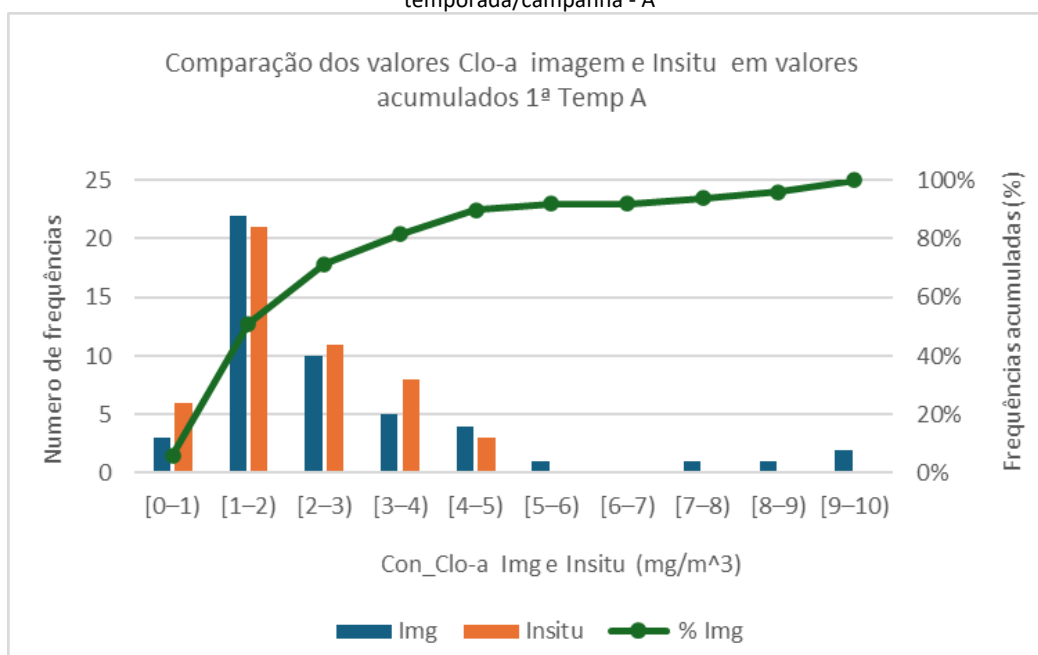


Gráfico 19 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, 2ª temporada/campanha - A

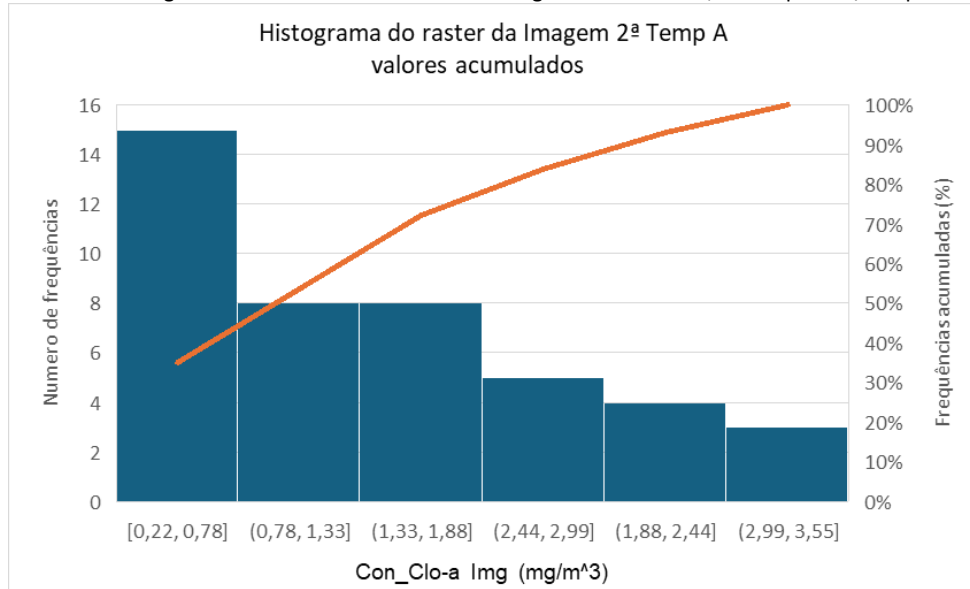


Gráfico 20 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, comparação com In Situ, 2ª temporada/campanha - A

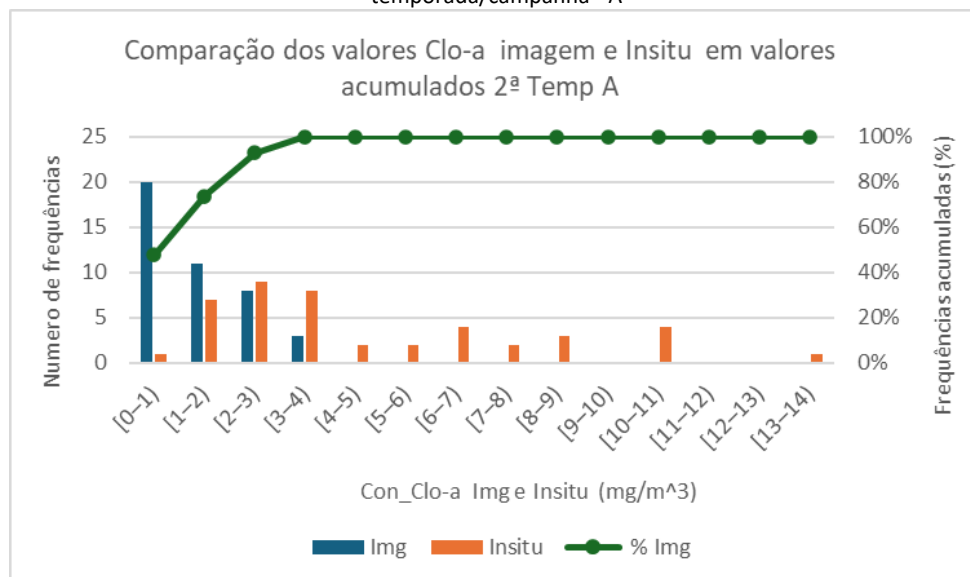


Gráfico 21 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, 3ª temporada/campanha - A

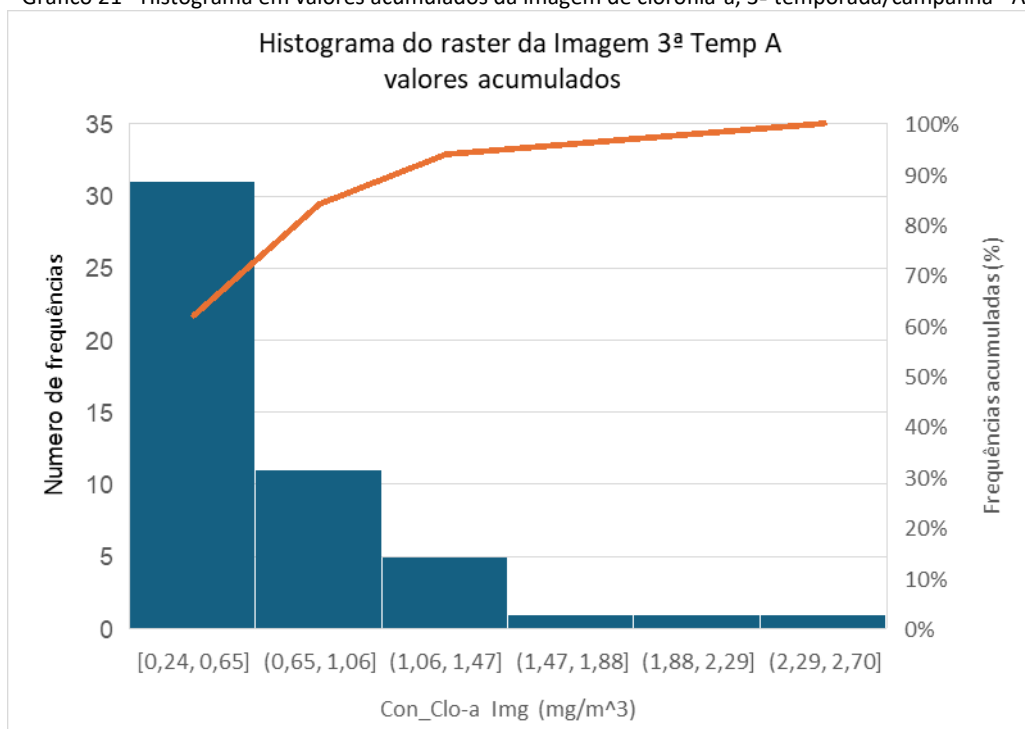


Gráfico 22 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, comparação com In Situ, 3ª temporada/campanha - A

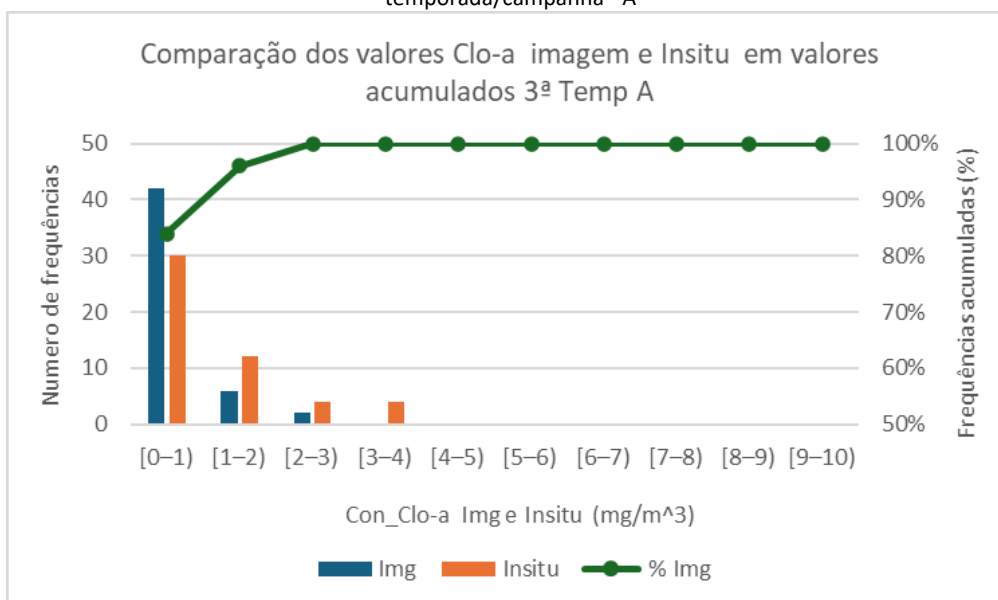


Gráfico 23 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, 4ª temporada/campanha - A

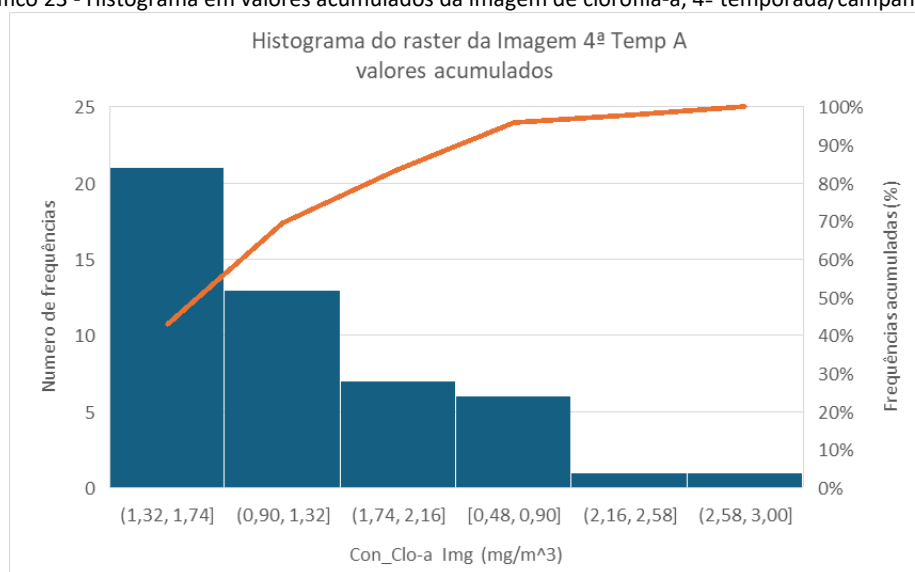
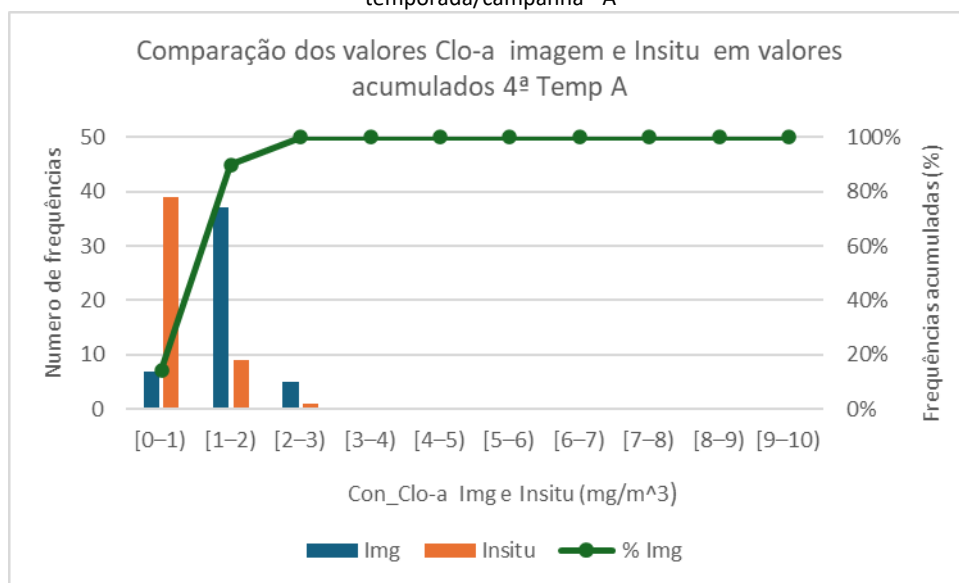


Gráfico 24 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, comparação com In Situ, 4ª temporada/campanha - A



8.4.2. Histogramas de Pareto das Imagens de Clorofila-a e Comparação *In Situ* — Área E

Gráfico 25 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, 1ª temporada/campanha - E

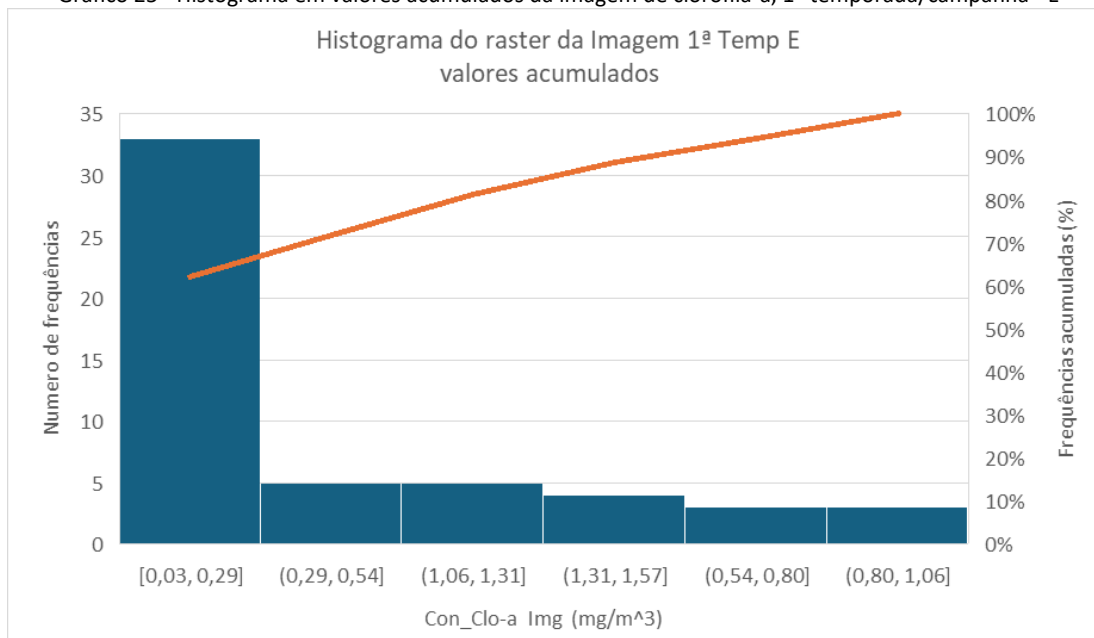


Gráfico 26 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, comparação com *In Situ*, 1ª temporada/campanha - E

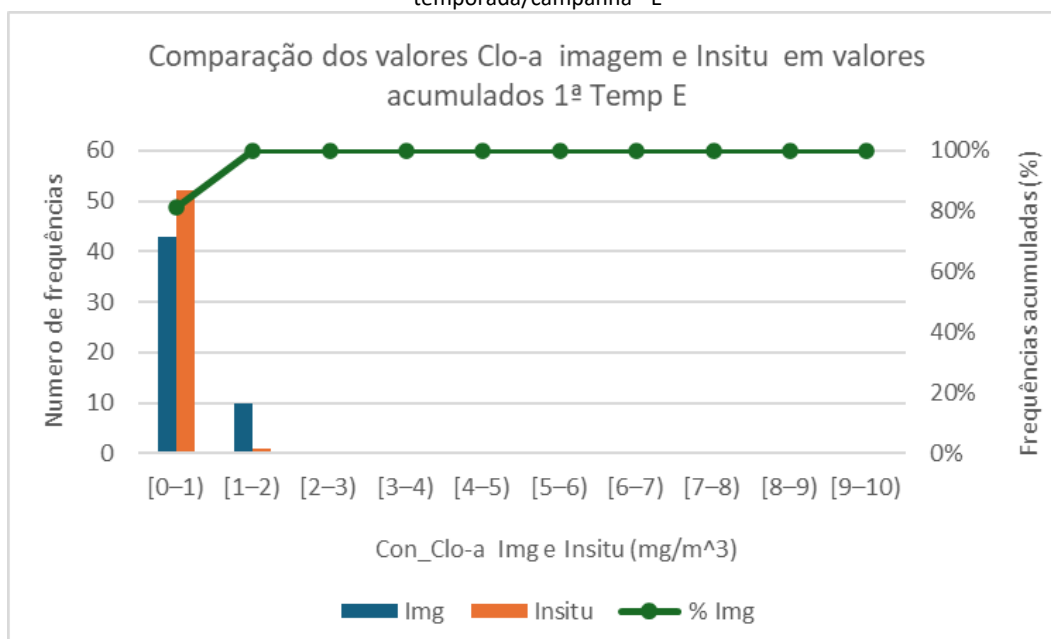


Gráfico 27 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, 2ª temporada/campanha - E

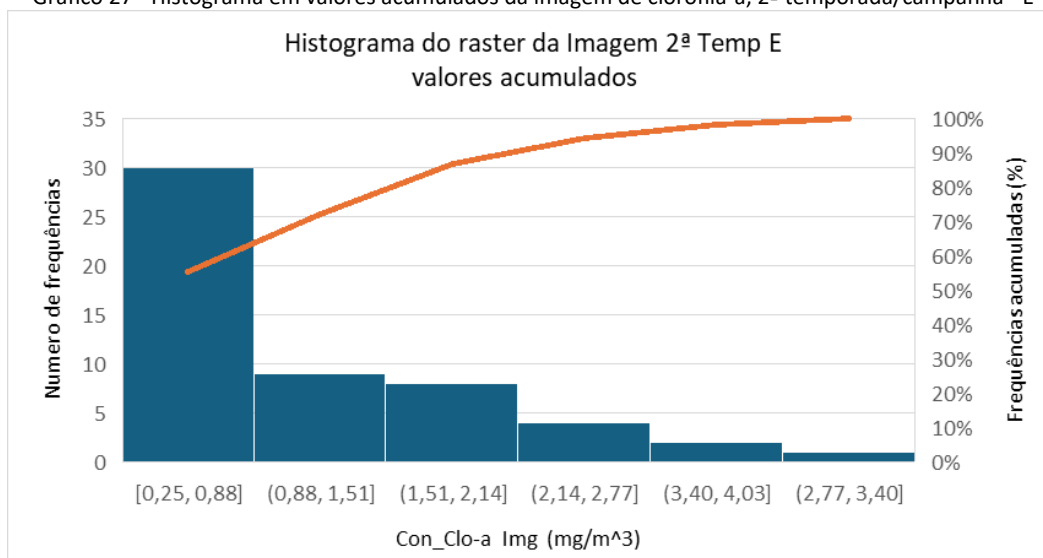


Gráfico 28 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, comparação com In Situ, 2ª temporada/campanha - E

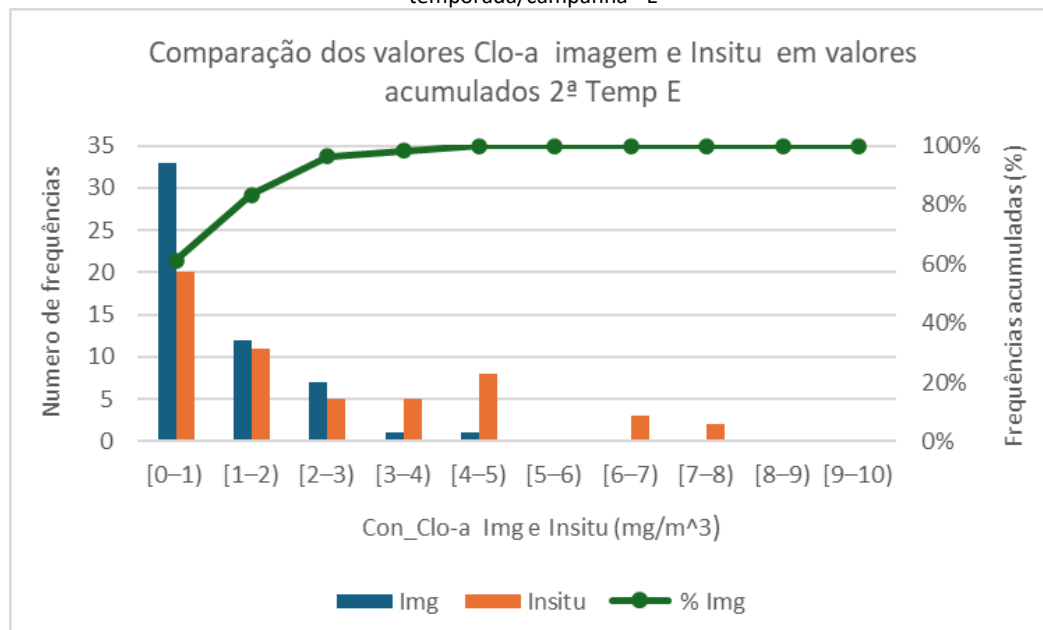


Gráfico 29 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, 3ª temporada/campanha - E

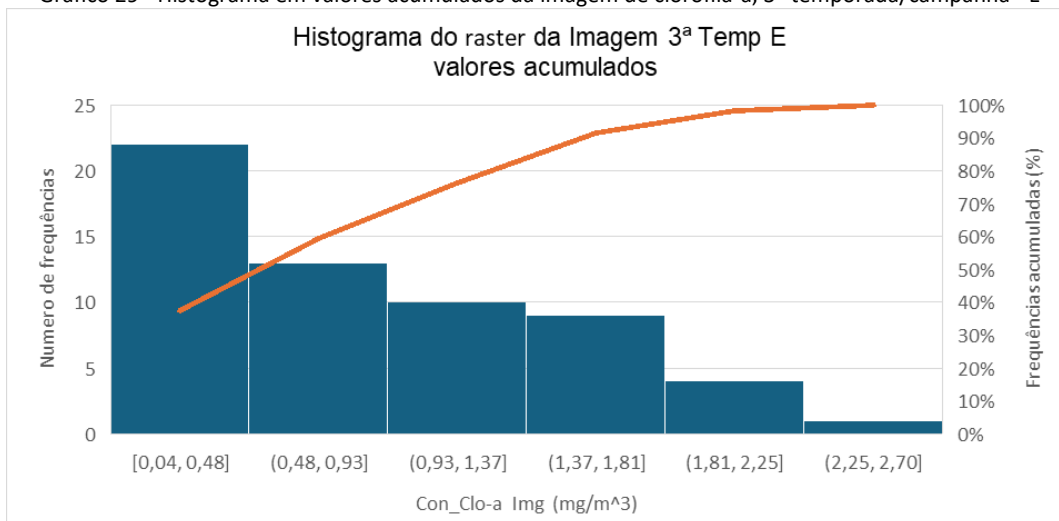


Gráfico 30 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, comparação com In Situ, 3ª temporada/campanha - E

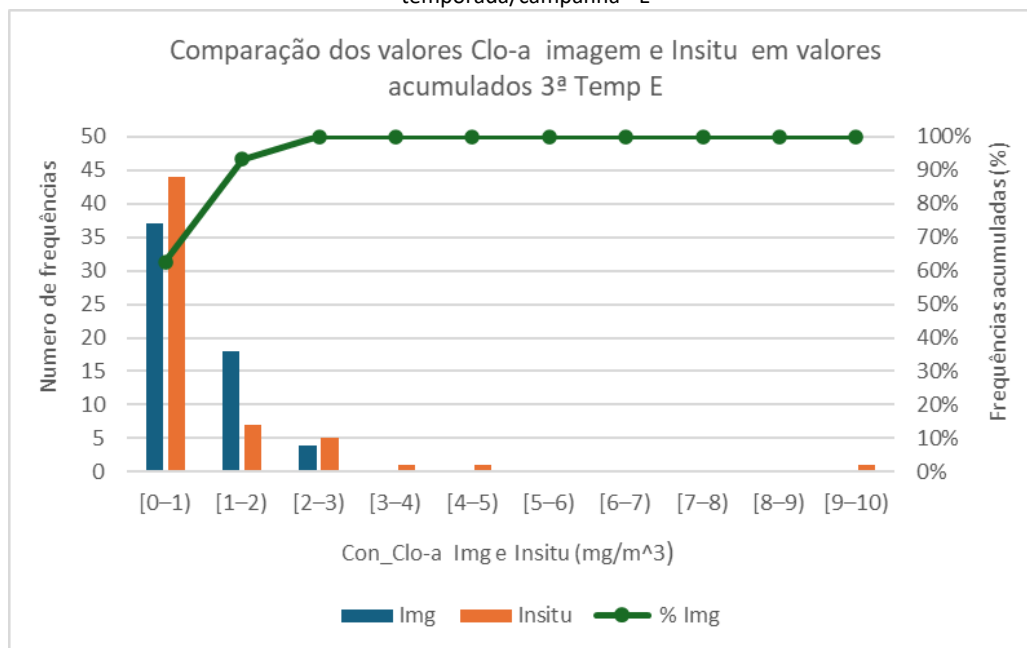


Gráfico 31 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, 4ª temporada/campanha - E

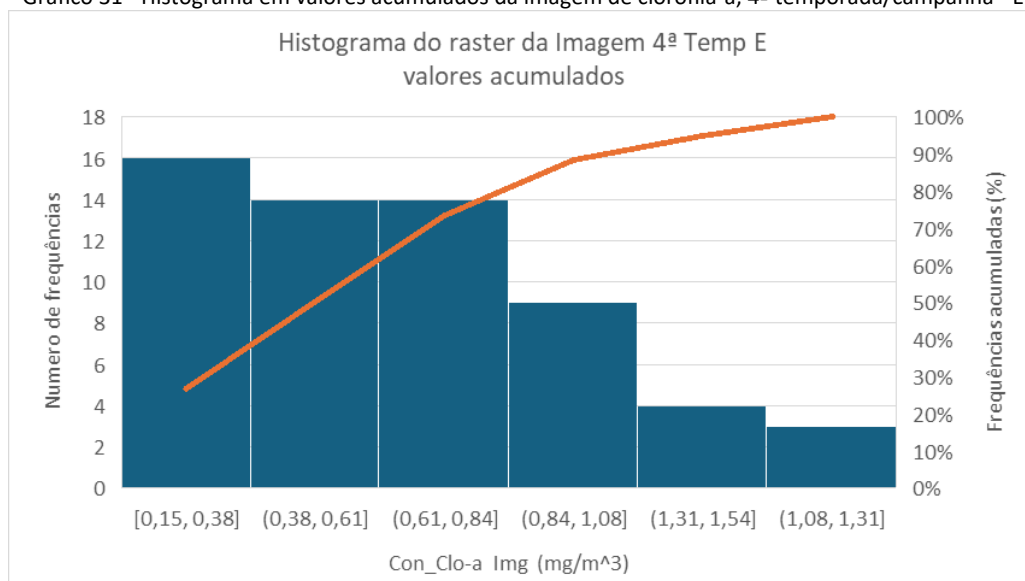
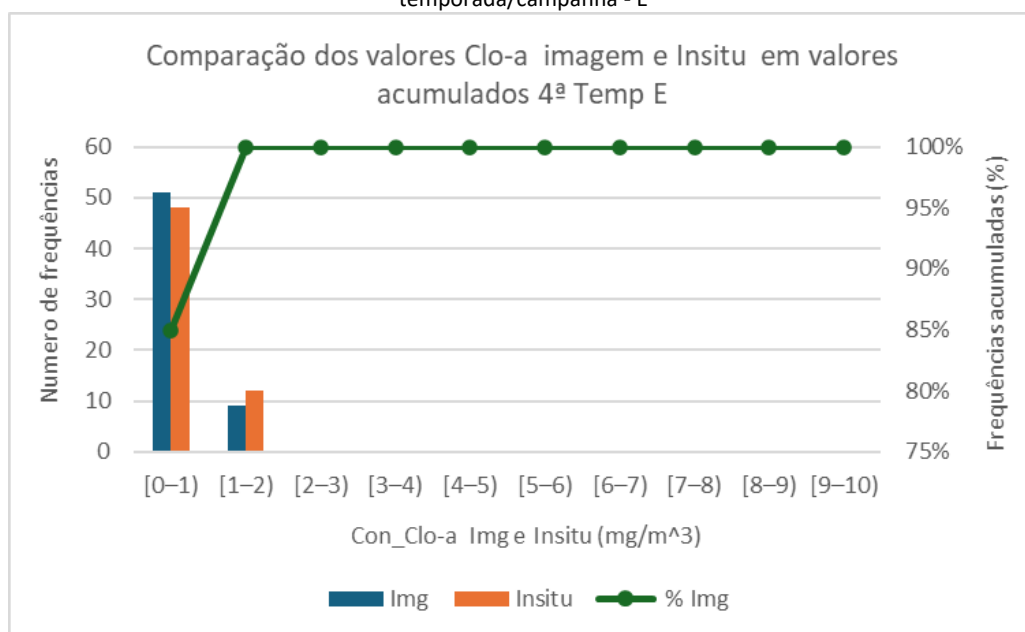


Gráfico 32 - Histograma em valores acumulados da imagem de clorofila-a, comparação com In Situ, 4ª temporada/campanha - E



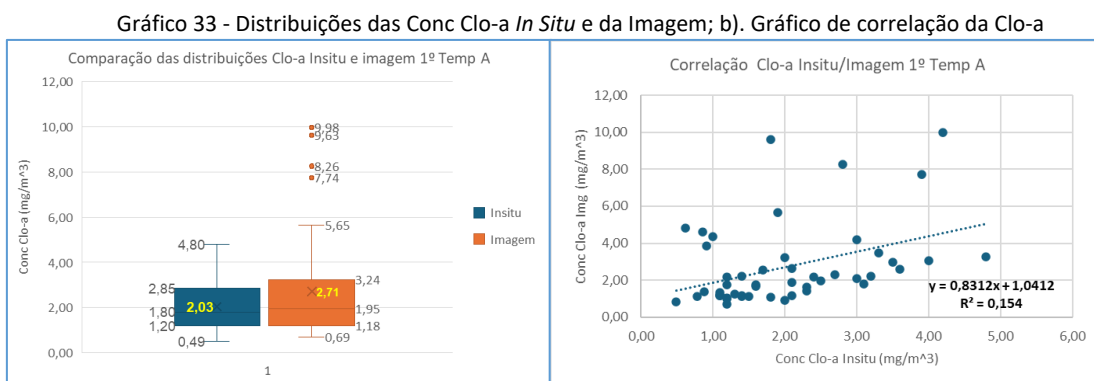
8.5. Gráficos de Dispersão e Diagramas de Caixa

Neste anexo apresentam-se oito subanexos (8.5.1), (8.5.8), que incluem dezasseis gráficos (ver: (Gráfico 33) a (Gráfico 48)), representativos das distribuições das

concentrações de Clo-a *In Situ* versus imagens, bem como das correlações da Clo-a entre valores in situ e imagens, com e sem a consideração de valores atípicos (*outliers*).

8.5.1. Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área A, 1ª Temporada/Campanha

Na figura 28 – sem a correção dos valores atípicos

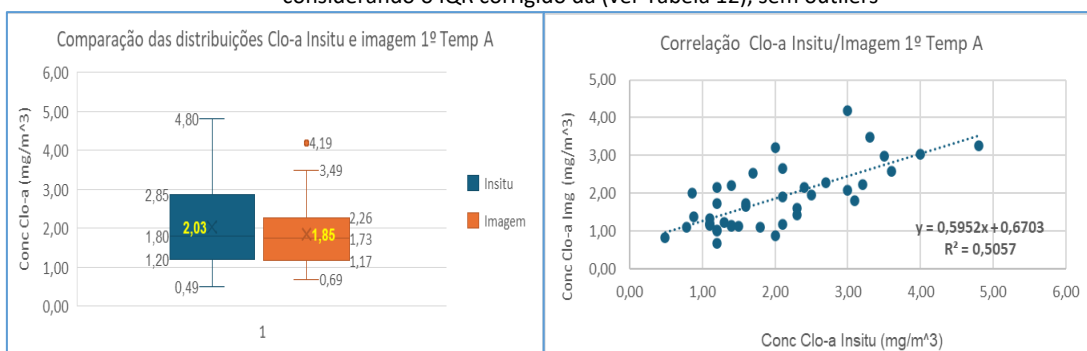


Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,39);
- Coeficiente de determinação $R^2 = (0,15)$.

Na figura 28 - corrigido alguns valores atípicos.

Gráfico 34 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a, considerando o IQR corrigido da (ver Tabela 12), sem outliers



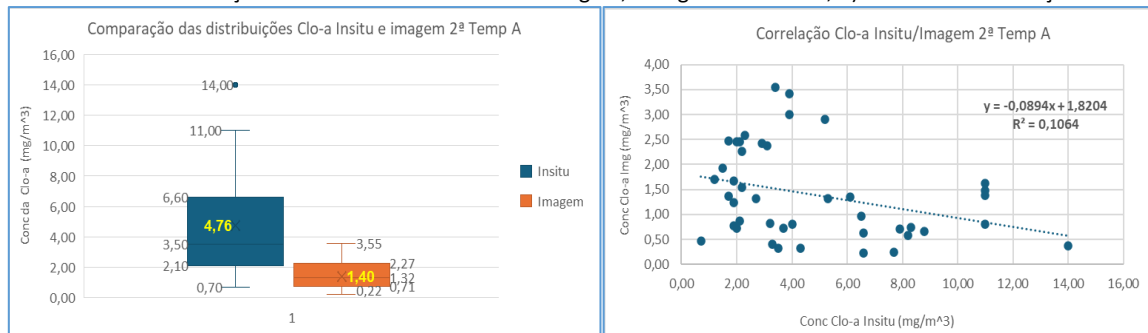
Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,71);
- Coeficiente de determinação $R^2 = (0,50)$.

8.5.2. Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área A, 2ª Temporada/Campanha

Na figura 29 – sem a correção dos valores atípicos

Gráfico 35 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a

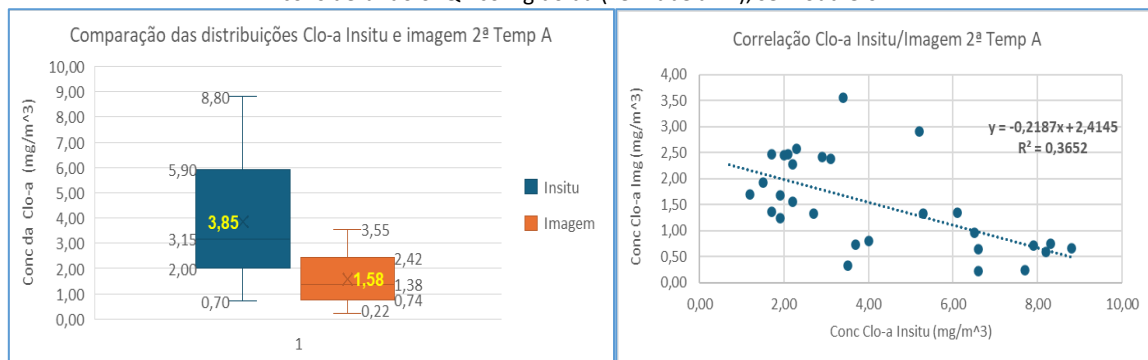


Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (- 0,33);
- Coeficiente de determinação $R^2 = (0,11)$

Na figura 29 - corrigido alguns valores atípicos.

Gráfico 36 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a, considerando o IQR corrigido da (ver Tabela 12), sem outliers.



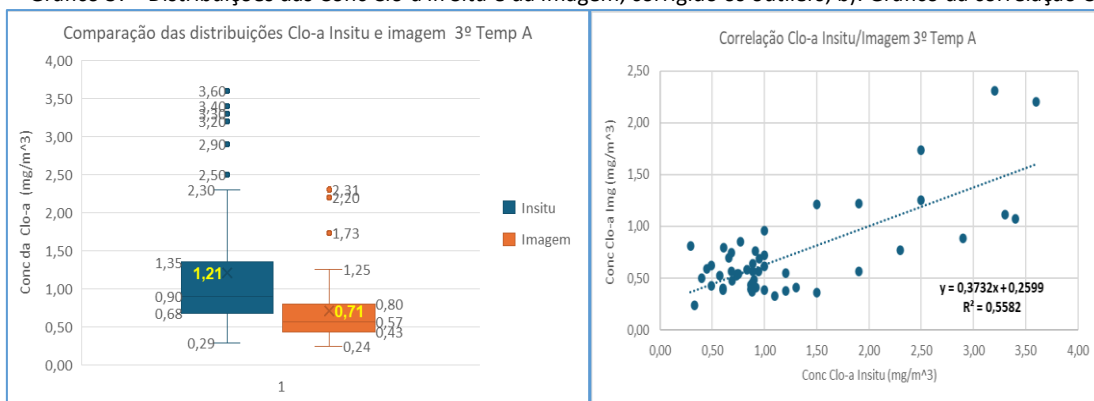
Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (- 0,60);
- Coeficiente de determinação $R^2 = (0,37)$

8.5.3. Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área A, 3ª Temporada/Campanha

Na figura 30 – sem a correção dos valores atípicos

Gráfico 37 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a

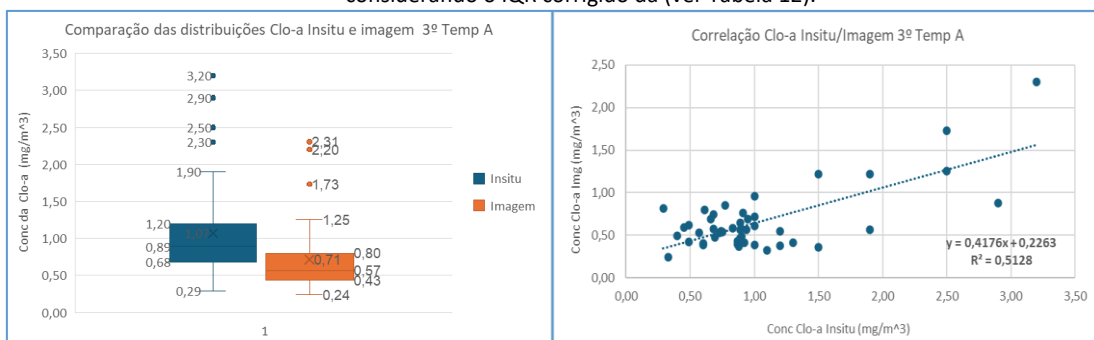


Legenda

- Coeficiente de Pearson = 0,76
- Coeficiente de determinação $R^2 = 0,56$

Na figura 30- corrigido alguns valores atípicos.

Gráfico 38 - - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a, considerando o IQR corrigido da (ver Tabela 12).



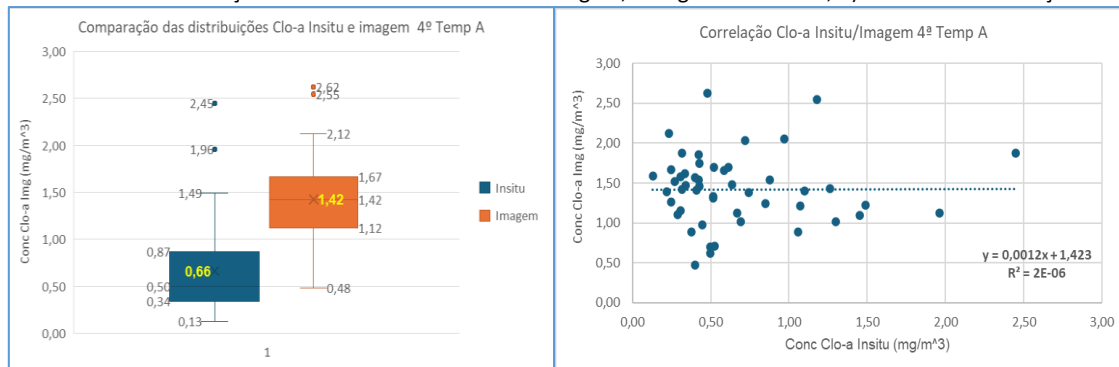
Legenda:

- Coeficiente de Pearson = 0,72
- Coeficiente de determinação $R^2 = 0,51$

8.5.4. Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área A, 4ª Temporada/Campanha

Na figura 31 – sem a correção dos valores atípicos

Gráfico 39 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a

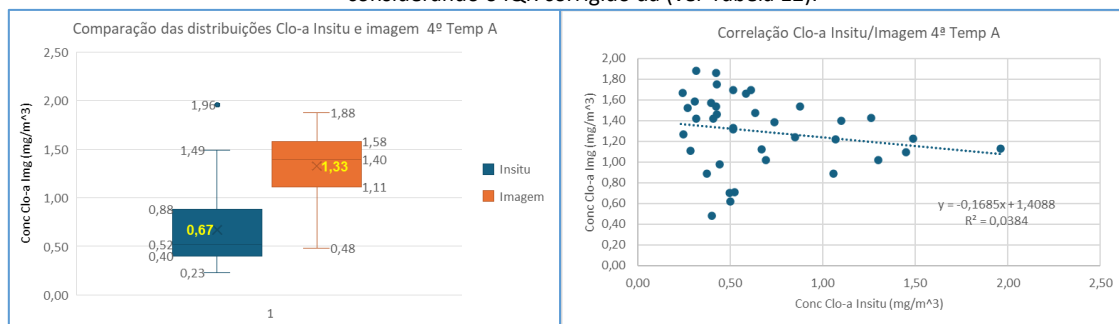


Legenda:

- Coeficiente de Pearson = 0,00
- Coeficiente de determinação $R^2 = 0,02$

Na figura 31- corrigido alguns valores atípicos.

Gráfico 40 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a, considerando o IQR corrigido da (ver Tabela 12).



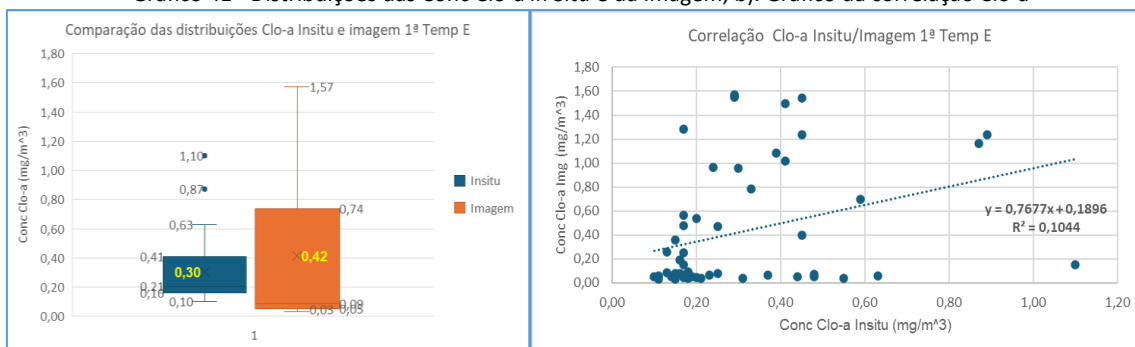
Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (- 0,20)
- Coeficiente de determinação $R^2 = (0,04)$

8.5.5. Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área E, 1ª Temporada/Campanha

Na figura 32 – sem a correção dos valores atípicos

Gráfico 41 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem; b). Gráfico da correlação Clo-a

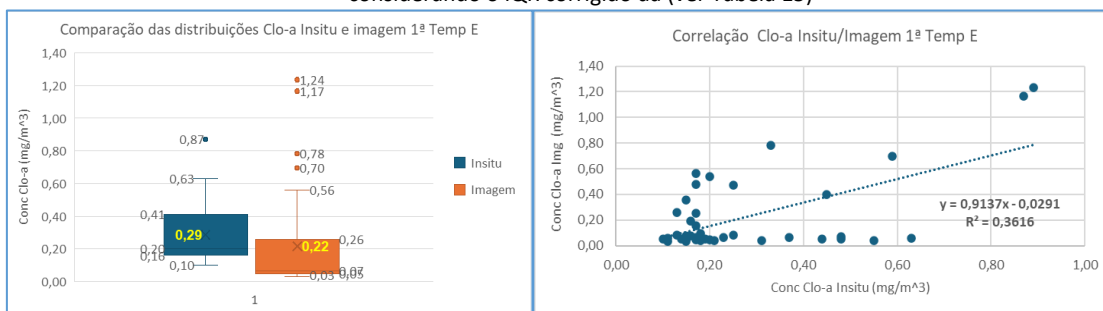


Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,34)
- Coeficiente de determinação $R^2 = (0,1)$

Na figura 32- corrigido alguns valores atípicos.

Gráfico 42 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a, considerando o IQR corrigido da (ver Tabela 15)



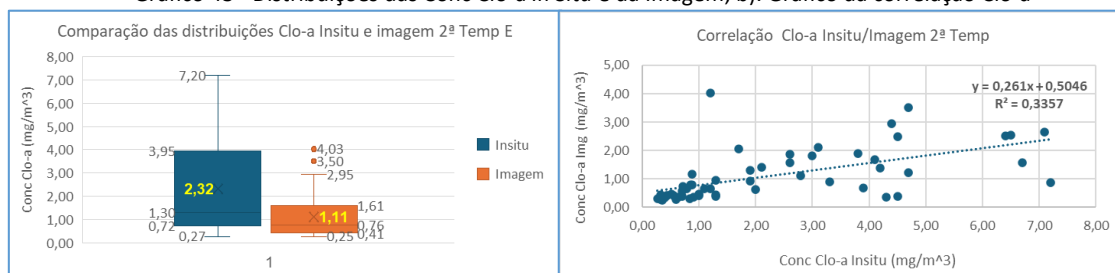
Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,60)
- Coeficiente de determinação $R^2 = (0,36)$

8.5.6. Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área E, 2ª Temporada/Campanha

Na figura 33 – sem a correção dos valores atípicos

Gráfico 43 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem; b). Gráfico da correlação Clo-a

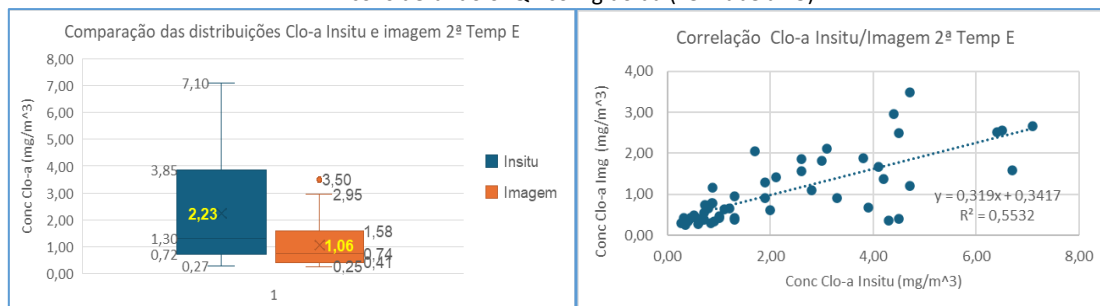


Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,58)
- Coeficiente de determinação $R^2 = 0,34$

Na figura 33 - corrigido alguns valores atípicos.

Gráfico 44 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a, considerando o IQR corrigido da (ver Tabela 15)



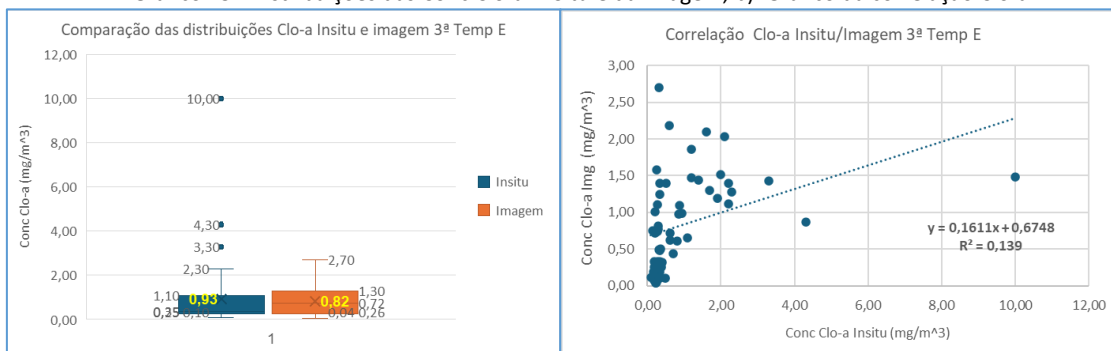
Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,74)
- Coeficiente de determinação $R^2 = (0,55)$

8.5.7. Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área E, 3ª Temporada/Campanha

Na figura 34 – sem a correção dos valores atípicos

Gráfico 45 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem; b). Gráfico da correlação Clo-a

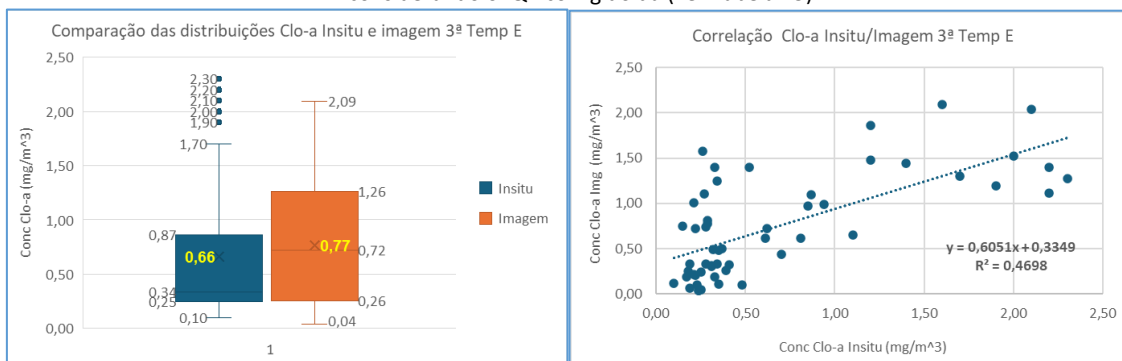


Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,37)
- Coeficiente de determinação R^2 = (0,14)

Na figura 34- corrigido alguns valores atípicos.

Gráfico 46 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a, considerando o IQR corrigido da (ver Tabela 15)



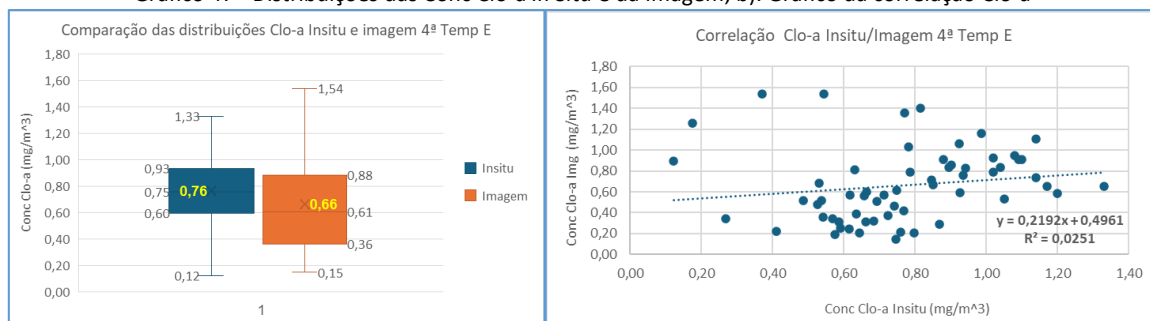
Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,69)
- Coeficiente de determinação R^2 = (0,47)

8.5.8. Valores *In Situ* versus Valores da Imagem — Área E, 4ª Temporada/Campanha

Na figura 35 – sem a correção dos valores atípicos

Gráfico 47 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem; b). Gráfico da correlação Clo-a

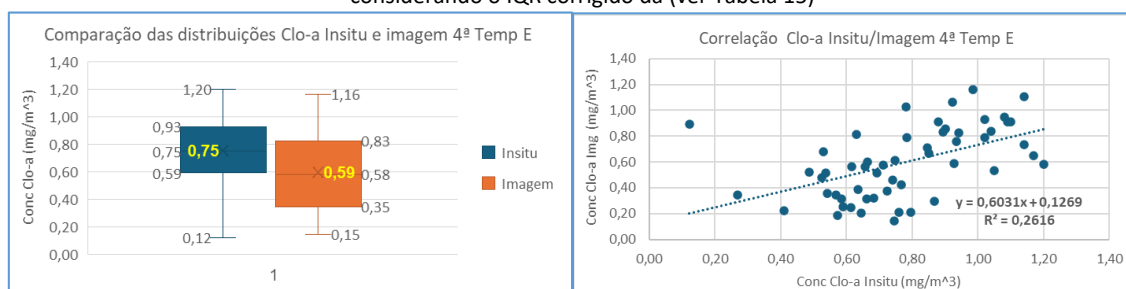


Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,16)
- Coeficiente de determinação R^2 = (0,03)

Na figura 35- corrigido alguns valores atípicos.

Gráfico 48 - Distribuições das Conc Clo-a *In Situ* e da Imagem, corrigido os outliers; b). Gráfico da correlação Clo-a, considerando o IQR corrigido da (ver Tabela 15)



Legenda:

- Coeficiente de Pearson = (0,51)
- Coeficiente de determinação R^2 = (0,27)

9. Apêndices

9.1. Fluxo de trabalho: do SNAP ao CSV com NetCDF-4 e script Python Desenvolvido para Extração dos Dados.

9.1.1. Exportação da Banda de Clo-a para Formato NetCDF-4

Na Figura 36 apresenta-se a imagem correspondente à banda relativa à concentração de Clo-a, inicialmente processada no software SNAP. Conforme descrito na metodologia a exportação deste produto no formato GeoTIFF revelou-se inadequada, uma vez que não preservava corretamente a banda única de Clo-a, originando ficheiros com apenas as bandas de visualização Red, Green e Blue.

Perante esta limitação técnica, optou-se pela exportação dos dados no formato NetCDF-4, que permite [...] conservar a estrutura multidimensional dos dados científicos e é amplamente utilizado em análises no âmbito dos Sistemas de Informação Geográfica e da deteção remota (Lau, 2023; ESRI, 2024b).

A integridade e organização do ficheiro exportado foram verificadas recorrendo ao editor Notepad++ (vs 8.7.5), o qual permitiu visualizar de forma legível os metadados e a estrutura interna do ficheiro.

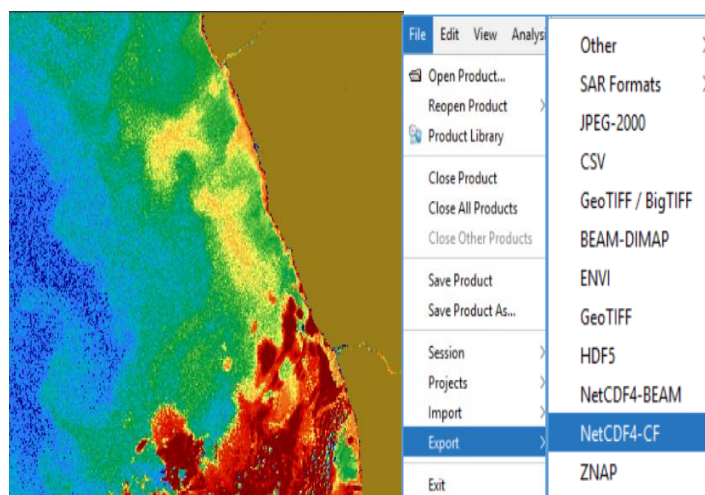


Figura 36 - Criação do ficheiro NetCDF – a) Banda da Clo-a e exportação NetCdf4;
Fonte: dados do autor; dec2024

9.1.2. Script de Conversão NetCDF para CSV (Python)

O script em linguagem Python, apresentado neste apêndice, foi desenvolvido com o objetivo de ler o ficheiro em formato NetCDF-4, resultante da aplicação do algoritmo C2RCC, e extrair os valores da banda de Clo-a

Os dados extraídos - latitude, longitude e concentração de Clo-a - foram posteriormente guardados num ficheiro CSV, permitindo a sua utilização em ambiente SIG, nomeadamente no QGIS, onde foram integrados como dados vetoriais pontuais e utilizados como base para processos de interpolação e análises espaciais, cujo exemplo é apresentado no subanexo seguinte.

O código encontra-se apresentado com a respetiva sintaxe destacada³² - letra «Courier New, tamanho 9», de forma a garantir a sua legibilidade e compreensão por parte do leitor técnico.

```
"""
Created on Sun Nov 10 12:06:28 2024

@author: matia

Explicações:
O arquivo CSV é aberto com o bloco with, para garantir o fecho automático no
final. Corrigido o erro de sintaxe nos parênteses da linha fOut.write(...). Usei
f"{...}" para formatar uma string, o que simplifica a construção. Finalmente,
adicionei f.close() ao final. para garantir o fecho do dataset NetCDF
"""

from netCDF4 import Dataset

def readNetCDF(file):
    ds = Dataset(file, 'r')
    return ds

# Abrir o ficheiro netcdf
fileInPath = 'subset_3_of_S3A_OL_1_EFR____20181017.nc'
f = readNetCDF(fileInPath)

# Escreve o novo ficheiro da chl-a com um Header
path = "1_Temp_E__.csv"
with open(path, "w") as fOut:
    pathPrint = 'latitude; Longitude; Chl_a_1Temp_E \n'
    fOut.write(pathPrint)

# Iterar sobre as dimensões (tempo, lat, lon) - Aceder às variáveis do
NetCDF
lats = f.variables['lat'][:]
lons = f.variables['lon'][:]
```

³² Fonte: <https://emn178.github.io/online-tools/syntax-highlight/>- jan2025

```

conc_chl = f.variables['conc_chl'][:] # Concentração de clorofila
c2rcc_flags = f.variables['c2rcc_flags'][:]

# Iterar sobre as posições Geográficas
for i in range(len(lats)):
    for k in range(len(lons[i])):
        # Uncomment the following line for debugging
        # print(f"i: {i}, k: {k}, lats[i][k]: {lats[i][k]}, lons[i][k]:
{lons[i][k]}")

        # Condição opcional com c2rcc_flags
        # if c2rcc_flags[i, k] == 8:
        #     print(c2rcc_flags[i, k])

        # Imprime o valor de conc_chl para cada posição
        print(conc_chl[i, k])

        # Escrever as coordenadas e valor da clorofila no ficheiro CSV
        fOut.write(f"{lats[i][k]};{lons[i][k]};{conc_chl[i, k]}\n")

f.close() # Fecha, encerra o dataset NetCDF

```

9.1.3. Matriz CSV e importação dos dados para ambiente SIG em WGS

84

A matriz em formato CSV (Figura 37 a 39), gerada a partir do ficheiro NetCDF-4, foi importada para o ambiente SIG no sistema de coordenadas «World Geodetic System 1984» (WGS84, EPSG:4326) (Group, 2025b), de modo a garantir a correta georreferenciação dos dados, permitindo a visualização espacial das concentrações de Clo-a sobre a área de estudo.

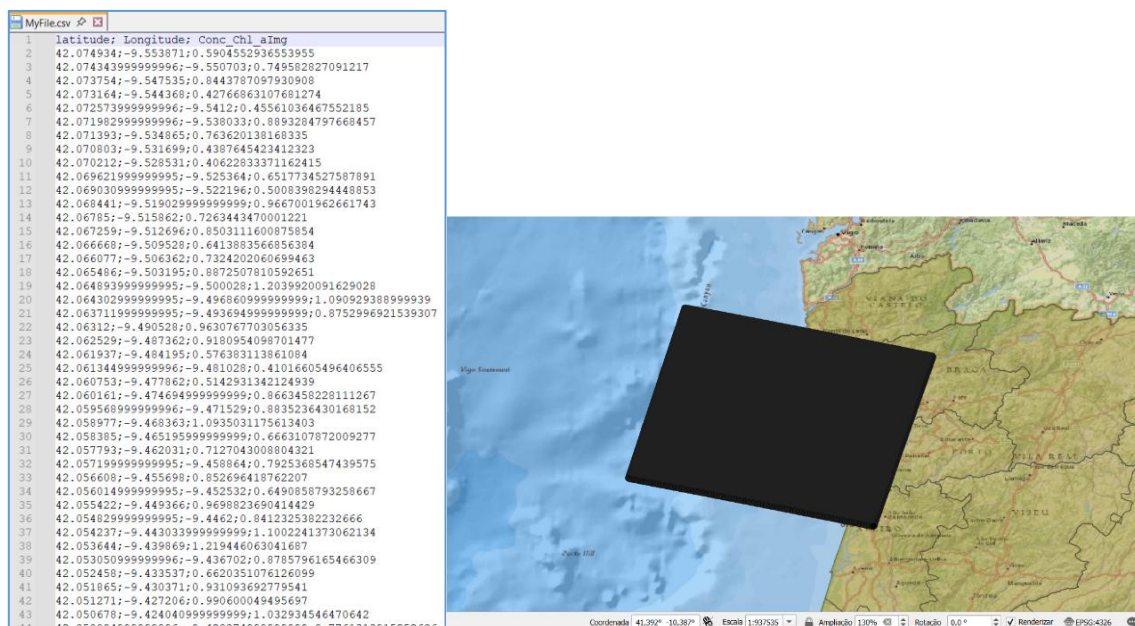


Figura 37 – Editor Notepad com dados em CSV provenientes do ficheiro NetCDF-4, visualizados no Layout do QGIS com projecção WGS 84 – Área A.
Fonte: dados do autor; nov2024

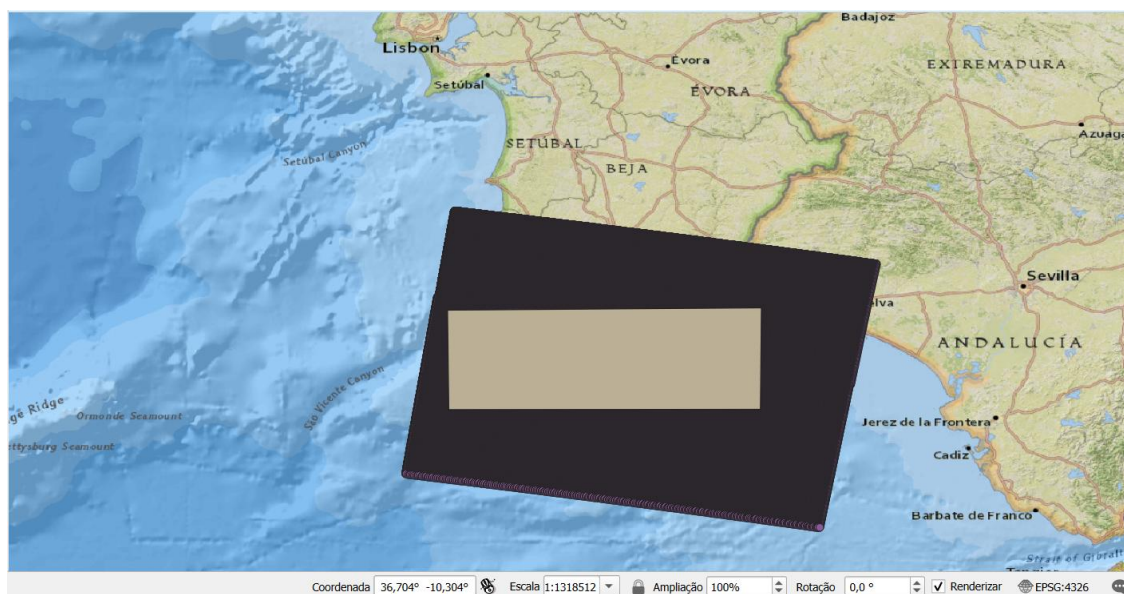


Figura 38 - Dados em formato CSV provenientes do ficheiro NetCDF-4, visualizados no layout do QGIS com projecção WGS 84 – Área E, com polígono de corte.
Fonte: dados do autor; nov2024

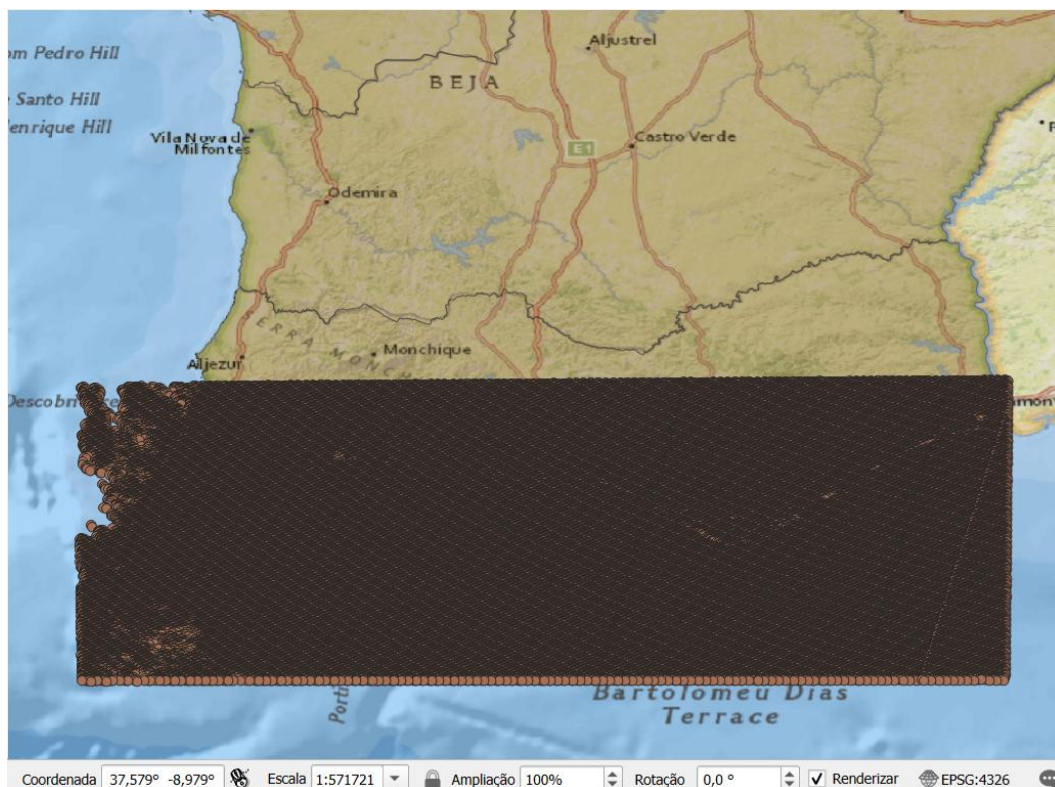


Figura 39 - Dados em formato CSV provenientes do ficheiro NetCDF-4, visualizados no layout do QGIS com projeção WGS 84 – Área E.
Fonte: dados do autor; nov2024

9.2. Elaboração do Gráfico de Pareto para Comparação entre as Concentrações de Clorofila-a Obtidas por Imagem e por Dados *In Situ* (Clo_a)

Com o intuito de ilustrar de forma mais clara a distribuição e o peso relativo das concentrações de Clo-a obtidas por imagem de satélite e por medições *In Situ*, procedeu-se à construção de um gráfico de colunas duplas com a respetiva linha de Pareto aplicada aos dados da Imagem (Figura 40).

Este apêndice documenta os passos realizados, incluindo a preparação da tabela de frequências, o cálculo das percentagens acumuladas e a configuração do gráfico composto. A abordagem adotada permite uma análise visual detalhada, destacando as classes de concentração mais representativas, facilitando a comparação entre métodos de aquisição distintos.

9.2.1. Passos para a Construção do Gráfico Combinado com Linha de Pareto

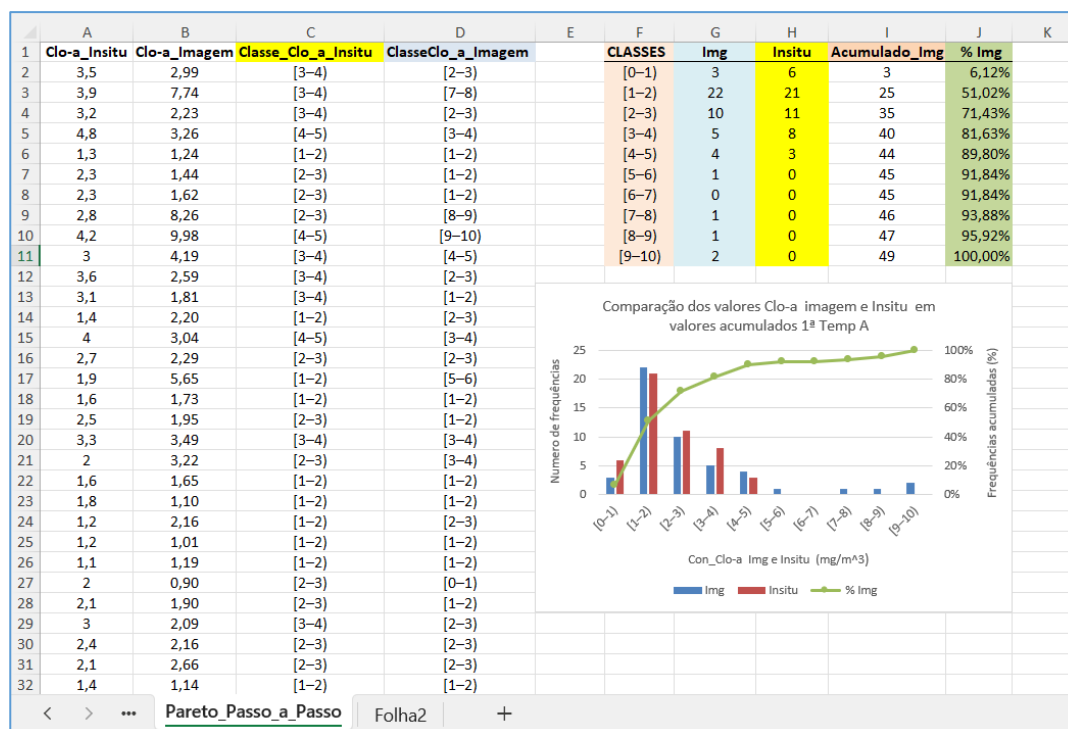


Figura 40- Análise visual detalhada da preparação do Gráfico de Pareto de forma não automática;
Fonte: dados do autor; jun2025

Para se chegar aos cálculos da figura anterior foi necessário seguir os seguintes passos:

1. Dos valores de Clo-a *In Situ* e da imagem (ver Figura), organizou-se os dados em classes possíveis [0,1]; [1,2], [2,3], ..., [9,10] mg/m³.
 - a. Criou-se uma coluna chamada (*Classe_Clo_a_Imagem*), para os valores da imagem (*Clo_a_Imagem*), e outra chamada (*Classe_Clo_a_In Situ*), para os valores (*Clo_a_In Situ*).
 - b. De seguida usou-se a **função SE mais E** do Excel³³ «...IF(AND(Something is True, Something else is True), Value if True, Value if False)...», para agrupar os dados em intervalos de 1 mg/m³. Por exemplo, para a *Classe_Clo_a_In Situ*, a fórmula tomou seguinte configuração:

³³ Para mais detalhes consultar a Fonte: <https://support.microsoft.com/en-us/office/using-if-with-and-or-and-not-functions-in-excel-d895f58c-b36c-419e-b1f2-5c193a236d97>; jun2025

```
=SE(E(C2>=0;C2<1);"[0-1]";
SE(E(C2>=1;C2<2);"[1-2]";
SE(E(C2>=2;C2<3);"[2-3]";
SE(E(C2>=3;C2<4);"[3-4]";
SE(E(C2>=4;C2<5);"[4-5]";
SE(E(C2>=5;C2<6);"[5-6]";
SE(E(C2>=6;C2<7);"[6-7]";
SE(E(C2>=7;C2<8);"[7-8]";
SE(E(C2>=8;C2<9);"[8-9]";
SE(E(C2>=9;C2<=10);"[9-10]";
SE(E(C2>=10;C2<=11);"[10-11]";
SE(E(C2>=11;C2<=12);"[11-12]";
SE(E(C2>=12;C2<=13);"[12-13]";
SE(E(C2>=13;C2<=14);"[13-14]";
"Fora do intervalo")))))))))))
```

O mesmo racional para a *Classe_Clo_a_Imagem*, substituindo C2 por D2.

2. Criou-se uma tabela de frequências:

- Listaram-se todas as classes possíveis (ex.: [0–1], [1–2], ... [9–10] mg/m³).
- Utilizou-se a função **CONTAR.SE (intervalo; critério)**³⁴ « ...COUNT.SE (value1, [value2], ...)» para contar quantas vezes ocorre cada classe:

- Para *In Situ*:

```
=CONTAR.SE(C:C;F2)
```

- Para a imagem:

```
=CONTAR.SE(D:D;F2)
```

- Onde (C:C) é a coluna *Classe_Clo_a_In Situ*; (D:D) é a *Classe_Clo_a_Imagem* e F2 é a célula com a classe [0–1], [1–2]..., etc.

3. Para calcular o acumulado e percentagem acumulada da imagem (%), usou-se a função

= **SOMA(A:A)**³⁵ «...=SUM(number1,[number2]...» com os seguintes passos:

- Cálculo da coluna acumulado

```
=SOMA(G$2:G3)
```

³⁴ Para mais detalhes consultar a Fonte: <https://support.microsoft.com/en-us/office/count-function-a59cd7fc-b623-4d93-87a4-d23bf411294c>

³⁵ Para mais detalhes ver Fonte: <https://support.microsoft.com/en-us/office/sum-function-043e1c7d-7726-4e80-8f32-07b23e057f89>; jun2025

(arrastando para baixo)

- b. Coluna % percentagem acumulada:

=I2/SOMA(G:G)

(arrastando para baixo)

4. Procedimentos para a Construção do Gráfico de Pareto combinado

- a. Selecionaram-se as colunas correspondentes às frequências por classe, tanto para os dados da Imagem como para os dados *In Situ*.
- b. Acedeu-se à aba Inserir > gráfico de colunas agrupadas, criando-se assim um gráfico de colunas comparativo entre ambos os conjuntos de dados.
- c. Para adicionar a linha acumulada de Pareto (relativa aos dados da imagem), seguiram-se os seguintes passos:
 - Clicar com o botão direito do rato sobre o gráfico > seleccionar dados > adicionar série > editar série.
 - No campo nome da série, inserir: % Img; no campo valores da série, seleccionar a totalidade da coluna correspondente ao acumulado percentual da Imagem.
 - Para alterar o tipo de gráfico desta nova série:
 - Clicar novamente com o botão direito do rato sobre o gráfico > alterar tipo de gráfico da Série > escolher combinação.
 - No gráfico combinado, para a série % Img, definir o tipo como Linha com Marcadores.
 - Assinalar a caixa referente ao eixo secundário, para que a linha acumulada seja corretamente exibida.

5. Resultado obtido

Foi gerado um gráfico combinado, composto por colunas duplas (frequência por classe dos dados de Imagem e *In Situ*), e por uma linha acumulada de Pareto correspondente aos valores percentuais acumulados da Imagem, representada sobre um eixo secundário conteúdo da (Figura).

