

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

**Variabilidade temporal (interanual e mareal) das  
trocas de nutrientes e matéria particulada, pela  
Barra Faro-Olhão e canais adjacentes no ecossistema  
da Ria Formosa**

Andreia Isabel Henriques Ovelheiro

Tese de Mestrado  
Mestrado em Biologia Marinha

Trabalho efetuado sob a orientação de:  
Prof. Doutora Alexandra Cravo  
(Professora Auxiliar, Universidade do Algarve)  
Prof. Doutor José Jacob  
(Professor Auxiliar, Universidade do Algarve)

**2015**

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

**Variabilidade temporal (interanual e mareal) das trocas de nutrientes e matéria particulada, pela Barra Faro-Olhão e canais adjacentes no ecossistema da Ria Formosa**

Andreia Isabel Henriques Ovelheiro

Obtenção do Grau de Mestre em Biologia Marinha

Orientadores:

Prof. Doutora Alexandra Cravo

(Professora Auxiliar, Universidade do Algarve)

Prof. Doutor José Jacob


(Professor Auxiliar, Universidade do Algarve)

**2015**

# **Variabilidade temporal (interanual e mareal) das trocas de nutrientes e matéria particulada, pela Barra Faro-Olhão e canais adjacentes no ecossistema da Ria Formosa**

## **Declaração de Autoria de Trabalho**

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.



Andreia Isabel Henriques Ovelheiro

## **Copyright**

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## AGRADECIMENTOS

*À Professora Doutora Alexandra Cravo, orientadora científica desta dissertação, por despertar em mim a paixão pela Oceanografia Química e por me ter dado a oportunidade de elaborar este trabalho na área, por todos os conhecimentos adquiridos, dinamismo, espírito de sacrifício e força de vontade que me transmitiu. Foi sem dúvida um prazer poder trabalhar consigo durante praticamente todo o percurso académico, o meu sincero muito Obrigada.*

*Ao Professor Doutor José Jacob, co – orientador científico desta dissertação, pela ajuda e por estar sempre disponível a ajudar quando precisamos, por me ter mostrado que a Física não é difícil e o gosto de trabalhar em MATLAB ®, muito Obrigada.*

*Aos meus pais, Isabel e José, por sempre terem lá estado, nos melhores e piores momentos, simplesmente não há palavras para descrever a minha gratidão, a vós dedico este trabalho. Obrigada por me terem permitido chegar até aqui, sem vocês não tinha conseguido!*

*À minha irmã Marisa, pela paciência que tem comigo, admito que às vezes não é fácil...que me faz querer ir mais além e que também sou capaz. Obrigada pela ajuda em todos os pormenores, como eu queria.*

*Ao Juan... porque os nossos caminhos se cruzaram no início desta aventura. Obrigada pelo teu amor, carinho, força, apoio nos momentos difíceis, por acreditares em mim e acima de tudo, pela enorme paciência e por aturares o meu mau feitio.*

*Ao Miguel Madureira e à Filomena Rita, pela sua amizade e por todo o conhecimento transmitido nas várias campanhas COALA.*

*À Cátia Correia, pela amizade, disponibilidade e ajuda nos gráficos durante a análise dos resultados e pelos nossos “ momentos MATLAB ®”, muito obrigada.*

*À Vanessa Neves, pela amizade, pelo companheirismo e por todos aqueles momentos que vivemos juntas.*

*À Celine Madeira, pela amizade, incentivo e pela companhia.*

*A todos vós, o meu muito obrigado por tudo*

## RESUMO

A Ria Formosa é uma laguna costeira, produtiva e pouco profunda, na costa sul de Portugal. Aí ocorre elevada renovação de água através de seis ligações permanentes ao Oceano Atlântico, importantes em termos de trocas de massa entre o ecossistema e o oceano.

O objetivo principal foi compreender o papel da Barra Faro-Olhão e dos principais canais adjacentes (Faro e Olhão), na dinâmica de nutrientes, clorofila *a* (*proxy* do fitoplâncton) e matéria em suspensão (orgânica e inorgânica), enfatizando a importância das trocas de massa entre a barra e oceano adjacente, em situações de maré quinzenal extremas (maré-viva e maré-morta), e no outono por dois anos consecutivos (2011 e 2012). Para tal, realizaram-se quatro campanhas de caracterização físico-química, onde se recolheram horariamente amostras de água, ao mesmo tempo que, a velocidade da corrente foi medida ao longo das secções transversais retas, para se estimar o prisma de maré e respetivos transportes de massa.

Globalmente, para as quatro campanhas o estado trófico dos locais amostrados revelou-se de qualidade muito bom, típico de águas oligotróficas. As características químicas ao longo dos ciclos de maré variaram não só em função da fase de maré quinzenal (mais intensamente em maré-viva), mas também, de fatores externos como processos oceanográficos (afloramento costeiro) e biológicos. Quanto ao transporte de massa de água, o volume trocado através da Barra Faro-Olhão foi superior à soma dos transportes através dos dois canais, e a contribuição do Canal de Faro foi superior à do Canal de Olhão. Independentemente da situação de maré e do ano considerado, a Ria Formosa atuou como fonte de nutrientes, exportando amónia e silicatos, e sólidos em suspensão através da barra, fertilizando e aumentando a produtividade biológica da zona costeira adjacente. No entanto, em situação de afloramento costeiro, a Ria Formosa atuou como um sumidouro, importando maiores quantidades de nitratos, fosfatos, silicatos e clorofila *a*, o que irá certamente potenciar a produtividade biológica deste ecossistema.

**Palavras-chave:** Ria Formosa, nutrientes, clorofila *a*, matéria particulada, prisma de maré, transporte.

## ABSTRACT

The Ria Formosa is shallow and productive coastal lagoon on the south coast of Portugal. There, a high water renewal occurs through six permanent connections with the Atlantic Ocean, very important in terms of mass exchange between the ecosystem and the ocean.

The main objective was to understand the role of the Faro-Olhão inlet and adjacent main channels (Faro and Olhão), the dynamics of nutrients, chlorophyll *a* (phytoplankton proxy) and suspended matter (organic and inorganic), emphasizing the importance of mass exchange between the inlet and adjacent ocean, in extreme fortnightly tides situations (spring and neap tides) in autumn conditions of two consecutive years (2011 and 2012). To this end, four physico-chemical campaigns were conducted, with hourly water samples collection, at the same time that the current velocity was measured along the cross-sections, to estimate the prism tide and respective transport mass.

Globally for the four campaigns, the trophic status of the sampling sites was considered very good, typical of oligotrophic waters. The chemical characteristics along the tidal cycles, varied not only as a function of the tidal phase (more intense in spring tides) but also dependent upon external factors such as oceanographic (upwelling) and biological processes. Regarding the mass transports, the water volumes exchanged through Faro-Olhão Inlet was higher than the sum of the volume transports through both channels, and the contribution of Faro Channel was higher than that of Olhão Channel. Regardless the tidal condition and the year considered, the Ria Formosa behaved as a source of nutrients, exporting ammonium and silicates, and suspended solids (including ~20% of organic matter) through the main inlet, which will fertilise and increase the biological productivity of the adjacent coastal zone. Nevertheless, under upwelling events, the Ria Formosa through its main inlet, behaved as a sink, importing higher amounts of nitrate, phosphate, silicate and chlorophyll *a* which certainly will potentiate the biological productivity of this ecosystem.

**Key-Words:** Ria Formosa, nutrients, chlorophyll *a*, particulate matter, tidal prism, transport.

# ÍNDICE

|  |     |
|--|-----|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                                | I   |
| <b>RESUMO</b> .....  | II  |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                      | III |
| <b>ÍNDICE</b> .....  | IV  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                             | VII |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....                             | X   |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....                         | XI  |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                                 | 1   |
| 1.1.    Sistemas lagunares costeiros .....                 | 1   |
| 1.2.    Ria Formosa .....                                  | 2   |
| 1.2.1.    Caracterização climática e hidrológica.....      | 3   |
| 1.2.2.    Caracterização morfológica e hidrodinâmica ..... | 3   |
| 1.2.3.    Caracterização oceanográfica.....                | 4   |
| 1.2.4.    Caracterização biológica .....                   | 4   |
| 1.3.    Motivação do presente estudo .....                 | 5   |
| 1.3.1.    Objetivos .....                                  | 7   |
| 1.4.    Descrição e Estrutura da Tese .....                | 8   |
| <b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....                         | 9   |
| 2.1.    Local de estudo e amostragem .....                 | 9   |
| 2.2.    Importância dos parâmetros analisados.....         | 11  |
| 2.2.1.    Temperatura.....                                 | 11  |
| 2.2.2.    Salinidade .....                                 | 11  |
| 2.2.3.    pH.....  | 11  |
| 2.2.4.    Oxigénio (O <sub>2</sub> ) .....                 | 12  |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 2.2.5.     | Nutrientes .....   | 12        |
| 2.2.5.1.   | Compostos de Azoto.....  | 12        |
| 2.2.5.2.   | Fosfatos .....   | 13        |
| 2.2.5.3.   | Silicatos .....  | 13        |
| 2.2.6.     | Sólidos em Suspensão .....   | 14        |
| 2.2.7.     | Clorofila <i>a</i> e Feopigmentos .....  | 14        |
| 2.3.       | Aquisição de dados <i>in situ</i> .....  | 15        |
| 2.4.       | Tratamento de dados físicos .....  | 16        |
| 2.4.1.     | Velocidade da corrente .....   | 16        |
| 2.4.2.     | Cálculo do transporte de massa .....   | 17        |
| 2.5.       | Tratamento de dados químicos.....  | 17        |
| 2.5.1.     | Procedimentos de filtração .....   | 17        |
| 2.5.1.1.   | Clorofila <i>a</i> e Feopigmentos .....  | 17        |
| 2.5.1.2.   | Sólidos em Suspensão .....   | 17        |
| 2.5.1.3.   | Nutrientes .....   | 18        |
| 2.5.2.     | Análise Laboratorial .....   | 18        |
| 2.5.2.1.   | Oxigénio dissolvido.....   | 18        |
| 2.5.2.2.   | Clorofila <i>a</i> e Feopigmentos .....  | 18        |
| 2.5.2.3.   | Sólidos em Suspensão .....   | 19        |
| 2.5.2.4.   | Nutrientes .....   | 20        |
| 2.5.2.4.1. | Amónia (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) .....   | 21        |
| 2.5.2.4.2. | Nitritos (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) .....   | 21        |
| 2.5.2.4.3. | Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....  | 21        |
| 2.5.2.4.4. | Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) .....  | 22        |
| 2.5.2.4.5. | Silicatos (SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> ) .....  | 22        |
| 2.6.       | Cálculo das razões molares entre nutrientes: azoto:fósforo e azoto:sílica .....  | 22        |
| 2.7.       | Cálculo do índice trófico (TRIX) .....   | 23        |
| 2.8.       | Análise Estatística .....  | 24        |
| <b>3.</b>  | <b>RESULTADOS</b> .....  | <b>26</b> |
| 3.1.       | Caracterização oceanográfica das campanhas de outono, através da análise do vento, temperatura superficial do mar e elevação do nível do mar .....             | 26        |
| 3.2.       | Variabilidade temporal, espacial e mareal dos parâmetros medidos <i>in situ</i> na barra faro-olhão, e nos canais de faro e olhão, em situação de outono ..... | 30        |



|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.3.      | Variabilidade temporal, espacial e mareal da concentração de nutrientes, sólidos em suspensão e clorofila a e feopigmentos .....                              | 37        |
| 3.4.      | Matrizes de correlação.....   | 45        |
| 3.5.      | Análise de componentes principais (ACP).....  | 49        |
| 3.6.      | Cálculo do índice TRIX .....  | 52        |
| 3.7.      | Caudais calculados na Barra Faro-Olhão, canais de Faro e de Olhão.....  | 53        |
| 3.8.      | Cálculo dos transportes de nutrientes, clorofila a e sólidos em suspensão.....  | 57        |
| <b>4.</b> | <b>DISCUSSÃO .....</b>  | <b>60</b> |
| 4.1.      | Influência das condições meteorológicas e dos mecanismos forçadores na variabilidade das características da água na Barra Faro-Olhão e canais adjacentes..... | 60        |
| 4.2.      | Papel da Barra de Faro-Olhão e canais adjacentes na dinâmica dos nutrientes, clorofila a e matéria em suspensão.....  | 67        |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>70</b> |
| <b>6.</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>73</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.1** - Representação do sistema lagunar da Ria Formosa, com as principais barras, ilhas-barreira e os maiores centros urbanos. ....2

**Figura 2.1**- Localização dos pontos e secções de amostragem na barra de Faro-Olhão. As linhas a amarelo representam os transectos seleccionados para a amostragem das velocidades e os pontos representam os locais da amostragem para análise química e medição de propriedades físico-químicas para as diferentes zonas: Barra Faro-Olhão (BFO), Canal de Faro (CF) e Canal de Olhão (CO), os PT's (as estrelas amarelas com o número no interior, 1- PT<sub>1</sub> perto de BFO, cais da ilha Deserta e 2- PT<sub>2</sub> no cais comercial de Faro, a 6 km a montante de BFO. ....10

**Figura 3.1**- Imagens de satélite da temperatura superficial do mar, compósitas de 7 dias delimitadas pela área 36°-38°N, 7°-10°W, por um período que antecedeu as campanhas: A)14-21 de setembro de 2011, B) 30 de setembro-7 de outubro de 2011, C) 8-15 outubro de 2011 e D) 16-23 de outubro de 2011. Fonte: OceanColor, NASA. ....26

**Figura 3.2** – (A) Intensidade e direção do vento (m/s) no aeroporto de Faro, (B) Temperatura da água (°C) e (C) Nível médio do mar (m) na barra Faro-Olhão, no cais da ilha Deserta e no cais comercial de Faro, entre 18 de outubro e 14 de dezembro de 2011. Nota: os eixos para os vetores de vara são rodados -90° a partir do Norte para corresponderem a ventos de Oeste. As linhas vermelhas representam os dias das campanhas (24 de novembro e 5 de dezembro de 2011), respetivamente. As manchas cinzentas identificam a ocorrência de afloramento costeiro. ....27

**Figura 3.3** - (A) Intensidade e direção do vento (m/s) no aeroporto de Faro, (B) Temperatura da água (°C) e (C) Nível médio do mar (m) na barra Faro-Olhão, no cais da ilha Deserta, entre 3 de Outubro e 1 de Dezembro de 2012. Nota: os eixos para os vetores de vara são rodados -90° a partir do Norte para corresponderem a ventos de Oeste. As linhas vermelhas representam os dias das campanhas (9 de Outubro e 16 de Outubro de 2012), respetivamente. As manchas cinzentas identificam a ocorrência de afloramento costeiro. ....28

**Figura 3.4** - Imagens de satélite da temperatura superficial do mar, compósitas de 7 dias delimitadas pela área 36°-38°N, 7°-10°W, por um período que inclui as campanhas: A) 17-24 de novembro de 2011, B) 3-10 de dezembro de 2011, C) 7-14 outubro de 2012 e D) 15-22 de outubro de 2012. Fonte: OceanColor, NASA. ....29

**Figura 3.5-** Perfil vertical da temperatura (°C), salinidade, pH e oxigénio dissolvido (% saturação) para A) BFO, B) CF e C) CO às 16:30 horas na campanha de 16 de outubro de 2012. ....31

**Figura 3.6-** Variabilidade dos valores de A) Temperatura (°C), B) Salinidade, C) pH, D) Oxigénio (% de saturação) e a altura da maré (H maré, m) ao longo dos quatro ciclos completos de maré em BFO, CF e CO, no outono de 2011 e 2012, em maré viva e maré morta. ....32

**Figura 3.7** – Variabilidade da concentração de A) amónia ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\mu\text{M}$ ), B) nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\mu\text{M}$ ), C) nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\mu\text{M}$ ) e a altura da maré (H maré, m) ao longo de quatro ciclos completos de maré em BFO, CF e CO realizado em condições de outono de 2011 e 2012, em maré viva e maré morta. ....36

**Figura 3.8** - Variabilidade da concentração de A) fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\mu\text{M}$ ), B) silicatos ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ,  $\mu\text{M}$ ), C) razão N:P ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\mu\text{M}$ ), D) razão N:Si e a altura da maré (H maré, m), a linha laranja representa as razões de Redfield N:P=16 e N:Si=1, ao longo de quatro ciclos completos de maré em BFO, CF e CO realizado em condições de outono de 2011 e 2012, em maré viva e maré morta. ....38

**Figura 3.9** - Variabilidade da concentração de A) clorofila *a* (Chl *a*,  $\mu\text{g/L}$ ), B) Feopigmentos (Feop,  $\mu\text{g/L}$ ), C) sólidos em suspensão (SS,  $\text{mg/L}$ ) e a altura da maré (H maré, m) ao longo de quatro ciclos completos de maré em BFO, CF e CO realizado em condições de outono de 2011 e 2012, em maré viva e maré morta. ....41

**Figura 3.10-** Imagens de satélite da clorofila *a*, compósitas de 7 dias delimitadas pela área 36°-38°N, 7°-10°W, por um período que antecede e inclui as campanhas: A) 17-24 de Novembro de 2011, B) 3-10 de Dezembro de 2011, C) 7-14 Outubro de 2012 e D) 15-22 de Outubro de 2012. Fonte: OceanColor, NASA. ....43

**Figura 3.11-** Análise de componentes principais (ACP) aplicadas a todos os dados analisados (parâmetros *in situ*, nutrientes, Chl *a*, SS) para as quatro campanhas e para BFO, CF e CO. T: temperatura, S: salinidade, SatOD: % saturação de oxigénio, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: amónia, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>: nitritos, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: nitratos, TIN: azoto inorgânico total, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>: fosfatos, SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>: silicatos, N\_P: razão N:P, N\_Si: razão N:Si, chl *a*: clorofila *a*, Chl *a*\_TP: clorofila ativa, SS: sólidos em suspensão, SSFO: fração orgânica, SSFM: fração inorgânica. A:PC1 vs PC2, e PC1vs PC3, B) projeção das campanhas (1-4) e locais (1-3) relativa ao comportamento dos parâmetros analisados. ...51

**Figura 3.12-** Índice trófico, TRIX- os valores médios das quatro amostragens para os três locais. Limite de classes- Azul: Muito Bom [0-4]; Verde: Bom [4-5]; Amarelo: Moderado [5-6] e Vermelho: Pobre [6-10]. As estrelas 1 e 2 representam a localização dos PT's e as linhas os transectos seleccionados para a amostragem das velocidades. ....52

**Figura 3.13-** Caudal, em m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>: A) BFO, B) CF, C) CO ao longo dos ciclos semidiurnos de maré-viva em 24 de Novembro de 2011 e 16 de Outubro de 2012 em comparação com os dos ciclos semidiurnos de maré-morta em 5 de Dezembro de 2011 e 9 de Outubro de 2012. Os valores positivos correspondem a períodos de enchente e os negativos a períodos de vazante. ....54

## ÍNDICE DE TABELAS

**Tabela 2.1** – Classificação do estado trófico e estado de qualidade para águas costeiras. ...24

**Tabela 3.1** - Matriz de correlação entre temperatura (°C), salinidade, pH, O<sub>2</sub>, saturação em O<sub>2</sub>, amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), azoto inorgânico total (NIT), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>), razão entre azoto e fosfatos (N:P), razão entre azoto e silicatos (N:Si), clorofila *a* (Chl *a* ativa), feopigmentos (Feop), razão clorofila *a* ativa/total pigmentos (Chl *a*:TP), sólidos em suspensão (SS), fração orgânica dos sólidos (SSFO) e fração mineral dos sólidos (SSFM) da campanha de 24 de novembro de 2011. ....46

**Tabela 3.2** - Matriz de correlação entre temperatura (°C), salinidade, pH, O<sub>2</sub>, saturação em O<sub>2</sub>, amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), azoto inorgânico total (NIT), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>), razão entre azoto e fosfatos (N:P), razão entre azoto e silicatos (N:Si), clorofila *a* (Chl *a* ativa), feopigmentos (Feop), razão clorofila *a* ativa/total pigmentos (Chl *a*:TP) sólidos em suspensão (SS), fração orgânica dos sólidos (SSFO) e fração mineral dos sólidos (SSFM) da campanha de 5 de dezembro de 2011. ....47

**Tabela 3.3** - Matriz de correlação entre temperatura (°C), salinidade, pH, O<sub>2</sub>, saturação em O<sub>2</sub>, amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), azoto inorgânico total (NIT), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>), razão entre azoto e fosfatos (N:P), razão entre azoto e silicatos (N:Si), clorofila *a* (Chl *a* ativa), feopigmentos (Feop), razão clorofila *a* ativa/total pigmentos (Chl *a*:TP), sólidos em suspensão (SS), fração orgânica dos sólidos (SSFO) e fração mineral dos sólidos (SSFM) da campanha de 9 de outubro de 2012. ....48

**Tabela 3.4** - Matriz de correlação entre temperatura (°C), salinidade, pH, O<sub>2</sub>, saturação em O<sub>2</sub>, amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), azoto inorgânico total (NIT), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>), razão entre azoto e fosfatos (N:P), razão entre azoto e silicatos (N:Si), clorofila *a* (Chl *a* ativa), feopigmentos (Feop), razão clorofila *a* ativa/total pigmentos, sólidos em suspensão (SS), fração orgânica dos sólidos (SSFO) e fração mineral dos sólidos (SSFM) da campanha de 16 de outubro de 2012. ....49

**Tabela 3.5** – Prismas de maré de enchente, vazante e residual (m<sup>3</sup>) para a barra Faro-Olhão (BFO), canal de Faro (CF) e canal de Olhão (CO) para 24 de novembro de 2011, 5 de dezembro de 2011, 9 de outubro de 2012 e 16 de outubro de 2012. Os valores positivos referem-se à importação e os negativos à exportação. ....56

**Tabela 3.6** - Transportes de enchente, de vazante e líquidos dos nutrientes, sólidos em suspensão (SS) e clorofila *a* (Chl *a*) da barra Faro-Olhão (BFO), do canal de Faro (CF) e do canal de Olhão (CO), durante as 4 amostragens realizadas: 24 de novembro de 2011, 5 de dezembro de 2012, 9 de outubro de 2012 e 16 de outubro de 2012. ....58

## LISTA DE ABREVIATURAS

BFO – Barra Faro-Olhão  
CF – Canal de Faro  
CO – Canal de Olhão  
T – temperatura  
S – salinidade  
Chl *a* – clorofila *a*  
SS – sólidos em suspensão  
H mare – altura da maré  
PT – transdutores de pressão  
ETAR – Estação de tratamento de águas residuais  
ADP – Perfilador acústico de efeito Doppler  
ACP – Análise de componentes principais  
O<sub>2</sub> – Oxigénio  
C – Carbono  
N – azoto  
P – fósforo  
Si – silício

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Sistemas lagunares costeiros

As lagoas costeiras são ecossistemas aquáticos particulares (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2013) geralmente orientados paralelamente à costa (Barnes, 1980; Newton & Mudge, 2003; Newton *et al.*, 2003), semifechados, pouco profundos e separados das águas costeiras por ilhas barreira e/ou penínsulas (Kennish & Pearl, 2010). Na sua maioria foram formadas durante o Holoceno como resultado do aumento do nível do mar e da construção de barreiras por processos marinhos (Dias *et al.*, 2000). Estes sistemas têm sido classificados pela Diretiva Quadro da Água (DQA, Diretiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu) quer como massas de águas de transição na maioria dos países Europeus, especialmente os da bacia do mar Mediterrâneo e alguns países na bacia do mar Báltico (McLusky & Elliott, 2007), onde a influência de água doce é importante, quer como águas costeiras, noutros sistemas nomeadamente em Portugal, onde a influência de água doce é restrita (Bettencourt *et al.*, 2004).

Os sistemas lagunares representam apenas 13% das zonas costeiras mundiais, mas são reconhecidos como ecossistemas naturais muito produtivos (Kjerfve, 1994; Newton & Mudge, 2003). Estes apresentam elevada disponibilidade de nutrientes e uma zona eufótica, que pode estender-se até ao fundo. Aqui ocorre rápida remineralização dos nutrientes que voltam à coluna de água (Kjerfve, 1994). Uma vez que a luz pode penetrar até ao fundo, tal proporciona também condições adequadas para o desenvolvimento de importantes comunidades de microalgas bentónicas cuja biomassa pode ser significativamente maior do que a do fitoplâncton.

Os sistemas lagunares são sistemas complexos e dinâmicos, cujas propriedades físicas, químicas e biológicas estão constantemente a ser alteradas (Casini *et al.*, 2015). Nestes sistemas ocorre uma forte dependência dos processos biogeoquímicos em relação aos mecanismos físicos forçadores. A concentração de nutrientes não é só controlada por uma combinação de processos biológicos, em particular a fotossíntese e respiração/remineralização, mas também por processos físicos de mistura a partir de entradas terrestres (Fommervault *et al.*, 2015), processos difusivos a partir do sedimento (Falcão, 1997); e ainda por influência de circulação atmosférica e termohalina, afloramento costeiro

(caso este ocorra na zona costeira adjacente) e da maré. Nos sistemas mesomareais, a variação da altura de maré é extremamente importante para explicar a variabilidade dos parâmetros entre condições extremas de maré.

Em Portugal existem três lagoas costeiras mesomareais: a Ria de Aveiro, a Ria de Alvor e a Ria Formosa. A Ria Formosa, por apresentar características peculiares e de relevante importância, motivou o presente estudo, passando-se de seguida à sua descrição.

## 1.2. Ria Formosa

A Ria Formosa é um sistema lagunar costeiro, localizado na costa sul de Portugal (Figura 1.1) e do ponto de vista geomorfológico é único na Europa (Ceia *et al.*, 2010). Apresenta uma área com mais de 80 km<sup>2</sup>, 55 km de comprimento na direção E-W e 6 km de largura máxima (N-S) (Newton & Mudge, 2003; Jacob *et al.*, 2013, 2014). A laguna é composta por sapais, bancos de areia e por uma complexa rede de canais naturais e parcialmente dragados (Pacheco *et al.*, 2008; Fabião *et al.*, 2014), dos quais alguns são navegáveis até aos portos de Faro, Olhão e Tavira (Newton & Mudge, 2003).



**Figura 2.1-** Representação do sistema lagunar da Ria Formosa, com as principais barras, ilhas-barreira e os maiores centros urbanos.



### **1.2.1. Caracterização climática e hidrológica**

A bacia hidrográfica da Ria Formosa tem uma área de 854 km<sup>2</sup>, inserindo-se numa região de clima mediterrânico, com invernos moderados e húmidos e verões quentes e secos. A temperatura do ar varia normalmente entre 8,0 °C e 30,0 °C, com valores médios anuais entre 16,0 °C e 20,0 °C (Serpa *et al.*, 2005). A baixa pluviosidade, em média 634 mm/ano, ocorre principalmente entre os meses de novembro e fevereiro (Newton & Mudge, 2003). Existem 25 fontes de água doce que drenam para lagoa, a maioria das quais escoam durante o inverno, estando secas no verão. O Rio Gilão (caudal médio anual 2,4 m<sup>3</sup>/s) é o único curso de água doce permanente, mas afeta principalmente a região oriental da lagoa. As entradas de água doce mais relevantes para as regiões ocidentais da lagoa (Rio Seco e Ribeira de São Lourenço) apresentam caudais médios anuais menores em comparação com o Rio Gilão (Serpa *et al.*, 2005).

### **1.2.2. Caracterização morfológica e hidrodinâmica**

A Ria Formosa encontra-se separada do oceano por um sistema de ilhas-barreira, constituído por cinco ilhas e duas penínsulas (Andrade, 1990; Pacheco *et al.*, 2010). A troca de água permanente entre a laguna e o oceano realiza-se através de seis barras permitindo assim a circulação e refrescamento da mesma dentro do sistema (Matias *et al.*, 2008; Alcântara *et al.*, 2012). Hidrodinamicamente, a lagoa pode ser dividida em três regiões diferentes. A região oeste inclui as barras do Ancão, Faro-Olhão e Armona, a região central inclui as barras da Fuzeta e Tavira e a região este que inclui a Barra de Lacém (Salles *et al.*, 2005; Pacheco *et al.*, 2010).

Estudos anteriores, como Salles *et al.* (2005), Pacheco *et al.* (2010) e mais recentemente Jacob *et al.* (2013) mostram que o sector oeste da Ria Formosa representa aproximadamente 90% do prisma total. A Barra Faro-Olhão é a principal, por onde são trocados cerca de 59% a 71% da água, enquanto que a restante é trocada pela Barra da Armona (25% a 37%) e pela Barra do Ancão (< 6%) (Jacob *et al.*, 2013).

É um sistema sujeito a um regime mesomareal, com uma variação de altura média de maré de aproximadamente 2 m, variando de 1,5 m para marés mortas até 3,5 m para marés vivas, podendo mesmo chegar aos 3,8 m na maré viva equinocial (Newton & Mudge, 2003; Salles *et al.*, 2005). As marés são do tipo semidiurno (Jacob *et al.*, 2014), e o tempo de residência da água é baixo, particularmente nas barras e nos canais principais, aumentando para o seu interior (Fabião *et al.*, 2014).

O efeito da maré é o fator com maior contribuição na circulação da água (Jacob *et al.*, 2014), responsável por uma taxa de renovação elevada, de cerca de 50 a 75% da água trocada diariamente com o oceano adjacente (Newton & Mudge, 2003; Brito *et al.*, 2010; Meyeres *et al.*, 2010). Como consequência, e devido à reduzida entrada de água doce a coluna de água encontra-se bem misturada, sem evidência de estratificação salina ou térmica, particularmente nas zonas mais exteriores da Ria Formosa (Cravo *et al.*, 2012).

### **1.2.3. Caracterização oceanográfica**

A zona costeira adjacente à Ria Formosa está inserida na região do Golfo de Cádiz (Barbosa, 2010), que é uma bacia grande localizada a sudoeste da Península Ibérica e liga o Oceano Atlântico ao Mar Mediterrâneo através do Estreito de Gibraltar (Navarro *et al.*, 2006).

Esta região costeira é afetada por eventos de afloramento costeiro, relacionados com o forçamento de ventos com componente de oeste (Alcântara *et al.*, 2012, Cravo *et al.*, 2014). Estes eventos ocorrem com maior frequência entre os meses de Abril e Outubro, sendo o relaxamento do afloramento associado ao desenvolvimento de uma contracorrente costeira quente (Relvas & Barton, 2002; Garel *et al.*, 2016).

### **1.2.4. Caracterização biológica**

A Ria Formosa é um sistema produtivo (Newton & Icely, 2006), com uma produção primária de aproximadamente  $1400 \text{ g C m}^{-2}$  por ano (Sprung *et al.*, 2001). A sua elevada produtividade é resultante da atividade de extensas comunidades de ervas marinhas, macrófitas bentónicas e algas unicelulares (Sprung, 1994), donde se destacam as microalgas bentónicas (Brito *et al.*, 2010). A contribuição das microalgas bentónicas para a clorofila total encontrada na coluna de água pode ir até 25% da produção primária total anual (Brito *et al.*, 2010). A área submareal é colonizada pelas ervas marinhas *Cymodocea nodosa*, *Zostera*

*marina* e *Zostera noltii* (Cunha, 2009; Gamito *et al.*, 2012; Guimarães *et al.*, 2012). Durante o inverno os sapais são cobertos por macroalgas verdes, principalmente *Ulva* spp. e *Enteromorpha* spp. (Sprung *et al.*, 2001; Aníbal *et al.*, 2007). Esta produtividade é potenciada principalmente devido à disponibilidade de nutrientes e de luz, pela baixa profundidade própria deste local, que facilita os processos de troca de nutrientes e oxigénio, quer entre a coluna de água e o sedimento, quer entre o interior do sistema e a zona marinha adjacente (Falcão & Vale, 1990).

A ria Formosa também é considerada um ecossistema com elevada biodiversidade, muito importante para várias espécies aquáticas que aí se reproduzem, nomeadamente peixes, moluscos, crustáceos e aves, correspondendo a uma zona de maternidade e de crescimento (Barbosa, 2006; Brito *et al.*, 2012). No âmbito da legislação Portuguesa é reconhecida como Parque Natural desde 1987 (Loureiro *et al.*, 2006), a nível internacional faz parte da zona húmida integrada na Convenção de Ramsar e Berna (Ceia *et al.*, 2010), área protegida através da Diretiva Aves (79/409/EEC) e membro da Rede Natura 2000 (Brito *et al.*, 2012), com o objetivo de alcançar uma exploração racional e sustentável dos seus recursos (Ceia *et al.*, 2010).

Este sistema lagunar é também importante do ponto de vista económico e social para diversas atividades como o turismo, pesca, aquacultura e extração de sal (Brito *et al.*, 2011; Almeida & Soares, 2012; Cravo *et al.*, 2012; Guimarães *et al.*, 2012).

### **1.3.Motivação do presente estudo**

Pelo anteriormente descrito, a Ria Formosa é um ecossistema valioso, que importa preservar e conservar. A sua localização, morfologia e dinâmica tornam este ecossistema único e com uma importância ambiental e económica elevada para a região. É pois muito importante observar para melhor se conhecer este ecossistema, e sempre que possível, melhorar a sua qualidade ambiental. Neste ecossistema, as trocas com o oceano são muito importantes para o seu funcionamento e reguladas principalmente pelos ciclos biogeoquímicos naturais, dependentes dos forçamentos físicos: ventos, marés, transporte de sedimentos ao longo da costa, entre outros (Salles *et al.*, 2005; Alcântara *et al.*, 2012). A importância dos processos oceanográficos e de maré na zona costeira adjacente é refletida nas características físico-químicas da massa de água neste ecossistema, particularmente em zonas

situadas na proximidade das barras (Newton, 1995). Em consequência, as concentrações de nutrientes no interior da ria também dependem da variabilidade da qualidade das águas costeiras adjacentes. A realização de vários trabalhos nas vertentes da hidro- e morfodinâmica e de aplicações de modelos numéricos já permitiram quantificar as trocas de água entre a lagoa e o mar (Salles, 2001; Martins *et al.*, 2003; Dias *et al.*, 2009, Pacheco *et al.*, 2010). Dias *et al.* (2009) mostraram a dependência das trocas de água com a morfologia e localização das barras, já que as naturais sofrem algumas migrações.

Por ser um ecossistema tão importante, tem sido foco de muitos estudos nas diversas áreas do domínio científico, alguns deles interdisciplinares e integrados em projetos internacionais (Alcântara *et al.*, 2012). A maioria dos trabalhos com vertente de química tem contemplado vários parâmetros (ex.: nutrientes, oxigénio e clorofila *a*), em vários locais, embora com descontinuidade no espaço e no tempo. Assim, torna-se de extrema relevância conhecer este ecossistema usando uma abordagem integradora onde se possam interligar os processos físicos, químicos, biológicos e de modelação para melhor se compreender o seu funcionamento. Destaca-se a importância do estudo da sua dinâmica e de trocas de matéria com o oceano adjacente. Existem alguns estudos de química sobre a importância das trocas de água entre a ria e o oceano, baseados apenas em amostras de água recolhidas em algumas estações fixas no interior da lagoa, mas que não quantificaram os transportes de massa (Newton *et al.*, 2003; Falcão & Vale, 2003; Newton & Mudge, 2005; Barbosa, 2010), pois não consideram as condições hidrodinâmicas e de circulação (correntes). Somente a partir de 2007 se começaram a desenvolver estudos dedicados à dinâmica das trocas de água, de nutrientes e de matéria particulada entre a Ria Formosa e o oceano adjacente. O estudo pioneiro decorreu na mais pequena das barras do sector oeste da Ria Formosa – a Barra do Ancão (Alcântara *et al.*, 2012).

Neste âmbito, e de forma a contribuir para um conhecimento mais abrangente da Ria Formosa surgiu o projeto de investigação científica “COALA – Dinâmica dos nutrientes e da matéria particulada – trocas entre uma lagoa costeira e o oceano adjacente através de um sistema de múltiplas barras: o caso da Ria Formosa, sul de Portugal” (PTDC/MAR/114217/2009), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). Este projeto pretendeu melhorar o conhecimento sobre o funcionamento do sistema da Ria Formosa, no seu setor mais importante – o oeste - atendendo à dinâmica dos nutrientes, clorofila *a* (*proxy* da concentração de fitoplâncton) e matéria particulada (orgânica e inorgânica). Foi dada especial atenção à circulação da água no seu interior, às trocas com o oceano através das barras e à influência da maré. Para complementar esta informação e

perceber melhor a circulação no interior da Ria, recorreu-se à modelação numérica. Para melhor entender o papel e efeito dos processos oceanográficos a nível das trocas entre o oceano e a Ria Formosa utilizou-se a análise de imagens de satélite de temperatura superficial do mar e de clorofila *a*.

### 1.3.1. Objetivos

O presente trabalho inseriu-se no âmbito do projeto COALA e tem como objetivo principal compreender o papel da Barra de Faro-Olhão (a principal da Ria Formosa) e seus canais adjacentes a nível da dinâmica dos nutrientes, clorofila *a* e matéria em suspensão (incluindo as frações orgânica e inorgânica), com particular destaque para a importância das trocas de massa entre a Barra Faro-Olhão e o oceano adjacente. Neste contexto, pretendeu-se ainda entender a influência desta dinâmica na atividade biológica deste ecossistema, particularmente a nível da variabilidade de clorofila *a* e fração orgânica da matéria particulada bem como a variabilidade temporal a diferentes escalas (mareal e interanual) numa situação de outono. Como objetivos específicos pretendeu-se:

- i. Avaliar a variabilidade dos vários parâmetros: temperatura, salinidade, pH, oxigénio dissolvido e concentração de nutrientes, matéria em suspensão (e suas frações orgânica e inorgânica) e clorofila *a* na Barra Faro-Olhão, e nos canais adjacentes (de Faro e de Olhão) em situações de maré quinzenal extremas (maré viva e maré morta), em dois anos consecutivos (2011 e 2012), sob condições meteorológicas distintas e perceber os mecanismos forçadores mais importantes para essa variabilidade.
- ii. Calcular as razões entre os nutrientes, entre a clorofila *a* e os feopigmentos e entre as frações dos sólidos em suspensão.
- iii. Calcular a contribuição global das trocas através da Barra Faro-Olhão e a contribuição individual de cada um dos seus canais adjacentes (de Faro e de Olhão), para o transporte de massa de água, nutrientes, clorofila *a* e sólidos em suspensão, de modo a perceber a dinâmica no interior da Ria Formosa junto da sua principal barra.

## 1.4. Descrição e Estrutura da Tese

A presente tese é constituída por 5 capítulos e referências bibliográficas. No *Capítulo 1*, faz-se uma apresentação geral sobre sistemas lagunares costeiros, e do sistema da Ria Formosa em particular, incluindo a sua caracterização: i) climática e hidrológica; ii) morfológica e hidrodinâmica e iii) oceanográfica e biológica. Ainda se descreve neste capítulo a motivação e os objetivos da tese. No *Capítulo 2* é descrito o local de estudo e amostragem, a importância dos parâmetros analisados, assim como todos os métodos utilizados durante o trabalho de campo, o procedimento laboratorial, o tratamento dos dados físicos e químicos e a análise estatística dos mesmos. No *Capítulo 3* apresenta-se a análise dos resultados, nomeadamente a variabilidade entre os locais de amostragem, entre profundidades, e temporal quer entre marés quer entre campanhas. No *Capítulo 4* faz-se a discussão e interpretação dos resultados bem como a comparação com outros trabalhos. Por fim no *Capítulo 5* apresentam-se as conclusões gerais da tese.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados analisados neste trabalho foram obtidos no decorrer de quatro campanhas oceanográficas, realizadas no âmbito do projeto de investigação científica “COALA”, na Barra Faro-Olhão (BFO) e nos canais de Faro (CF) e de Olhão (CO). Para caracterizar a variabilidade da estação outonal, as campanhas decorreram em dois anos sucessivos, durante o outono de 2011 e 2012. Para avaliar o efeito da maré na variabilidade dos resultados, as campanhas foram realizadas em semanas consecutivas, em condições de maré viva e de maré morta, ao longo de ciclos completos de maré (12,5 h). As duas campanhas em 2011 foram realizadas a 24 de novembro (maré viva) e 5 de dezembro (maré morta) enquanto as de 2012 a 9 (maré morta) e 16 de Outubro (maré viva). Os parâmetros analisados foram: velocidade da corrente, temperatura, salinidade, O<sub>2</sub> dissolvido, concentração de O<sub>2</sub>, pH, nutrientes, sólidos em suspensão (SS) incluindo as frações fixa e volátil, clorofila *a* (chl *a*) e feopigmentos.

### 2.1. Local de estudo e amostragem

A Barra Faro-Olhão (Figura 2) é a principal barra do sistema da Ria Formosa, foi aberta progressivamente de forma artificial entre os anos de 1929 e 1955, tendo como objetivo manter as profundidades navegáveis nos canais de acesso aos principais portos da região de Faro e de Olhão (Andrade, 1990; Salles, 2001; Vila-Concejo *et al.*, 2006; Pacheco *et al.*, 2008). No entanto, a configuração dos molhes teve efeitos importantes na fisiografia da Ria Formosa, nos balanços sedimentares e no comportamento hidrodinâmico da lagoa, retirando eficiência hidráulica (Pacheco *et al.*, 2014). Alguns autores tem referido que esta barra é predominantemente de enchente, apresentando um prisma de enchente comparativamente maior do que o prisma de vazante (Salles *et al.*, 2005; Pacheco *et al.*, 2010).

Estudos recentes de hidrodinâmica e transporte de sedimentos mostram que a barra interceta 60% do prisma total da sub-bacia oeste da Ria Formosa (Pacheco *et al.*, 2010) e o seu prisma de enchente é maior do que o de vazante (Salles, 2001; Pacheco *et al.*, 2008; 2010; 2011). As correntes perto da barra podem atingir valores médios de 2,2 m/s e 1,6 m/s durante a vazante e a enchente, respetivamente (IH, 2000; Salles, 2001). Normalmente, as correntes de deriva litoral e transportes nesta zona ocorrem de oeste para este (Concejo *et al.*, 2006; Pacheco *et al.*, 2008).

A eficácia hidráulica desta barra deve-se à sua proximidade com o Canal de Faro, sendo este o maior e mais eficiente hidrodinamicamente da área oeste da Ria (Salles, 2001), é orientado de Noroeste (NW) para Sudeste (SE), apresenta um comprimento de 9 km e cobre uma área de 337 km<sup>2</sup> (Salles, 2001; Pacheco *et al.*, 2011).

O canal de Faro não serve só de acesso ao porto de Faro, mas também de rota para pescadores, turistas e barcos de recreio. A barra Faro-Olhão é também acesso para o canal de Olhão que serve de comunicação a um dos portos de pesca mais importantes da região do Algarve, localizado nesta cidade, que por sua vez abriga várias indústrias relacionadas com peixe, marisco e portos/turismo de lazer. A descarga de águas residuais, a aquicultura e exploração de bivalves são também atividades adicionais nesta zona, causando mudanças físicas, biológicas e químicas para o ambiente circundante (Pacheco *et al.*, 2007).



**Figura 2.1-** Localização dos pontos e secções de amostragem na barra de Faro-Olhão. As linhas a amarelo representam os transectos selecionados para a amostragem das velocidades e os pontos representam os locais da amostragem para análise química e medição de propriedades físico-químicas para as diferentes zonas: Barra Faro-Olhão (BFO), Canal de Faro (CF) e Canal de Olhão (CO), os PT's (as estrelas amarelas com o número no interior, 1- PT<sub>1</sub> perto de BFO, cais da ilha Deserta e 2- PT<sub>2</sub> no cais comercial de Faro, a 6 km a montante de BFO).



## **2.2.Importância dos parâmetros analisados**

### **2.2.1. Temperatura**

A temperatura é considerada um parâmetro físico fundamental na avaliação da qualidade da água não só pelas variações ambientais locais, sazonais, mas também por influenciar a velocidade das reações químicas e biológicas. É importante medir as variações de temperatura que ocorrem em diferentes partes na coluna de água, uma vez que a fotossíntese e a respiração dos microrganismos é fortemente afetada pelas mudanças de temperatura e permite compreender melhor a regulação dos processos metabólicos (Varney, 2000). Portanto, a temperatura é um dos parâmetros mais importantes devido à sua influência sobre outros parâmetros (Manzoli *et al.*, 2011).

### **2.2.2. Salinidade**

Na nossa costa, a salinidade aumenta como resultado da evaporação e diminui com a ocorrência de chuvas e escoamentos difusos de terra e drenagem de rios. A salinidade superficial é controlada pela diferença entre a evaporação e a precipitação que ocorrem em diferentes latitudes (Millero, 2013). Este parâmetro é considerado um importante fator que afeta a sobrevivência e distribuição dos organismos, uma vez que a variação da salinidade provoca um *stress* osmótico (Kaiser *et al.*, 2011).

### **2.2.3. pH**

O pH ou potencial de hidrogênio indica a acidez, neutralidade ou a alcalinidade de um determinado meio, neste caso da água do mar. A variação do pH influencia a solubilidade dos compostos químicos e a disponibilidade biológica, como os nutrientes (fósforo, azoto e carbono) (Manzoli *et al.*, 2011).

#### **2.2.4. Oxigénio (O<sub>2</sub>)**

O oxigénio dissolvido é o elemento principal no metabolismo dos organismos aeróbios (Manzoli *et al.*, 2011), sendo indispensável para viver e sem ele os ambientes aquáticos seriam estéreis (Varney, 2000). A concentração de oxigénio dissolvido na água do mar varia entre 0 mg/L (águas estagnadas) e 10 mg/L (regiões de supersaturação e em regiões de grandes profundidades) (Parsons *et al.*, 1984), sendo que a maioria das espécies de peixes não sobrevive a concentrações inferiores a 4 mg/L (Manzoli *et al.*, 2011). É importante a determinação deste parâmetro pelo facto do seu teor permitir compreender os processos bioquímicos que ocorrem no oceano.

#### **2.2.5. Nutrientes**

Os nutrientes são substâncias inorgânicas secundárias da água do mar, com carácter não conservativo uma vez que estão sujeitos à utilização pelas comunidades autotróficas e “reciclagem” através de ciclos biogeoquímicos bem como à sua introdução por ação antropogénica (Carter, 1988; Millero, 1996). Alguns destes compostos são designados por micronutrientes, devido às suas reduzidas concentrações no meio marinho, sendo os principais o azoto, o fósforo e o silício (Millero, 2013).

A atividade fotossintética e consequentemente a produção primária são influenciadas pela temperatura e pela intensidade e quantidade de luz que penetra na coluna de água (Arnone *et al.*, 1993). O perfil vertical típico dos nutrientes caracteriza-se por concentrações baixas ou quase nulas à superfície, devido ao seu consumo por parte dos fitoplânctons, ocorrendo um aumento gradual em profundidade, resultante da remineralização/decomposição da matéria orgânica e da sua menor utilização pelos fitoplânctons (Millero, 2013).

##### **2.2.5.1. Compostos de Azoto**

O azoto encontra-se no meio marinho sob as formas dissolvida e particulada, subdividindo-se em compostos orgânicos e inorgânicos (Millero, 2013). Apesar da forma mais abundante de azoto presente na água do mar ser o azoto molecular (95%), os compostos inorgânicos (2,5%), nomeadamente o nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) e a amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), assumem uma grande importância para o meio marinho, uma vez que são formas preferencialmente assimiladas como nutrientes pelo fitoplâncton.

O nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) é a forma de azoto inorgânico termodinamicamente mais estável (mais oxidada) dos compostos azotados inorgânicos, correspondente ao produto de oxidação final dos compostos azotados como sendo o composto azotado dissolvido mais abundante no meio marinho (Libes, 1992).

O nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) é a forma de azoto inorgânica que se encontra presente em meio marinho com menor concentração em relação às outras formas azotadas. Apresenta-se como um composto intermediário de transição, formado por atividade biológica quer através da oxidação da amónia quer da redução do nitrato (Valiela, 1995).

A amónia ( $\text{NH}_4^+$ ) depende da concentração de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Contudo, o equilíbrio entre estes dois compostos encontra-se deslocado para a direita e na água do mar prevalece a concentração de amónia. Ocorre em meio marinho através do processo de decomposição dos compostos orgânicos azotados e é referida como sendo o produto mais excretado por muitos invertebrados, incluindo o zooplâncton (Parsons *et al.*, 1984). Este composto, à semelhança do nitrito, é mais abundante em níveis onde a decomposição da matéria orgânica é maior e é a forma mais facilmente assimilada pelo fitoplâncton.

#### **2.2.5.2. Fosfatos**

O fósforo encontra-se presente no meio marinho sob as formas dissolvida e particulada, as quais se subdividem em orgânica e inorgânica, sendo a fase inorgânica dissolvida (ião fosfato) assimilada pelo fitoplâncton durante o processo de fotossíntese e é transformada de fração orgânica a inorgânica, durante o processo de remineralização (Millero, 2013).

As concentrações de fosfato no oceano são igualmente controladas por processos físicos e biológicos, à semelhança dos compostos de azoto, apesar de existirem, em geral, em concentrações mais baixas.

#### **2.2.5.3. Silicatos**

Em alguns sistemas estuarinos temperados a sílica apresenta um comportamento conservativo, onde os processos biológicos não são um fator dominante (Statham, 2012). À semelhança dos compostos de azoto e fósforo, o silício encontra-se presente na água do mar na forma dissolvida e particulada, sob a forma de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e de iões de silicato ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ), respetivamente (Millero, 2013).

Os compostos ricos em sílica resultam da erosão mineral proveniente de rochas terrígenas (Statham, 2012), sendo transportados pelos rios (Capellacci *et al.*, 2012) e depositando-se nos sedimentos onde reagem com outros compostos existentes no meio e formam minerais secundários (Millero, 2013). A sílica é considerada um componente chave para os ciclos biogeoquímicos (Opfergelt & Delmelle, 2012) e constitui cerca de 60% dos exosqueletos marinhos (Millero, 2013), nomeadamente nas frústulas das diatomáceas, nos radiolários e nas esponjas, ricos em opalina - uma forma não cristalina de silicato (Statham, 2012; Millero, 2013).

A absorção do silício está associada à ocorrência de *blooms* de diatomáceas, que tem sido observado em muitos sistemas estuarinos/costeiros (Statham, 2012). Contrariamente aos mecanismos de absorção, a concentração e dinâmica da sílica nos sistemas aquáticos pode ser influenciada pelos seguintes fatores i) temperatura, através do rápido efeito na dissolução da sílica opalina (Capellacci *et al.*, 2012), ii) pela ação dos organismos bentônicos, como a bioturbação e excreção (Asmus *et al.*, 2000), predação do zooplâncton, consumo pelas diatomáceas, radiolários e esponjas e pela atividade bacteriana (Capellacci *et al.*, 2012), iii) introdução através de escorrências de rios e pelo vento (Millero, 2013).

#### **2.2.6. Sólidos em Suspensão**

São definidos como substâncias insolúveis as que ficam retidas num filtro específico quando um determinado volume de amostra de água é filtrada. Dos sólidos em suspensão fazem parte muitas partículas, tanto de origem orgânica (fitoplâncton, algas, zooplâncton e matéria orgânica em decomposição) como inorgânica (sedimentos, areias). A sua determinação conjuntamente com as suas frações orgânica e inorgânica é muito importante, pois permite avaliar que fração prevalece sabendo ainda que se trata de um parâmetro com influência na turbidez da água, na atividade fotossintética das macro e/ou microalgas e consequentemente na concentração de oxigénio dissolvido.

#### **2.2.7. Clorofila *a* e Feopigmentos**

A concentração de pigmentos fotossintéticos é amplamente utilizada para estimar a biomassa de fitoplâncton. Em todas as algas está presente clorofila *a* e para o fitoplâncton a concentração deste pigmento constitui aproximadamente 1% a 2% de massa seca. O valor da

concentração de clorofila *a* pode ser relacionado com a biomassa total (medida relativa da abundância do fitoplâncton na água). Em conjunto com as clorofilas existem vários produtos de degradação derivados das algas mortas presentes nas amostras de água, tais como feopigmentos que absorvem radiação do mesmo comprimento de onda interferindo na determinação das clorofilas. A determinação conjunta da clorofila e dos feopigmentos permite compreender em que estado se encontram as populações fitoplanctónicas, se a razão entre a percentagem da clorofila e o total de pigmentos for superior a 50% é considerada como sendo uma população jovem e se for inferior a 50% será considerada uma população envelhecida (Lorenzen, 1967).

### **2.3. Aquisição de dados *in situ***

Para a aquisição de dados de velocidade das correntes e determinação da fisiografia da Barra de Faro Olhão e dos seus canais (Faro e Olhão) foi utilizado um perfilador acústico por efeito de Doppler (ADP) Sontek/YSI 1.5 MHz ao longo da secção reta perpendicular às margens, em cada um dos três locais de amostragem, Barra de Faro-Olhão e canais de Faro e de Olhão. O seguimento de fundo permite que o ADP meça ao mesmo tempo a velocidade, direção e profundidade da água sob o sistema. Estes dados são permitem determinar a “verdadeira” velocidade e direção da corrente (Sontek, 2005).

Para a medição *in situ* dos parâmetros temperatura, salinidade, pH, O<sub>2</sub> dissolvido, concentração de O<sub>2</sub> foi usada uma sonda multiparamétrica (modelo YSI 6820), previamente calibrada em laboratório, com soluções padrão específicas. A calibração do sensor de oxigénio (O<sub>2</sub>) foi confirmada posteriormente em laboratório com amostras recolhidas para determinação de O<sub>2</sub> dissolvido pelo método de Winkler. Para os três locais de amostragem, um em cada secção, foram seleccionados 2 a 3 níveis num ponto central do canal em função da sua profundidade.

Neste ponto central foram recolhidas amostras de água às profundidades seleccionadas, utilizando uma garrafa de *Niskin* (5 L). Também foi determinada a profundidade de extinção do disco de *Secchi* e a profundidade máxima da coluna de água. Para o transecto da Barra Faro-Olhão as medições foram realizadas junto à boia vermelha nº 6, para o transecto do Canal de Faro foram feitas na boia verde nº 5 e para o transecto Canal de Olhão as medições foram realizadas num ponto médio do canal no enfiamento do pontão dos Hangares.

Para a determinação da concentração de oxigénio (confirmação da sonda), de nutrientes ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{SiO}_4^{4-}$ ), sólidos em suspensão (SS), clorofila *a* (chl *a*) e feopigmentos, na Barra Faro-Olhão, foram recolhidas amostras às seguintes profundidades: superfície (1 m de profundidade), profundidade de extinção do disco de *Secchi* ou meio da coluna de água quando esta profundidade foi inferior a 3 m e fundo (1 m acima do sedimento, profundidade máxima ~13 m). Em 2011 a amostragem nos canais (Faro e Olhão), foi feita à superfície e no fundo (coluna de água <10 m) e em 2012 somente a um nível, 1-1,5 m de profundidade, porque os dados das campanhas de 2011 não apresentaram variações significativas ( $p > 0,05$ ) ao longo da coluna de água. O volume de água que se recolheu foi o seguinte: 1 frasco de 1 L para os nutrientes e SS e outro de 2 L para a chl *a* e feopigmentos.

Posteriormente à recolha, as amostras foram colocadas em malas térmicas refrigeradas para serem transportadas para o laboratório, onde foram tratadas.

## 2.4. Tratamento de dados físicos

### 2.4.1. Velocidade da corrente

A velocidade da corrente foi obtida ao longo de uma secção reta dos três locais de amostragem, de hora a hora, recorrendo a um ADP. A partir da integração do produto da velocidade normal à secção reta com a área dessa secção foi possível calcular o caudal através da equação 1,

$$Q = \iint_A v \cdot n \, dS \quad (1)$$

Q- Caudal ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

v- velocidade ao longo a secção ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

n- vetor unitário normal à secção.

dS- elemento de área de secção reta ( $\text{m}^2$ ).

A-área da secção reta do canal ( $\text{m}^2$ ).

A integração do caudal ao longo do respetivo período de amostragem permitiu ainda obter os prismas de maré de enchente, de vazante e residual (soma de enchente e vazante).

## **2.4.2. Cálculo do transporte de massa**

O cálculo do transporte dos diferentes parâmetros ao longo do ciclo de maré completo foi obtido pela integração no tempo do produto entre as concentrações médias na secção reta e o caudal. O sinal do transporte total ao longo do ciclo de maré completo permite determinar o comportamento da Barra Faro-Olhão e seus canais adjacentes, quanto à importação ou exportação destes compostos.

## **2.5. Tratamento de dados químicos**

### **2.5.1. Procedimentos de filtração**

As amostras recolhidas na Ria Formosa foram processadas e analisadas em laboratório, de acordo com o procedimento seguinte:

#### **2.5.1.1. Clorofila *a* e Feopigmentos**

As amostras, em duplicado, foram homogeneizadas cuidadosamente e filtradas a baixa luminosidade e pressão de vácuo reduzida (< 200 mm Hg), de forma a evitar o rompimento das células fitoplanctónicas de menores dimensões. Nas campanhas de 2012, a filtração fez-se de forma integrada, 0,5 L de cada nível amostrado (perfazendo um total de 1,5 L por filtro para a Barra Faro-Olhão e 1 L para os canais) para se ter um valor médio representativo da coluna de água. O filtro utilizado foi de fibra de vidro GF/F Whatman, com dimensão nominal de poro de 0,7 µm. Posteriormente, os filtros foram dobrados em quatro, colocados num envelope de papel de alumínio, identificados e congelados a -20 °C até serem analisados.

#### **2.5.1.2. Sólidos em Suspensão**

As amostras, em duplicado, foram filtradas também de forma integrada, como descrito para a clorofila *a* e feopigmentos, usando-se filtros de fibra de vidro (0,45 µm de porosidade), previamente identificados, queimados e pesados. Acabada a filtração, o filtro foi lavado com água destilada, seguidamente foi colocado numa caixa de Petri para posterior análise de sólidos fixos e voláteis.

### 2.5.1.3. Nutrientes

As amostras foram filtradas utilizando filtros Gelman (acetato de celulose), 0,45 µm de porosidade, previamente lavados e descontaminados. As amostras filtradas foram posteriormente congeladas a -20 °C até serem analisados.

## 2.5.2. Análise Laboratorial

### 2.5.2.1. Oxigénio dissolvido

O método utilizado para a determinação laboratorial do oxigénio dissolvido (O<sub>2</sub> dissolvido) foi o de Winkler (1888), posteriormente modificado por Carrit & Carpenter (1966). Este método consiste na fixação do O<sub>2</sub> dissolvido na água do mar, logo após a colheita das amostras de água, através da adição de uma solução bivalente de manganês (W<sub>1</sub>- 1 mL) e de seguida uma solução básica de iodo (W<sub>2</sub> – 1 mL).

Após a recolha a bordo em duplicado, o oxigénio dissolvido foi determinado através da titulação das amostras com uma solução padrão de tiosulfato de sódio tendo como indicador o amido. O cálculo da concentração de oxigénio é feito com base na fórmula 2,

$$\text{Oxigénio dissolvido (mg l}^{-1}\text{)} = \frac{(a - b) \times f \times 0.16 \times 10^3}{V - 2} \quad (2)$$

*a* - volume de solução de tiosulfato necessário à titulação (mL).

*b*- volume de tiosulfato necessário à titulação do *branco*.

*f*- fator da solução tiosulfato.

V- o volume do frasco de Winkler (mL) e 0,16 a 1 mL de tiosulfato [0,02N] corresponde a 0.16 mg ou a 0.112 cm<sup>3</sup> de oxigénio.

### 2.5.2.2. Clorofila a e Feopigmentos

A concentração de clorofila *a*, “*proxy*” da biomassa fitoplanctónica total, foi quantificada através de espectrofotómetro, tendo por base o método monocromático de Lorenzen (1967). Esta técnica é recomendada para sistemas estuarinos ou costeiros com intensa ressuspensão e elevada concentração de feopigmentos (Barbosa, 2006).



Depois do procedimento adotado após a recolha das amostras, os filtros foram descongelados e cada um foi colocado num tubo de ensaio, protegido da luz com papel de alumínio (evita a degradação dos pigmentos à luz), adicionou-se 5 mL de acetona a 90% (previamente refrigerada) procedendo-se em seguida à maceração do filtro (a fibra de vidro do filtro ajuda na destruição das carapaças de muitos fitoplantontes, permitindo a libertação da clorofila para o solvente), com o auxílio de uma vareta de vidro de extremidade irregular. Seguidamente, adicionou-se mais 5 mL de acetona a 90% e foram colocados no frigorífico durante um período de 8 a 24 horas para finalizar o processo de extração de chl *a*. Após este período procedeu-se à centrifugação (4500 rpm) durante 10 minutos e posteriormente o sobrenadante foi colocado na célula do espectrofotómetro e lido nas absorvâncias de 665 nm e 750 nm.

Os valores obtidos correspondem à clorofila mais feopigmentos, daí no passo seguinte se ter adicionado ácido clorídrico (1 mL, 1N) para serem lidas apenas as absorvâncias dos feopigmentos. Os valores de clorofila e feopigmentos foram calculados com base nas equações 3 e 4,

$$\text{Chl } a \ (\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) = \frac{26.7 \times (aa - ad) \times V}{L \times p} \quad (3)$$

$$\text{Feopigmentos} \ (\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) = \frac{26.7 \times (1.7 \times ad - aa) \times V}{L \times p} \quad (4)$$

*aa* - absorvância corrigida a 750 nm antes (*a*) da acidificação.

*ad* - absorvância a 750 nm depois (*d*) da acidificação.

*V* - volume de acetona adicionado (mL).

*L* - volume de amostra filtrado (L)

*p* - espessura da célula do espectrofotómetro (cm).

### 2.5.2.3. Sólidos em Suspensão

O processo laboratorial para o tratamento de SS consiste no método gravimétrico onde um determinado volume de amostra é filtrado num filtro de poro 0,45 μm (APHA, 2002)

Depois do processo descrito acima, na secção 2.5.1.2, estes filtros foram secos numa estufa entre 103 °C e 105 °C até o peso ser constante. Após 1 hora no exsiccador foram

pesados para se determinar o teor em sólidos totais pela diferença entre o peso final e o peso inicial do filtro. Para se obter a concentração de sólidos em suspensão totais utilizou-se a expressão 5,

$$\text{Sólidos em Suspensão (mgL}^{-1}\text{)} = \frac{(P_{\text{final}} - P_{\text{inicial}})}{V_{\text{filtrado}}} \times 10^3 \quad (5)$$

Para se determinar a concentração da fração volátil (orgânica) e fixa (inorgânica) de sólidos em suspensão totais, os filtros foram queimados numa mufla durante 4h a 450°C, e depois de arrefecidos no exsiccador foram novamente pesados e a diferença entre o peso antes e depois da combustão na mufla permite calcular a fração orgânica enquanto a fração inorgânica corresponde ao seu inverso. Assim, utilizaram-se as equações 6 e 7,

$$\text{Sólidos em Suspensão Voláteis (mgL}^{-1}\text{)} = \frac{(P_{\text{final}} - P_{\text{mufla}})}{V_{\text{filtrado}}} \times 10^3 \quad (6)$$

$$\text{Sólidos em Suspensão Fixos (mgL}^{-1}\text{)} = \frac{(P_{\text{mufla}} - P_{\text{inicial}})}{V_{\text{filtrado}}} \times 10^3 \quad (7)$$

$P_{\text{final}}$  - peso depois do filtro seco na estufa a 105 °C (g).

$P_{\text{mufla}}$  – peso depois do filtro queimado na mufla a 450 °C (g).

$P_{\text{inicial}}$  - peso antes da filtração (g).

$V_{\text{filtrado}}$  - volume filtrado (L).

#### 2.5.2.4. Nutrientes

A concentração dos nutrientes foi determinada por métodos espectrofotométricos de absorção molecular, baseados na construção de retas de calibração, onde os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) foram escolhidos de acordo com o espectro de absorção máxima específico para cada um dos nutrientes. Para a elaboração das retas de calibração foram preparadas soluções padrão para cada um dos nutrientes, de forma a abranger a concentração esperada das amostras. Os métodos utilizados foram os descritos por Grasshoff *et al.* (1983), para amostras de água do mar recolhidas horariamente, tendo sido analisados três replicados de 5 mL para cada nutriente.

Para determinação da concentração de nutrientes utilizou-se a equação 8,

$$\text{Concentração de nutrientes} = \frac{\text{abs} - a}{b} \quad (8)$$

abs – absorvância da amostra.

a – ordenada na origem.

b – declive da reta de calibração.

O coeficiente de correlação para cada reta foi sempre superior a 0.99.

#### **2.5.2.4.1. Amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)**

A determinação da concentração de amónia foi realizada em meio de citrato alcalino com fenol na presença de nitroprussiato de sódio, que atua como catalisador. Seguidamente foi determinada a concentração do composto azul de indofenol, formado na presença de amónia, por espectrofotometria de absorção molecular a 630 nm.

#### **2.5.2.4.2. Nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)**

A determinação dos nitritos é baseada no método de Shinn (1941), adaptado por Bendshneider & Robinson (1952) para a água do mar. A concentração foi determinada através da formação de um composto de azoto após adição de sulfanilamida e de bicloreto de N- (1-naftil) – etilenodiamina. A absorvância da solução final é determinada por espectrofotometria de absorção molecular a 540 nm.

#### **2.5.2.4.3. Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

O método de determinação de nitratos na água do mar baseia-se na redução destes a nitritos, através da sua passagem por uma coluna de cádmio que é oxidado a Cd<sup>2+</sup>, a qual foi tratada previamente com sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub>) para garantir as condições necessárias a esta reação de oxidação-redução. Após o processo de redução, faz-se uma análise semelhante à utilizada para a determinação dos nitritos na água do mar. Determinado o teor de nitritos na amostra, a concentração de nitratos foi calculada pela diferença entre estes e os nitritos.

#### 2.5.2.4.4. Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

A concentração de fosfatos foi determinada em meio ácido ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) contendo molibdato ( $\text{Mo}^{6+}$ ), ácido ascórbico (reduzidor) e o ião antimônio ( $\text{Sb}^{3+}$ ) como catalisador, dando origem ao ácido fosfomolibdico, o qual é reduzido a azul de molibdênio pela ação do ácido ascórbico. Esta reação é acelerada com a adição de um catalisador, o antimoniltartarato de potássio. Finalmente, a concentração deste composto corado foi medida através de espectrofotometria de absorção molecular a 880 nm.

#### 2.5.2.4.5. Silicatos ( $\text{SiO}_4^{4-}$ )

As amostras foram tratadas com uma solução de molibdato de amônio em condições ácidas para que ocorresse a formação de ácido silico-molibdico (cor amarela) e complexos de fósforo e arsênio. De seguida, foi adicionada uma solução redutora (com ácido ascórbico e ácido oxálico), reduzindo os complexos amarelos do ácido silico-molibdico e decompondo-o também em alguns complexos de fósforo e arsênio. A solução final, que possui uma cor azul mais intensa, é colocada no espectrofotómetro e a partir da absorvância (810 nm) foi determinada a concentração de silicatos na amostra.

A absorvância da amónia e dos silicatos em água salgada sofre uma diminuição pela presença de sais, sendo necessário corrigir os resultados obtidos por um fator salino (valor tabelado), correspondente ao valor da salinidade para a água do mar ( $S=35-36$ ; 1,09 para a amónia e 1,15 para os silicatos).

### 2.6. Cálculo das razões molares entre nutrientes: azoto:fósforo e azoto:silica

A proporção relativa de carbono (C), azoto (N), fósforo (P) e silício (Si) presente na água e no plâncton é quase constante (Johnson, 2010; Frigstad *et al.*, 2011). As variações nas proporções molares de N, P e Si têm implicações muito significativas para os grupos de fitoplâncton que irão prosperar nos ambientes estuarinos e costeiros (Statham, 2012). Redfield (1963) estabeleceu uma razão, a qual estabelece a proporção atómica em que a matéria inorgânica é assimilada pelos produtores primários, traduzida por 106C:16N:1P. Segundo

Bethoux *et al.* (2002), as alterações nesta proporcionalidade pode estar relacionado com as alterações na entrada de nutrientes e no ciclo marinho da matéria orgânica.

A razão molar de N:P deve ser numa proporção de 16:1, é utilizada para inferir qual o nutriente que é provavelmente limitante para a produtividade fitoplanctónica. Quando esta proporção é inferior a 16:1 indica-nos que o N é limitante e quando superior a 16:1 que o P é limitante (Davidson *et al.*, 2012). A razão N:P pode ter implicações na sucessão de espécies (Statham, 2012).

A sílica é assimilada numa proporção semelhante à do azoto, sendo considerada a razão N:Si aproximadamente de 1 (Turner, 2002; Statham, 2012) quando esta razão é superior a 1 o crescimento de diatomáceas fica comprometido (Ounissi *et al.*, 2014) sendo substituídas por dinoflagelados e microflagelados (Davidson *et al.*, 2012). A sílica é um nutriente essencial e potencialmente limitante pondo em causa a competição efetiva das diatomáceas com outras espécies (Statham, 2012), uma vez que a razão de N:Si determina que grupo de fitoplâncton que é dominante (Davidson *et al.*, 2012).

As razões elementares referidas podem ser usadas como forma de identificar particularidades na dinâmica e funcionamento do ecossistema marinho, e nos processos biogeoquímicos, tais como variações temporais relacionadas com o fornecimento de nutrientes à superfície (Bethoux *et al.*, 2002; Johnson, 2010). Sendo assim, a análise das razões N:P e N:Si permite determinar quais os nutrientes que poderão limitar as comunidades fitoplanctónicas (Kaiser *et al.*, 2011; Davidson *et al.*, 2012).

## **2.7.Cálculo do índice trófico (TRIX)**

O índice trófico TRIX (Vollenweider *et al.*, 1998) é a combinação de quatro variáveis de estado que expressam a produtividade, desvio absoluto da saturação de oxigénio, clorofila *a*, concentração de azoto e fósforo, com o objetivo de caracterizar o estado trófico das águas marinhas costeiras e em lagoas costeiras. O índice TRIX foi calculado para a Barra Faro-Olhão e seus canais adjacentes de acordo com a equação 9,

$$TRIX = \frac{[\log_{10}(Chl\ a \times a\%DO \times DIN \times DIP) + (1,5)]}{1,2} \quad (9)$$

Chl *a* – concentração de clorofila *a* (mg.m<sup>-3</sup>).

a%DO – desvio absoluto da saturação de oxigénio (%).

DIN – azoto inorgânico dissolvido (mg.m<sup>-3</sup>).

DIP – fósforo inorgânico dissolvido (mg.m<sup>-3</sup>).

A classificação das águas marinhas costeiras usando o TRIX foi feita através de valores limiaries propostos por Penna *et al.* (2004), em que o índice é dimensionado numa escala de 0-10 (Tabela 1) (Sin *et al.*, 2013).

**Tabela 2.1** – Classificação do estado trófico e estado de qualidade para águas costeiras

| TRIX   | Estado Trófico | Estado de Qualidade |
|--------|----------------|---------------------|
| <4     | Oligotrófico   | Alto                |
| [4-5[  | Mesotrófico    | Bom                 |
| [5-6[  | Eutrófico      | Moderado            |
| [6-10] | Hipertrófico   | Pobre               |

## 2.8. Análise Estatística

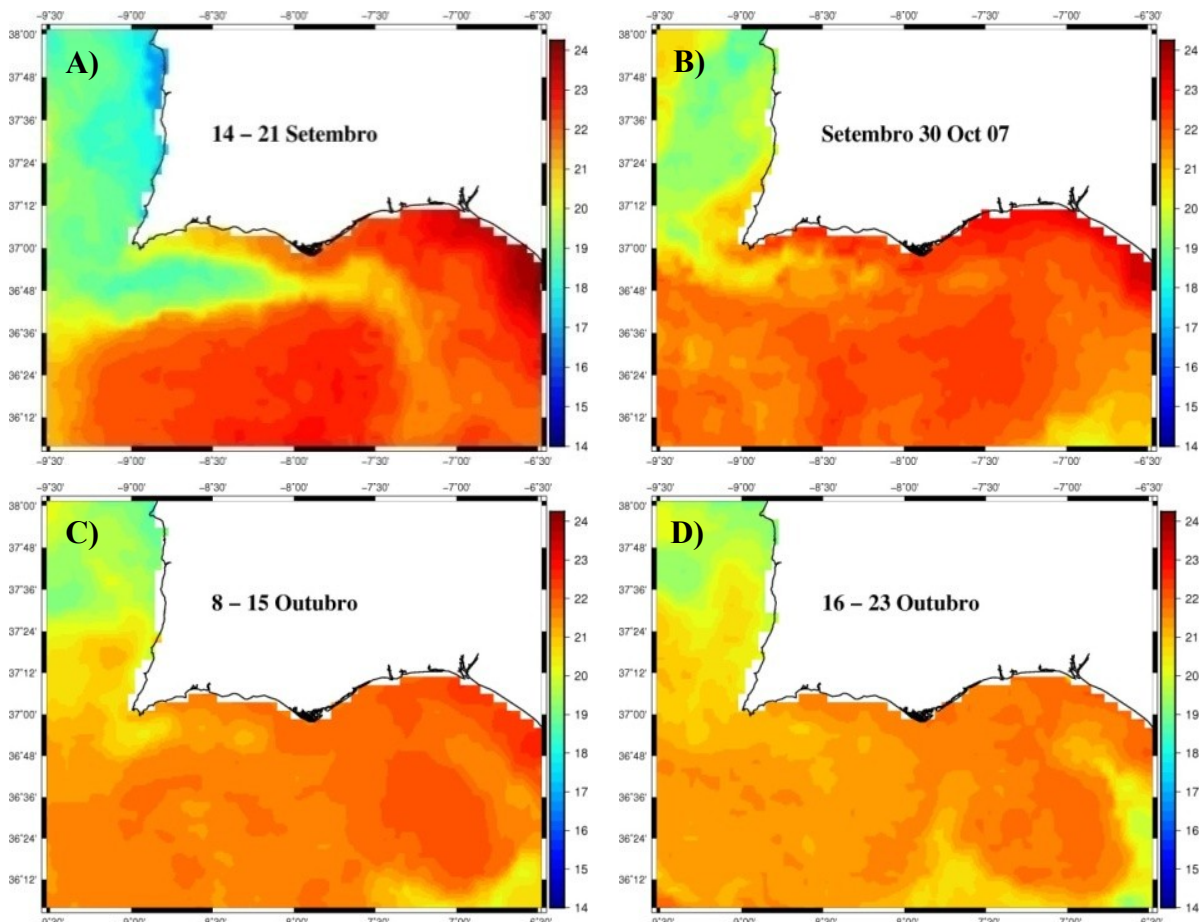
Antes da análise estatística dos vários parâmetros analisados, os dados foram testados quanto à normalidade e homogeneidade de variâncias. Quando as variáveis apresentaram distribuição normal e variâncias homogêneas foram usados testes paramétricos. Caso contrário, aplicaram-se testes não paramétricos. No caso dos testes paramétricos, usou-se testes-T emparelhados (para avaliar diferenças entre canais) e teste ANOVA seguidos de um teste de comparação *post-hoc* Tukey de pares múltiplos em caso de haver diferenças significativas entre profundidades, entre a barra e os canais, entre campanhas e entre situações de maré. Para os parâmetros não paramétricos, usou-se alternativamente o teste de Wilcoxon

e teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Mann-Whitney, respetivamente. O valor do intervalo de confiança mínimo considerado foi de 95%. Efetuou-se ainda análise de correlação usando o coeficiente de Spearman para cada uma das campanhas, para testar o grau de associação entre as variáveis, usado para um nível de confiança de 95%. Este foi o teste escolhido uma vez que nem todas as variáveis apresentaram distribuição normal. Por fim aplicou-se uma análise de componentes principais (ACP) para ajudar a explicar a variabilidade temporal e espacial e a associação entre variáveis ao conjunto global dos resultados comuns a todos os parâmetros. Esta análise foi realizada utilizando o *software* STATISTICA versão 13.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Caracterização oceanográfica das campanhas de outono, através da análise do vento, temperatura superficial do mar e elevação do nível do mar

No período de 2011, as campanhas de outono iniciaram-se na última semana de novembro. Este atraso deveu-se à ocorrência de um período bastante prolongado de água quente, típica de verão em todo o Golfo de Cádiz, até meados de outubro (22-23 °C), como se pode confirmar nas imagens semanais de satélite da temperatura superficial do mar de 14 setembro a 23 de outubro (Figura 3.1). Posteriormente entre a 3.ª semana de outubro e novembro, ocorreram dois períodos de chuva e vento fortes, um de temporal que levou ao encerramento das barras da Ria Formosa a 26-27 de outubro e outro entre 18 e 20 de novembro, em que ocorreu precipitação forte, tendo chovido 60 mm em apenas 72 h.

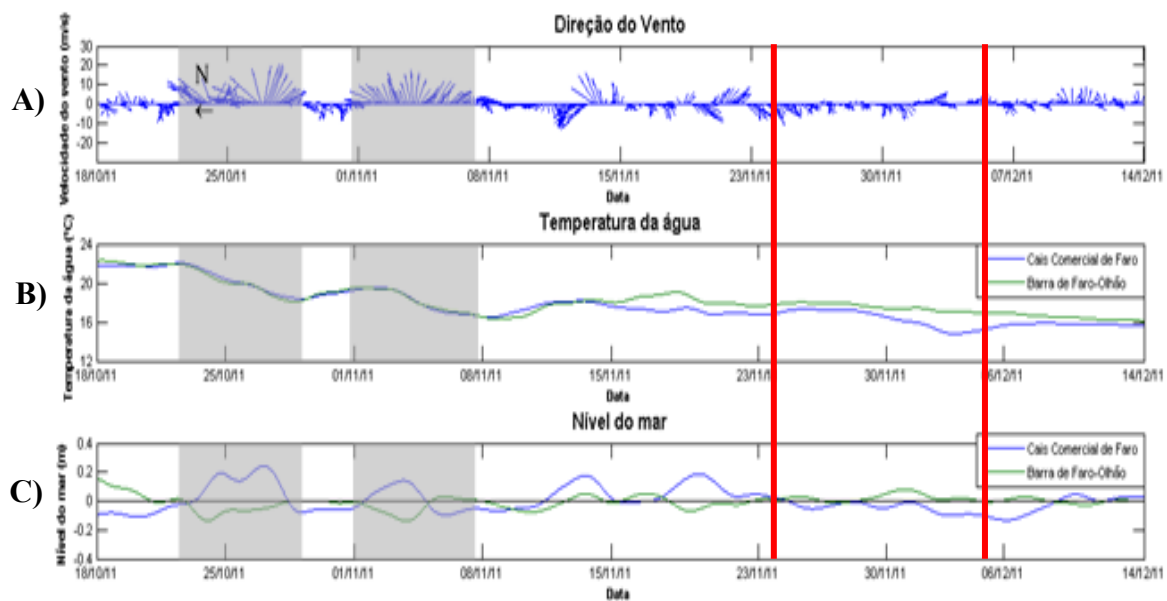


**Figura 3.1-** Imagens de satélite da temperatura superficial do mar, compósitas de 7 dias delimitadas pela área 36°-38°N, 7°-10°W, por um período que antecedeu as campanhas: A) 14-21 de setembro de 2011, B) 30 de setembro-7 de outubro de 2011, C) 8-15 outubro de 2011 e D) 16-23 de outubro de 2011. Fonte: OceanColor, NASA.

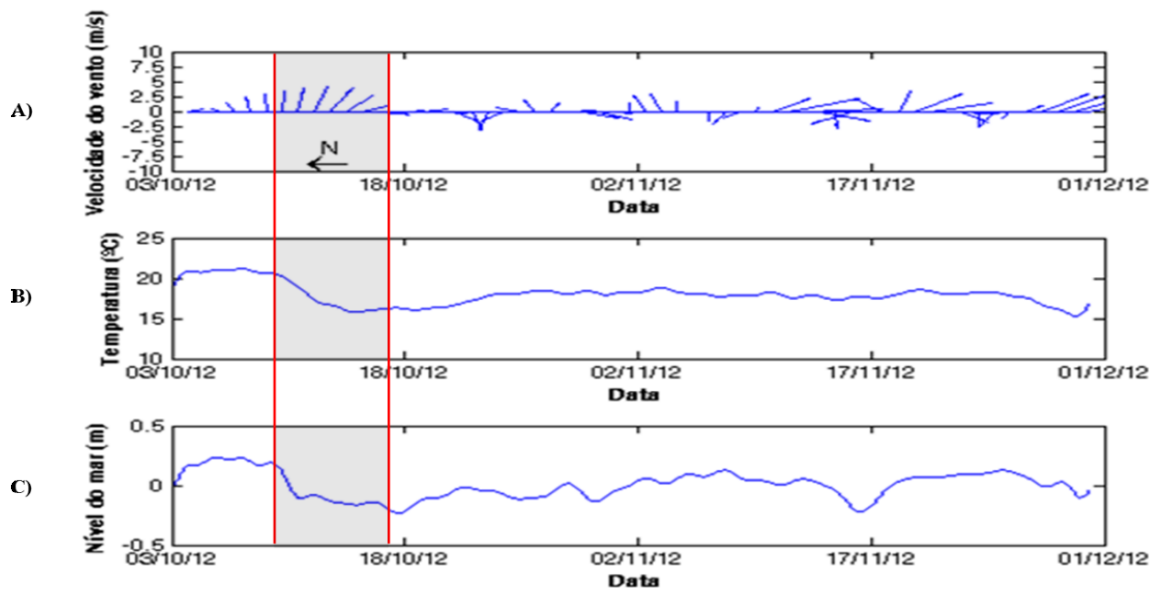


De forma a melhor entender a variabilidade dos resultados obtidos nas campanhas realizadas em 2011 e 2012 foram também analisados dados de vento registados pela estação meteorológica do aeroporto de Faro, e de temperatura superficial e nível médio do mar registados por dois transdutores de pressão (PT's) colocados em locais distintos do Canal de Faro, na Barra de Faro-Olhão no cais da ilha Deserta e no cais comercial de Faro, 6 km a montante da Barra de Faro-Olhão, bem como imagens de satélite semanais de temperatura superficial do mar (e de clorofila *a*).

A velocidade do vento (direção e intensidade), a temperatura da água e o nível do mar registados nos PT's para os períodos que englobam as quatro campanhas realizadas, entre 18 de outubro e 14 de dezembro de 2011 e entre 3 de outubro e 1 de dezembro de 2012 estão mostrados nas Figuras 3.2 e 3.3, respetivamente.



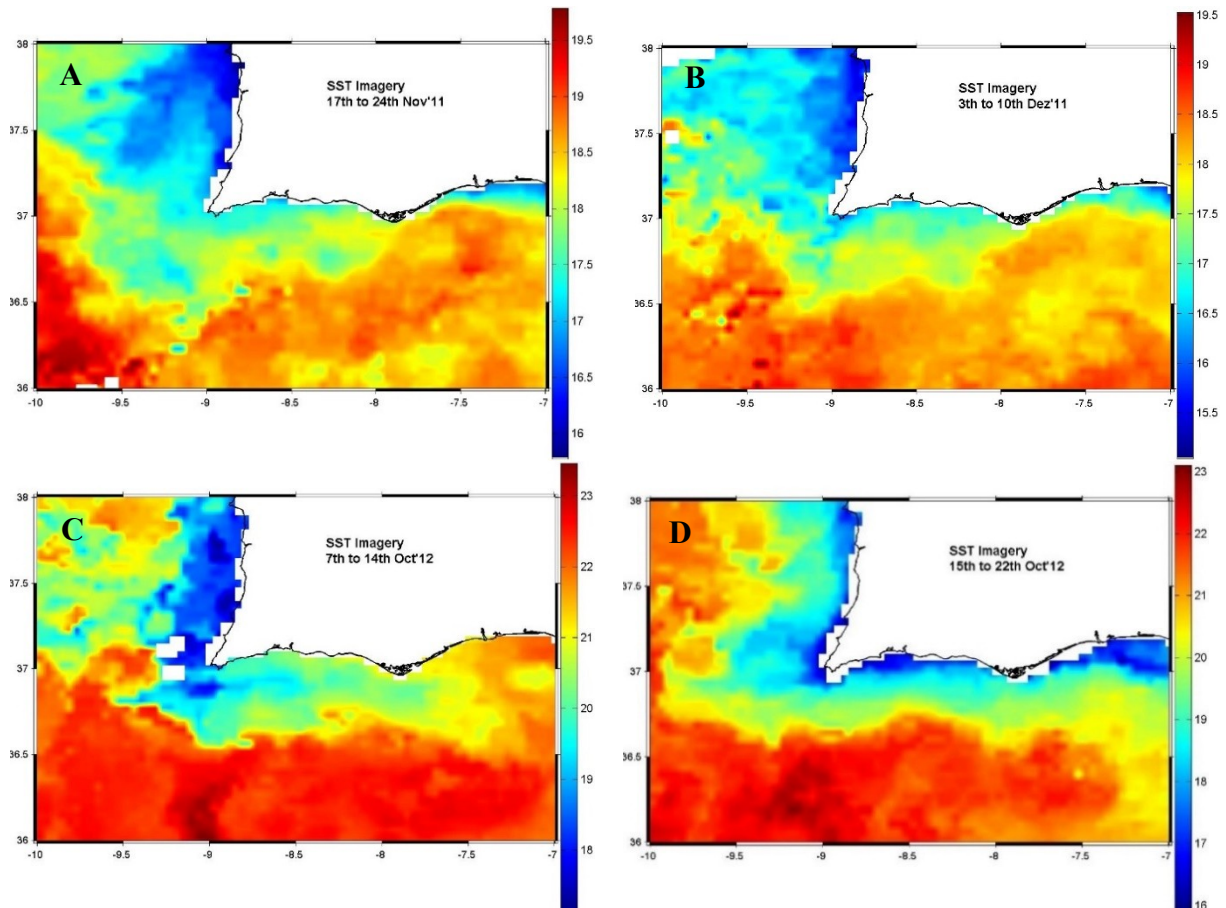
**Figura 3.2** – (A) Intensidade e direção do vento (m/s) no aeroporto de Faro, (B) Temperatura da água (°C) e (C) Nível médio do mar (m) na barra Faro-Olhão, no cais da ilha Deserta e no cais comercial de Faro, entre 18 de outubro e 14 de dezembro de 2011. Nota: os eixos para os vetores de vara são rodados  $-90^\circ$  a partir do Norte para corresponderem a ventos de Oeste. As linhas vermelhas representam os dias das campanhas (24 de novembro e 5 de dezembro de 2011), respetivamente. As manchas cinzentas identificam a ocorrência de afloramento costeiro.



**Figura 3.3** - (A) Intensidade e direção do vento (m/s) no aeroporto de Faro, (B) Temperatura da água (°C) e (C) Nível médio do mar (m) na barra Faro-Olhão, no cais da ilha Deserta, entre 3 de Outubro e 1 de Dezembro de 2012. Nota: os eixos para os vetores de vara são rodados  $-90^\circ$  a partir do Norte para corresponderem a ventos de Oeste. As linhas vermelhas representam os dias das campanhas (9 de Outubro e 16 de Outubro de 2012), respetivamente. As manchas cinzentas identificam a ocorrência de afloramento costeiro.

A 1.<sup>a</sup> campanha de outono, realizada em condições de maré viva (24 de novembro de 2011) foi precedida por um período de duas semanas em que houve relaxamento do vento, com intensidade fraca  $\leq 10$  m/s e de direção variável, alternando entre oeste e este (Figura 3.2A). No período anterior, de 22 a 29 outubro (marcado a cinzento), a direção do vento foi predominantemente de oeste, favorável à ocorrência de afloramento costeiro na costa sul de Portugal, tendo ocorrido uma descida de  $5^\circ\text{C}$  na temperatura da água, de  $23^\circ\text{C}$  para  $18^\circ\text{C}$  (Figura 3.2B) e diminuição do nível do mar na Barra Faro-Olhão (Figura 3.2C). Após 2-3 dias, no início de novembro, voltou a ocorrer vento favorável a afloramento costeiro durante mais uma semana (marcado a cinzento na Figura 3.2A) e a temperatura da água voltou a descer, para valores de  $\sim 17^\circ\text{C}$  (Figura 3.2B). Foi também detetado pelo PT mais interior, localizado no cais comercial de Faro, 6 km a montante da BFO, a diminuição mais acentuada da temperatura da água do que perto da BFO (Figura 3.2C), em consequência da coluna de água ser mais baixa e ser influenciada mais facilmente pelo arrefecimento atmosférico.

Durante a campanha de maré morta (5 de dezembro de 2011), o vento foi predominantemente de este e com uma intensidade mais fraca, de aproximadamente 5 m/s, assistindo-se à diminuição gradual da temperatura da água ( $< 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) que seguiu o ciclo estacional anual, mas que não esteve associado a ventos favoráveis ao afloramento costeiro. As imagens de satélite semanais de temperatura superficial do mar que englobam o período das campanhas (Figura 3.4) confirmam a descida da temperatura entre campanhas, em particular junto da costa, tal como registada nos PT's (Figura 3.2B).



**Figura 3.4** - Imagens de satélite da temperatura superficial do mar, compósitas de 7 dias delimitadas pela área  $36^{\circ}$ - $38^{\circ}\text{N}$ ,  $7^{\circ}$ - $10^{\circ}\text{W}$ , por um período que inclui as campanhas: A) 17-24 de novembro de 2011, B) 3-10 de dezembro de 2011, C) 7-14 outubro de 2012 e D) 15-22 de outubro de 2012. Fonte: OceanColor, NASA.

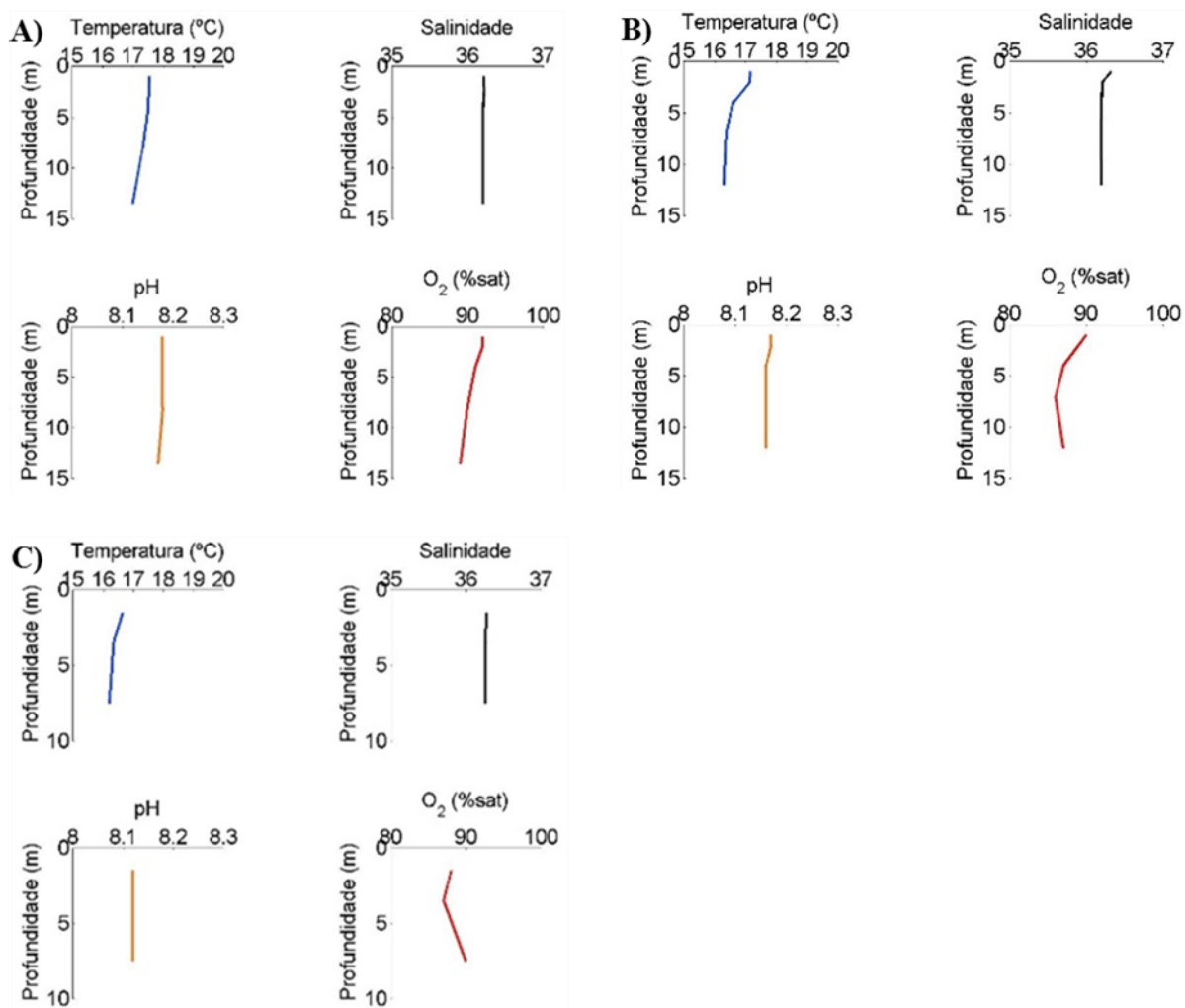
Relativamente às duas campanhas realizadas em 2012, o vento foi de intensidade mais fraca ( $< 5\text{ m/s}$ ) mas mais regular do que o registado na 1.<sup>a</sup> campanha do ano anterior (Figura 3.3A). Verificou-se ainda que na semana anterior às campanhas de amostragem o vento foi persistente e de oeste, não ocorreu relaxamento de vento, contrariamente ao que ocorreu antes da 1.<sup>a</sup> campanha do ano anterior (Figura 3.2A). Após a 1.<sup>a</sup> campanha de 2012, a intensidade do vento intensificou-se e manteve a direção de oeste, levando a que na 2.<sup>a</sup> campanha (16 de

outubro), ocorresse afloramento costeiro, levando à diminuição acentuada de 5 °C de temperatura da água, de 21-22 °C para 16-17 °C (Figura 3.3B) e diminuição do nível da água (Figura 3.3C). Este processo foi confirmado pelo arrefecimento particularmente junto da costa, visível nas imagens de satélite semanais de temperatura superficial do mar (Figura 3.4). Em resumo as imagens de satélite semanais que cobrem o período das amostragens permitiram verificar que o arrefecimento da água foi particularmente visível junto da costa, na zona sul de Portugal, na semana 17-24 novembro de 2011 e 15-22 de outubro de 2012, que englobam a 1.<sup>a</sup> e 4.<sup>a</sup> campanhas, respetivamente.

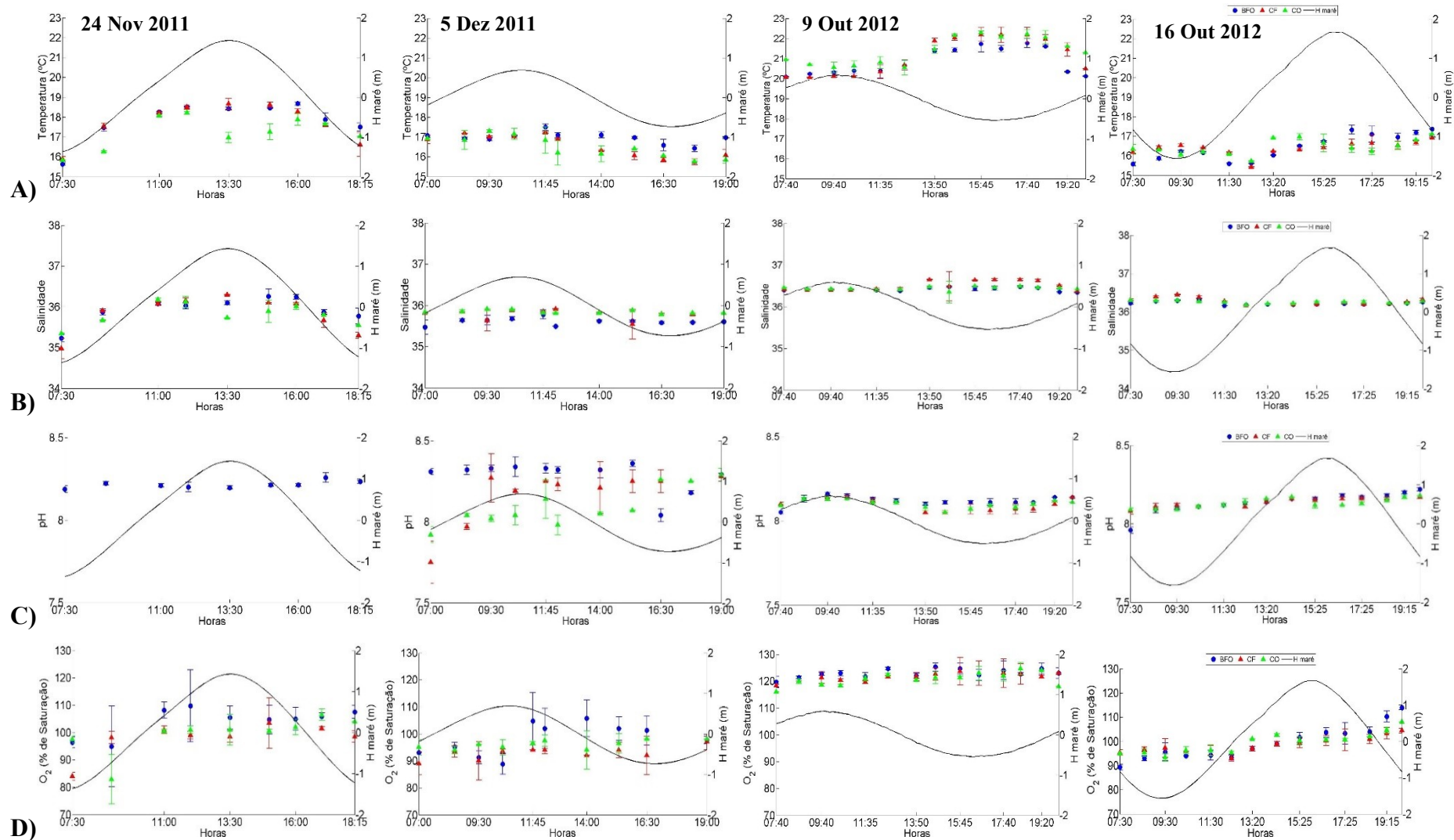
### **3.2. Variabilidade temporal, espacial e mareal dos parâmetros medidos *in situ* na barra faro-olhão, e nos canais de faro e olhão, em situação de outono**

Os valores dos parâmetros físico-químicos medidos *in situ*, temperatura, salinidade, pH, oxigénio dissolvido e percentagem de saturação de oxigénio dissolvido em condições de outono, ao longo de ciclos de maré completos, nas situações de maré-viva e maré morta, na Barra Faro-Olhão (BFO), no Canal de Faro (CF) e no Canal de Olhão (CO) estão representados graficamente na Figura 3.6.

Foi feita uma análise estatística aos valores obtidos nos vários níveis de profundidade selecionados para cada um dos três locais amostrados. Esta análise revelou que não existem diferenças significativas entre profundidades ( $p > 0,05$ ) para qualquer um dos três locais. A título de exemplo estão representados os perfis verticais da temperatura, salinidade, pH e percentagem de saturação (Figura 3.5), no dia 16 de novembro de 2012, às 16:30, que correspondeu à situação de preia-mar (máxima profundidade de coluna de água), onde se pode verificar que a coluna de água é bem misturada/homogénea. Em consequência, só se representaram graficamente os valores médios  $\pm$  desvio padrão de temperatura, salinidade, pH, oxigénio dissolvido e percentagem de saturação de oxigénio (registados em novembro e dezembro de 2011 e outubro de 2012) estão presentes na Figura 3.6.



**Figura 3.5-** Perfil vertical da temperatura (°C), salinidade, pH e oxigénio dissolvido (% saturação) para A) BFO, B) CF e C) CO às 16:30 horas na campanha de 16 de outubro de 2012.



**Figura 3.6-** Variabilidade dos valores de A) Temperatura (°C), B) Salinidade, C) pH, D) Oxigênio (% de saturação) e a altura da maré (H maré, m) ao longo dos quatro ciclos completos de maré em BFO, CF e CO, no outono de 2011 e 2012, em maré viva e maré morta.

A temperatura da água nas quatro campanhas (Figura 3.6A) exibiu variabilidade, com valores extremos medidos em 2012, mínimos na 2.<sup>a</sup> campanha (15-17 °C) e máximos na 1.<sup>a</sup> (20-22 °C). Nas campanhas de 2011, não ocorreu uma variação da temperatura do mar tão evidente entre as campanhas de novembro para dezembro. Os valores foram mais próximos, variando entre 16-18 °C, no entanto foram significativamente mais baixos ( $p < 0,05$ ) em dezembro. Tal facto, como observado nas imagens de satélite (Figura 3.4A-B) e registado nos PT's (Figura 3.2) não se deveu a afloramento costeiro mas sim à descida progressiva da temperatura devido à transição para o inverno. Já entre as duas campanhas de 2012, a diminuição acentuada ( $p < 0,05$ ) pode associar-se ao fenómeno de afloramento costeiro, pelo forçamento de vento, como observado nas imagens de satélite de temperatura superficial do mar e registado nos PT's (Figuras 3.4C-D e 3.3, respetivamente). Os valores entre os três locais amostrados: BFO, CF e CO foram semelhantes entre si ( $p > 0,05$ ), exceto na campanha de dezembro em que a temperatura da água de CO foi inferior à de BFO ( $p < 0,05$ ). Tal deveu-se à profundidade mais baixa deste canal particularmente numa altura em que a temperatura atmosférica também foi mais baixa, havendo um maior arrefecimento por transferência de calor. Quanto à situação de maré, em 2011 verificou-se que a água foi significativamente mais fria em maré morta ( $p < 0,05$ ) enquanto em 2012, o foi em maré viva ( $p < 0,05$ ). Ao longo de cada ciclo de maré, os valores variaram mais com hora do dia do que com a altura da maré, tendo sido mais elevados entre o meio-dia e o meio da tarde, enquanto os valores mais baixos observaram-se ao início da manhã ou a meio/final da tarde, coincidindo com o período de vazante. Neste período a profundidade era menor, havendo um maior arrefecimento por perda de calor para a atmosfera onde a temperatura era mais baixa.

A salinidade da água (Figura 3.6B) apresentou valores entre 35 e 36,8. Os valores foram relativamente constantes ao longo das campanhas mas registaram-se diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre estas. Os valores foram mínimos na 2.<sup>a</sup> campanha de 2011, por influência de episódios de precipitação que ocorreram neste período e máximos na 1.<sup>a</sup> campanha de 2012. Os valores foram semelhantes entre a barra e os canais ( $p > 0,05$ ) em maré-viva e mais elevados em CF em maré-morta ( $p < 0,05$ ). Entre os ciclos semidiurnos quinzenais de 2011 e 2012 registaram-se situações opostas. Em 2011, os valores foram mais elevados em maré viva ( $p < 0,05$ ) do que em maré morta, enquanto nas campanhas de 2012, ocorreu o contrário ( $p < 0,05$ ). Ao longo de cada ciclo de maré, os valores mais baixos registaram-se ao início da manhã e os mais altos a meio do dia, coincidente com o aumento da temperatura, que pode conduzir a uma maior taxa de evaporação, exceto na última amostragem de maré-

viva. Este padrão de variação parece seguir também um padrão de variação inverso à altura da maré.

O pH da água (Figura 3.6C) apresentou valores ligeiramente alcalinos, e semelhantes, à volta de 8. Nos dois anos sucessivos, os valores foram semelhantes nas duas campanhas consecutivas ( $p>0,05$ ), mas verificou-se que ocorreu uma diminuição ( $p<0,05$ ) de 2011 para 2012. Os valores também foram semelhantes nos três locais, apesar dos extremos terem sido medidos em CF e CO. À semelhança da temperatura, o pH aumentou ligeiramente ao longo do ciclo de maré, mais do que com a altura da maré. Os valores mais elevados foram obtidos entre o meio-dia e o meio da tarde, ou até mesmo ao final do dia, ao passo que, os valores mais baixos foram medidos ao início da manhã. Nesta altura do dia, a taxa de respiração é superior à taxa de fotossíntese, a qual faz baixar ligeiramente o pH.

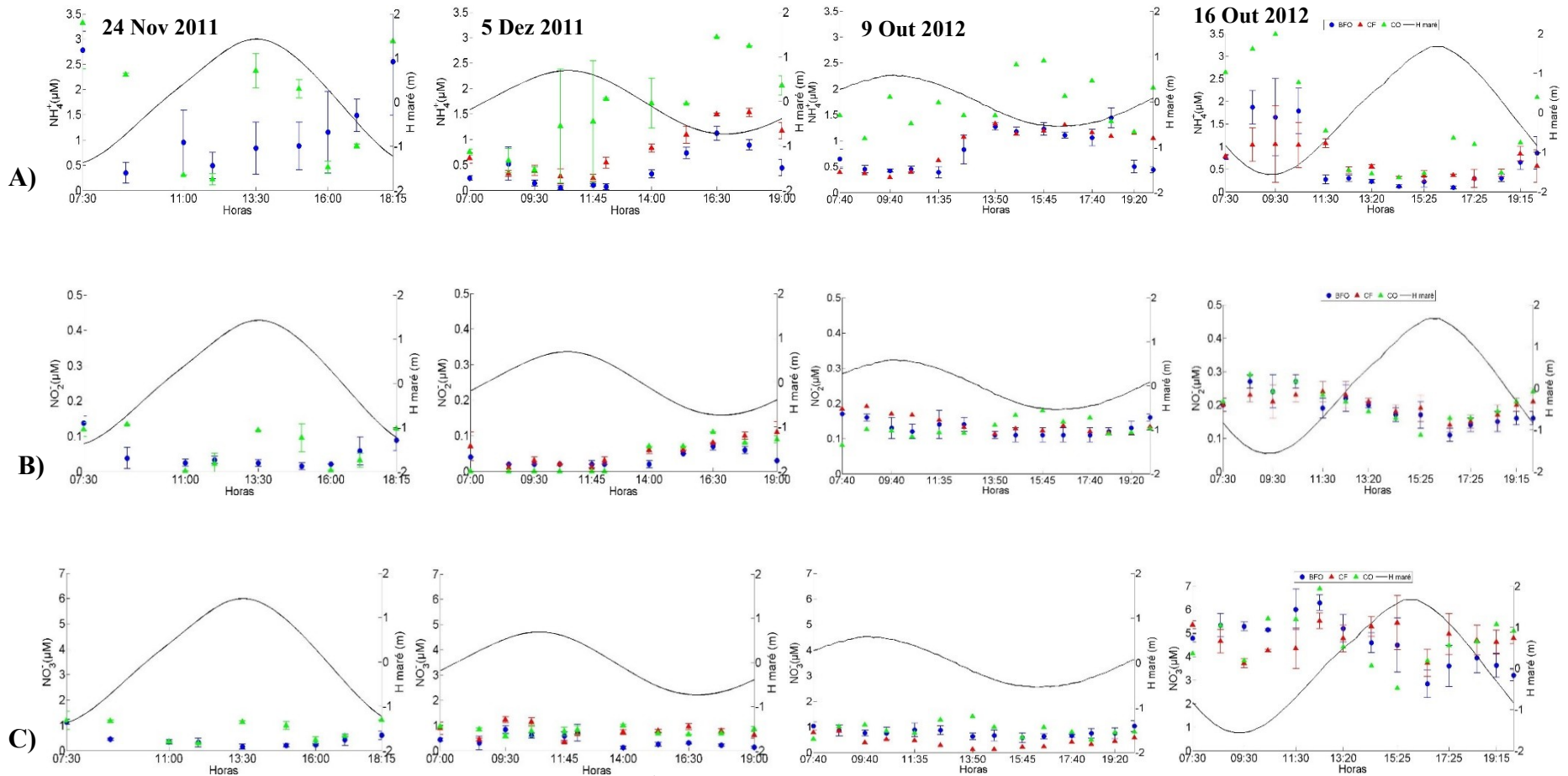
A gama de concentração de oxigénio dissolvido variou entre 6,5 e 9,0 mg/L nas quatro campanhas, valores típicos de águas oxigenadas, seguindo o mesmo padrão de variação da temperatura e do pH, com os valores a aumentar ao longo do dia. A percentagem de saturação de oxigénio segue o padrão de variação do oxigénio dissolvido. É um parâmetro mais interessante pois proporciona informação sobre o grau de oxigenação da água, tendo sido escolhido para ser representado graficamente (Figura 3.6D). A percentagem de saturação revela se o meio está em equilíbrio (100 %), supersaturado ( $> 100$  %), ou subsaturado ( $< 100$  %).

A percentagem de saturação de oxigénio foi relativamente elevada, tendo-se medido valores de supersaturação e máximos na 1.<sup>a</sup> campanha de 2012 (116-125 %) ( $p<0,05$ ). Em 2011 a diferença entre campanhas não foi tão acentuada, apesar de significativa, com valores mais baixos em dezembro (89-106%) ( $p<0,05$ ). Houve semelhança entre os três locais amostrados ( $p> 0,05$ ) apesar de na amostragem de dezembro os valores terem sido mais baixos em CF do que em BFO ( $p<0,05$ ). Quanto às diferenças entre marés, em 2011 a percentagem de oxigenação da água foi mais elevada em maré-viva do que em maré-morta ( $p<0,05$ ), enquanto em 2012 se verificou o contrário ( $p<0,05$ ). Ao longo do ciclo de maré os valores variaram mais com a hora do dia do que com a altura da maré, tal como a temperatura e o pH, tendo-se registado os valores mais elevados entre o meio-dia e o meio da tarde, coincidindo com período de vazante, e os valores mais baixos ao início da manhã.

Conjugando todos estes fatores, pode-se afirmar que as campanhas em maré-viva estiveram sob influência de afloramento costeiro, de forma mais evidente na campanha de 16 de outubro de 2012, que se refletiu numa diminuição de temperatura, salinidade, pH e oxigénio dissolvido. A intensidade do afloramento costeiro em ambas as situações foi



diferente, uma vez que a campanha de 24 de novembro de 2011 decorreu duas semanas após o afloramento costeiro enquanto a campanha de 16 de outubro de 2012 coincidiu com um período de afloramento costeiro, daí se ter observado condições diferentes em ambas as campanhas.



**Figura 3.7** – Variabilidade da concentração de A) amónia ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\mu\text{M}$ ), B) nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\mu\text{M}$ ), C) nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\mu\text{M}$ ) e a altura da maré (H maré, m) ao longo de quatro ciclos completos de maré em BFO, CF e CO realizado em condições de outono de 2011 e 2012, em maré viva e maré morta.

### 3.3. Variabilidade temporal, espacial e mareal da concentração de nutrientes, sólidos em suspensão e clorofila a e feopigmentos

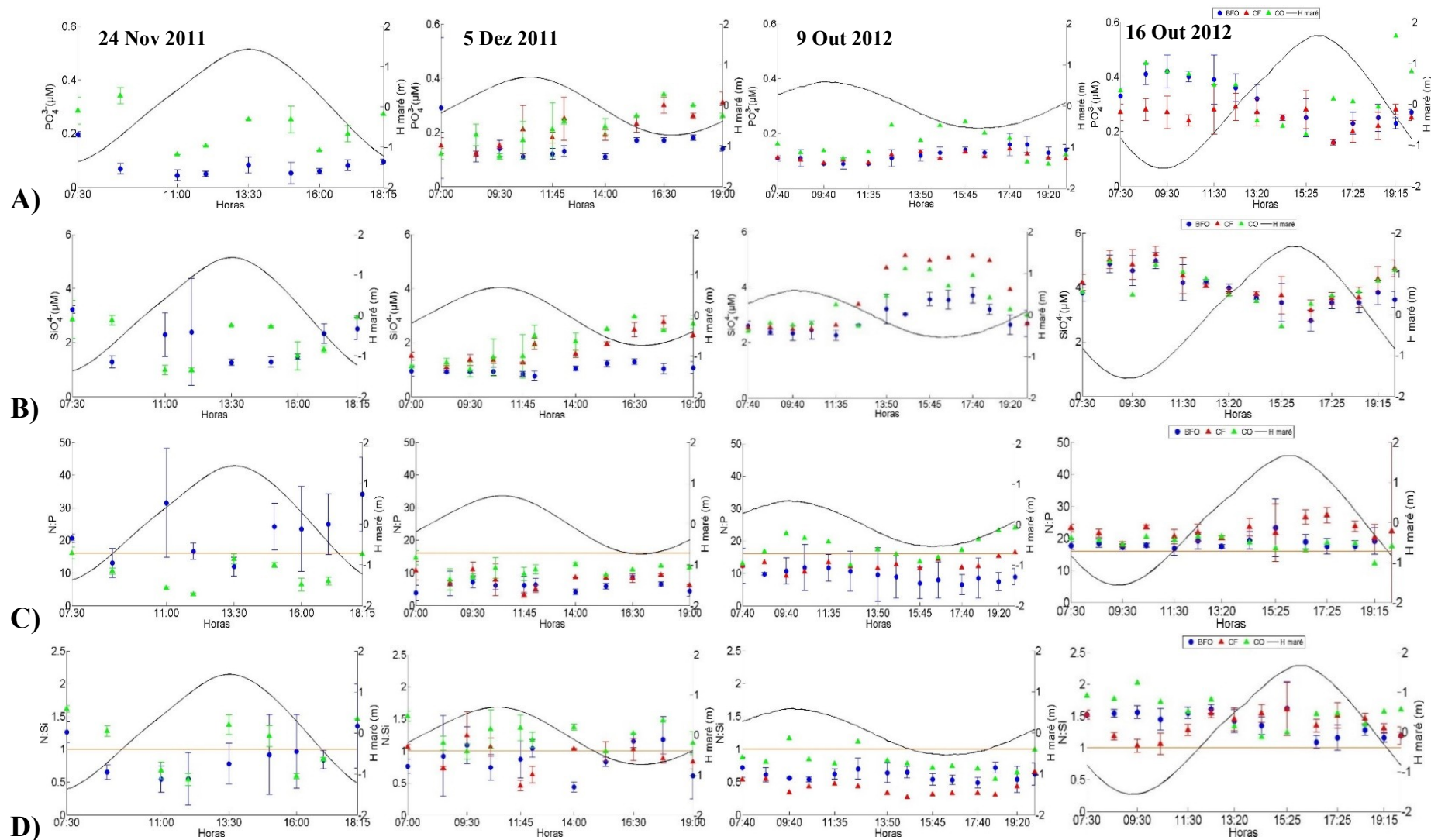
Globalmente para todos os nutrientes, as concentrações medidas em BFO e nos canais adjacentes foram baixas como na zona costeira adjacente à Ria Formosa. Dos compostos de azoto, amónia, nitritos e nitratos, este último nutriente por ser termodinamicamente o mais estável em meios oxigenados apresentou as concentrações mais elevadas (2,7-6,9  $\mu\text{M}$ ), seguindo-se a amónia (0,1-3,5  $\mu\text{M}$ ) e por fim, os nitritos (0,1-0,3  $\mu\text{M}$ ).

A amónia (Figura 3.7A), nitritos (Figura 3.7B) e nitratos (Figura 3.7C) apresentaram concentrações mais elevadas na 2.<sup>a</sup> campanha de outubro de 2012 e mais baixas na 1.<sup>a</sup> campanha desse ano. Todos estes nutrientes apresentaram uma variabilidade maior no ano de 2012 do que em 2011. Ao longo do ciclo de maré, globalmente, os nutrientes apresentaram um padrão de variação em antifase com a altura da maré, particularmente em condição de maré-viva. Assim, as concentrações mais elevadas coincidiram com o período de vazante e as mais baixas com o período de enchente.

As concentrações de amónia apresentaram maior variabilidade do que os nitritos e nitratos mas não se registaram diferenças significativas nem entre as campanhas para cada um dos anos nem entre marés ( $p > 0,05$ ). Quanto aos locais, CO apresentou concentrações mais elevadas do que CF e BFO, à exceção da 1.<sup>a</sup> campanha. No CO, a amónia representou uma fração importante dos nutrientes de azoto (~60% para o azoto inorgânico total), exceto na última campanha, altura em que ocorreu um aumento substancial de nitratos (Figura 3.7C).

Os nitritos mantiveram-se baixos (< 0,1  $\mu\text{M}$ ) e semelhantes nas duas campanhas de 2011 ( $p > 0,05$ ), tendo-se registado um aumento significativo ( $p < 0,05$ ) em 2012 e em particular na última campanha, quando se atingiram valores ~0,3  $\mu\text{M}$ . Entre os três locais, os valores foram semelhantes ( $p > 0,05$ ).

Os nitratos também foram baixos e semelhantes nas duas campanhas de 2011, ocorrendo tal como os nitritos, um aumento substancial ( $p < 0,05$ ), na última campanha de 2012, como referido anteriormente. Quanto aos locais, à exceção da última campanha, onde não se registaram diferenças ( $p > 0,05$ ), as concentrações em CO foram superiores ( $p < 0,05$ ) às de BFO ou CF. Em relação à maré, verificou-se que em maré-viva houve um aumento acentuado de 2011 para 2012 ( $p < 0,05$ ), que não foi acompanhado em maré-morta.



**Figura 3.8** - Variabilidade da concentração de A) fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\mu\text{M}$ ), B) silicatos ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ,  $\mu\text{M}$ ), C) razão N:P ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\mu\text{M}$ ), D) razão N:Si e a altura da maré (H maré, m), a linha laranja representa as razões de Redfield N:P=16 e N:Si=1, ao longo de quatro ciclos completos de maré em BFO, CF e CO realizado em condições de outono de 2011 e 2012, em maré viva e maré morta.

Os fosfatos (Figura 3.8A) variaram numa gama de concentração  $\leq 0,5 \mu\text{M}$  e, tal como os nutrientes de azoto, também foram mais elevados na 2.<sup>a</sup> campanha de 2012 (0,2-0,5  $\mu\text{M}$ ). Em 2011, as concentrações foram similares (nd-0,3  $\mu\text{M}$ ) ( $p > 0,05$ ). Entre os três locais, verificou-se que as concentrações foram consistentemente superiores no CO ( $p < 0,05$ ). À semelhança dos nutrientes de azoto, a variabilidade deste nutriente entre marés em 2011 não foi significativa ( $p > 0,05$ ), enquanto em 2012 foi maior em maré-viva do que em maré-morta ( $p < 0,05$ ). As concentrações ao longo do ciclo de maré variaram em antifase com a altura de maré, de forma mais evidente na maré-viva de 2012.

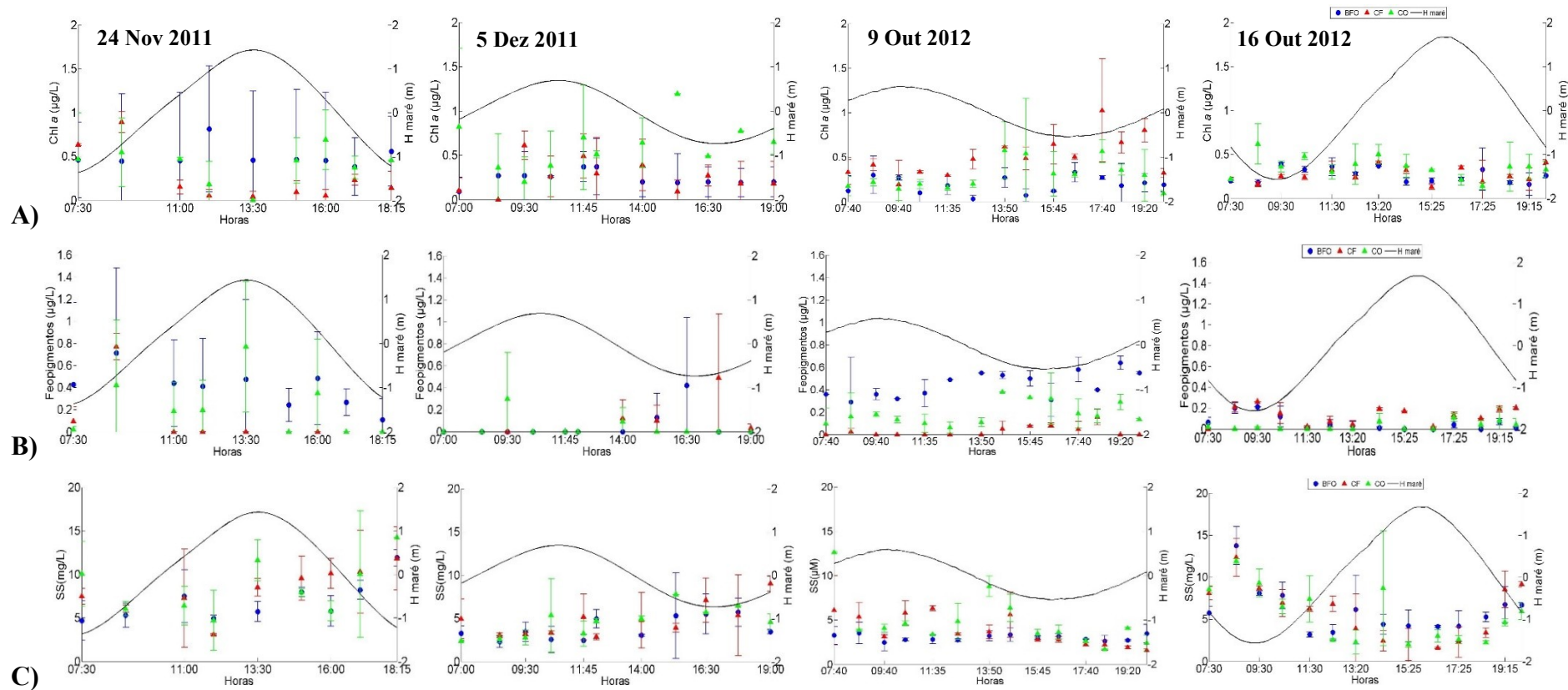
Os silicatos (Figura 3.8B), apresentaram concentrações  $< 6 \mu\text{M}$  e também como os nutrientes anteriores, foram mais elevados na 2.<sup>a</sup> campanha de 2012 (2,6-5,2  $\mu\text{M}$ ) ( $p < 0,05$ ), mas semelhantes entre si em 2011 ( $p > 0,05$ ). Entre os dois anos verificou-se um aumento global de 2011 para 2012 ( $p < 0,05$ ). Este nutriente só apresentou concentrações significativamente diferentes entre os locais amostrados em maré-morta ( $p < 0,05$ ). Em dezembro 2011, os valores foram mais elevados em CO do que BFO e CF e na 1.<sup>a</sup> campanha de outubro 2012 foram maiores em CF do que em BFO. Também para este nutriente, a variação da sua concentração teve um comportamento em antifase com a altura de maré. No período de vazante as concentrações foram mais elevadas, enquanto as concentrações mais baixas foram registadas em período de enchente, exceto na 1.<sup>a</sup> campanha.

Os dados para os cinco nutrientes mostram claramente que na última campanha, em maré-viva e sob influência de afloramento costeiro ocorreu um aumento substancial das concentrações dos mesmos. Alterações nas razões entre as concentrações dos nutrientes implicam mudanças na taxa de consumo dos mesmos por parte do fitoplâncton e as razões N:P e N:Si podem revelar qual o nutriente limitante na coluna de água para qualquer um dos locais amostrados. As razões foram determinadas, de acordo com a razão Redfield; N:P=16 e N:Si=1. Para a concentração de azoto contabilizaram-se as concentrações molares de amónia, nitrito e nitrato, para as concentrações de fósforo consideraram-se as concentrações de fosfatos e para o silício as de silicatos.

A razão N:P (Figura 3.8C) apresenta diferenças entre campanhas ( $p < 0,05$ ), tendo sido globalmente mais elevada na 2.<sup>a</sup> campanha de 2012, quando se atingiu valores de N:P  $> 16$ . Este facto demonstra a importância do efeito do afloramento costeiro identificado nesta altura, na fertilização principalmente em nitratos. Em novembro de 2011 determinaram-se também valores maiores em BFO do que em CO ( $p < 0,05$ ). Já em dezembro, a razão diminuiu e os três locais tiveram um comportamento semelhante, com ocorrência de limitação de azoto, pois a razão N:P foi  $< 16$ . No entanto, a razão foi maior em CO do que em BFO. Na 1.<sup>a</sup> campanha de

2012, também em maré-morta, BFO e CF encontram-se limitados por azoto, enquanto CO revelou limitação de fósforo (razão N:P > 16), e assim razões maiores do que nos outros dois locais ( $p < 0,05$ ). Ao longo dos ciclos de maré nas quatro campanhas, a razão N:P variou de forma pouco evidente com a altura da maré, mas as razões foram mais elevadas em maré-viva do que em maré-morta ( $p < 0,05$ ). Assim, para os locais amostrados, globalmente em maré-viva houve limitação de fósforo, ao contrário de maré-morta, em que houve limitação de azoto.

A razão de N:Si (Figura 3.8D), tal como a razão de N:P foi mais elevada na 2.<sup>a</sup> campanha de 2012 (1-2;  $p < 0,05$ ), revelando o silício como o elemento limitante nos três locais de amostragem. Os dados para as quatro campanhas permitem inferir que, à exceção desta campanha, o azoto foi predominantemente o elemento limitante, apesar de a razão ser variável. É de referir que em 2011 não houve diferenças significativas entre as duas campanhas ( $p > 0,05$ ). Na 1.<sup>a</sup> campanha de 2012, parece ter ocorrido um enriquecimento de silicatos já que genericamente a razão N:Si foi <1 para os três locais. Entre locais houve diferenças significativas ( $p < 0,05$ ), em que CO registou razões superiores, à exceção da 1.<sup>a</sup> campanha.

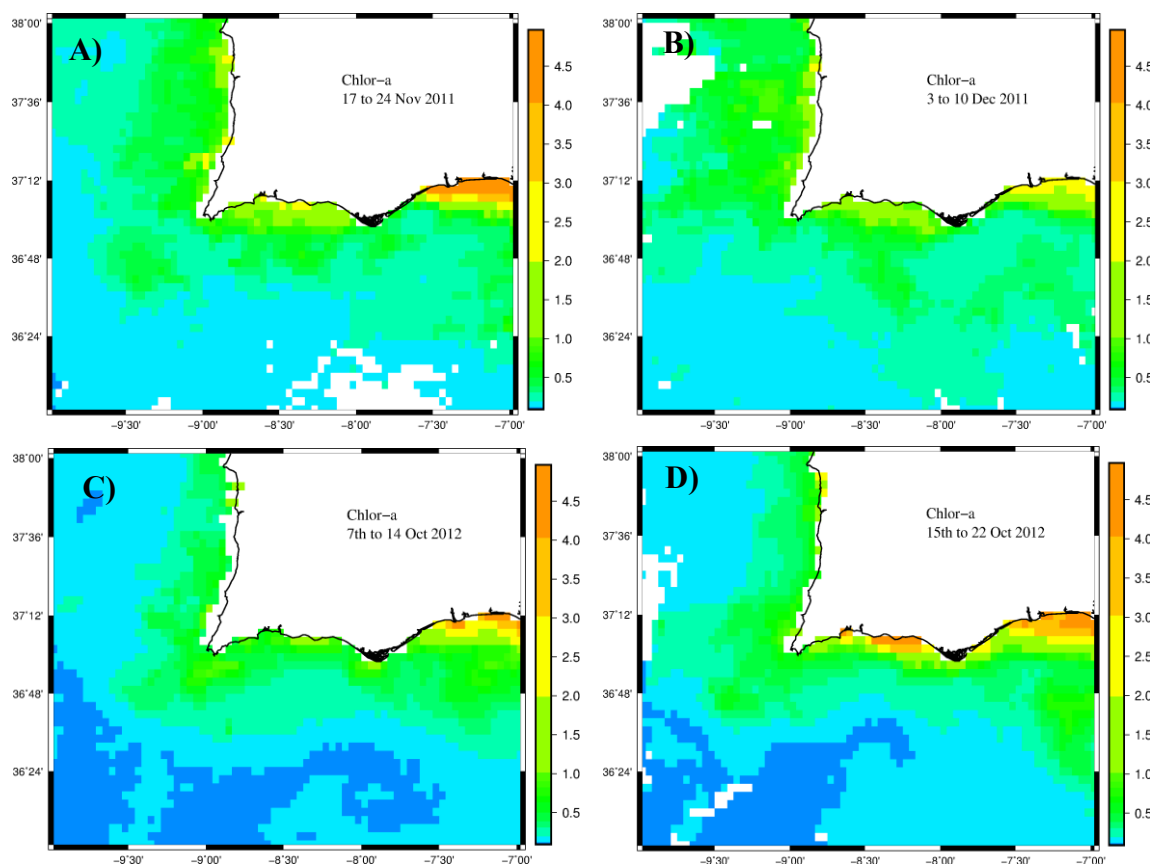


**Figura 3.9** - Variabilidade da concentração de A) clorofila *a* (Chl *a*, µg/L), B) Feopigmentos (Feop, µg/L), C) sólidos em suspensão (SS, mg/L) e a altura da maré (H maré, m) ao longo de quatro ciclos completos de maré em BFO, CF e CO realizado em condições de outono de 2011 e 2012, em maré viva e maré morta.

Nas quatro campanhas de outono (Figura 3.9A) a clorofila *a* não apresentou valores superiores a 1,5 µg/L. Apesar de ter sido, em geral, mais elevada na 1.<sup>a</sup> campanha de 2011 esta não foi significativamente diferente da 2.<sup>a</sup> campanha do mesmo ano ( $p>0,05$ ). Em 2012, as concentrações foram semelhantes às de 2011 e verificou-se uma ligeira diminuição da 1.<sup>a</sup> para a 2.<sup>a</sup> campanha, mas que não foi significativa ( $p>0,05$ ). Entre locais verificou-se que os canais tiveram concentrações maiores do que BFO ( $p<0,05$ ), exceto na 1.<sup>a</sup> campanha de 2011. Em relação à situação de maré, apesar dos valores serem ligeiramente mais elevados em maré-morta, não houve diferença em relação à maré-viva ( $p>0,05$ ). Quanto à variação dos dados ao longo dos ciclos de maré, as concentrações variaram não só com a altura da maré mas também com a hora do dia em que foi realizada a amostragem. Tal como o oxigénio, as concentrações mais elevadas foram obtidas a meio do dia, e os valores mais baixos ao início da manhã ou no final da tarde se coincidente com o período da vazante.

Para se tentar perceber de que forma os processos físicos que ocorreram na zona costeira adjacente à Ria Formosa, no período que englobou as campanhas, afetaram o desenvolvimento do fitoplâncton, também se analisaram imagens de satélite de clorofila *a*, compósitas de uma semana. Estas imagens (Figura 3.10 A-D), confirmam a ocorrência de afloramento na costa oeste e sul de Portugal, particularmente pelo aumento da clorofila *a* junto à costa (~1 µg/L) na semana 17-24 novembro de 2011 e 15-22 de outubro de 2012, que englobam a 1.<sup>a</sup> e 4.<sup>a</sup> campanhas, respetivamente. É de referir que o período em que a concentração na costa foi mais elevada foi de 15 a 22 de outubro de 2012, que inclui um período de 6 dias após a última amostragem, altura em que o vento já tinha relaxado (Figura 3.3).





**Figura 3.10-** Imagens de satélite da clorofila *a*, compósitas de 7 dias delimitadas pela área 36°-38°N, 7°-10°W, por um período que antecede e inclui as campanhas: A) 17-24 de Novembro de 2011, B) 3-10 de Dezembro de 2011, C) 7-14 Outubro de 2012 e D) 15-22 de Outubro de 2012. Fonte: OceanColor, NASA.

Os feopigmentos (Figura 3.9B) foram bastante variáveis entre campanhas e entre os locais amostrados, mas pareceram seguir o padrão de distribuição de clorofila *a*, apesar de registarem concentrações mais baixas. Em ambos os anos, verificou-se uma diminuição da 1.<sup>a</sup> para a 2.<sup>a</sup> campanha. Entre locais, CF registou as concentrações mais baixas ( $p < 0,05$ ) exceto na última amostragem, onde foram significativamente maiores ( $p < 0,05$ ). É de salientar que na 1.<sup>a</sup> amostragem os valores em BFO foram máximos. Quanto à situação de maré, não houve um padrão consistente de variação em maré-viva e maré-morta. Em maré-viva diminuiu de 2011 para 2012 e houve um aumento em maré-morta de 2011 para 2012. Ao longo dos ciclos de maré, os valores mais elevados parecem ter ocorrido durante o período da tarde, apesar de também variarem em função da altura da maré.

De forma a avaliar o estado das populações fitoplanctónicas, calculou-se a razão de clorofila *a*/total de pigmentos (soma de clorofila *a* ativa + feopigmentos). Se a razão for superior a 50% a população pode considerar-se jovem, quando for inferior a 50% pode considerar-se em decaimento ou envelhecida. Analisando a variabilidade entre campanhas

estas apresentaram diferenças ( $p < 0,05$ ), registrando-se em ambos os anos um aumento da 1.<sup>a</sup> para a 2.<sup>a</sup> amostragem, o que sugere que na 1.<sup>a</sup> amostragem de 2011 e 2012, a população se encontrou mais envelhecida do que nas restantes campanhas. As razões entre os locais amostrais foram diferentes ( $p < 0,05$ ), BFO apresentou as razões mais baixas e os canais as razões mais elevadas, exceto na última campanha quando esta percentagem foi mínima em CF. Em relação às marés, e à semelhança dos feopigmentos não houve um padrão consistente de variação em maré-viva e maré-morta. Aumentou de maré-viva para maré-morta em 2011 e aumentou de maré-morta para maré-viva em 2012.

Quanto à concentração de matéria particulada foram avaliados os sólidos em suspensão totais, e as suas duas frações, os sólidos voláteis/orgânicos e os sólidos fixos/inorgânicos. A concentração dos sólidos em suspensão total está representada graficamente na Figura 3.9C.

Os sólidos em suspensão totais foram, em geral,  $< 15$  mg/L (Figura 3.9C) e pode verificar-se que tiveram um comportamento diferente dos nutrientes, particularmente dos nitratos (Figura 3.7C), fosfatos (Figura 3.8A) e silicatos (Figura 3.8B). No entanto, as concentrações em maré-viva foram superiores ( $p < 0,05$ ) às de maré-morta. Assim, em 2011 houve uma diminuição da 1.<sup>a</sup> para a 2.<sup>a</sup> campanha enquanto em 2012 houve um aumento da 1.<sup>a</sup> para a 2.<sup>a</sup> campanha. Para este parâmetro, os valores foram semelhantes nos três locais ( $p > 0,05$ ), apesar das concentrações mais elevadas terem sido registadas em CO e as mais baixas em CF e BFO. Ao longo do ciclo de maré, ocorreu alguma variabilidade, mas na última campanha, os valores pareceram variar em antifase com a altura de maré. É importante referir, que das suas frações, a mineral foi sempre superior à fração orgânica e apresentou um padrão de distribuição semelhante aos sólidos em suspensão totais, exceto na 1.<sup>a</sup> campanha de 2012, em maré-morta. A fração inorgânica/mineral variou entre 50-80 % dos sólidos em suspensão totais (média  $\sim 78$  %) enquanto a orgânica/volátil entre 10-40 % (média  $\sim 22$  %) teve um comportamento inverso ao dos sólidos em suspensão totais, exceto também na 1.<sup>a</sup> campanha de 2012, em maré-morta.

### 3.4. Matrizes de correlação

Para uma melhor interpretação do comportamento global dos dados de cada campanha, elaboraram-se matrizes de correlação entre as variáveis estudadas para o conjunto global das três estações amostradas junto da Barra de Faro-Olhão, na Ria Formosa. Os valores assinalados a vermelho nas Tabelas 3.1-3.4 são os que apresentam uma correlação significativa entre variáveis ( $p < 0,05$ ).

Da análise destas matrizes constata-se que o comportamento dos parâmetros analisados nas várias campanhas não foi consistente, nem a intensidade das correlações. As correlações mais fortes foram encontradas na 1.<sup>a</sup> e 4.<sup>a</sup> campanhas, em maré-viva enquanto as mais baixas na 2.<sup>a</sup> campanha, em maré-morta. Dentro da maré-viva, observaram-se mais correlações significativas entre os parâmetros na última campanha.

Na 1.<sup>a</sup> campanha de maré-viva, em 2011, registaram-se fortes correlações diretas entre os nutrientes, que indica a mesma fonte para os nutrientes; entre a clorofila *a* e os feopigmentos, que indica que estes variam na mesma proporção; e entre os sólidos em suspensão e o pH, amónia, % clorofila *a*/total de pigmentos e a fração mineral destes ( $p < 0,05$ ), que pode sugerir que estes sólidos em suspensão corresponderam às maiores percentagens de população fitoplanctónica ativa, que respondeu à maior disponibilidade de amónia e que se reflete num aumento de pH. Em relação a correlações inversas estas foram encontradas entre os nutrientes e a salinidade e temperatura ( $p < 0,05$ ), o que mostra que as maiores concentrações foram encontradas em baixa-mar, ao início da manhã e no final do dia quando a temperatura e a salinidade foram mais baixas; e entre o oxigénio dissolvido e a fração orgânica dos sólidos em suspensão, o que demonstra que esta matéria orgânica foi mais elevada ao início do dia quando o oxigénio foi mais baixo, por a taxa de respiração ser maior.

**Tabela 3.1** - Matriz de correlação entre temperatura (°C), salinidade, pH, O<sub>2</sub>, saturação em O<sub>2</sub>, amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), azoto inorgânico total (NIT), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>), razão entre azoto e fosfatos (N:P), razão entre azoto e silicatos (N:Si), clorofila *a* (Chl *a* ativa), feopigmentos (Feop), razão clorofila *a* ativa/total pigmentos (Chl *a*:TP), sólidos em suspensão (SS), fração orgânica dos sólidos (SSFO) e fração mineral dos sólidos (SSFM) da campanha de 24 de novembro de 2011.

|                                | T (°C) | S     | pH    | O <sub>2</sub> | % Sat | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NIT   | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> | N:P   | N:Si  | Chl <i>a</i> | Feop  | Chl <i>a</i> :TP | SS    | SSFO  | SSFM |
|--------------------------------|--------|-------|-------|----------------|-------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|--------------|-------|------------------|-------|-------|------|
| T (°C)                         | 1      |       |       |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| S                              | 0,90   | 1     |       |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| pH                             | -0,05  | -0,04 | 1     |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| O <sub>2</sub>                 | 0,16   | 0,01  | 0,30  | 1              |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| % Sat                          | 0,54   | 0,34  | 0,00  | 0,79           | 1     |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | -0,65  | -0,76 | 0,30  | 0,22           | -0,12 | 1                            |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | -0,81  | -0,90 | 0,22  | 0,00           | -0,35 | 0,81                         | 1                            |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | -0,93  | -0,93 | 0,38  | -0,06          | -0,46 | 0,76                         | 0,86                         | 1                            |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| NIT                            | -0,72  | -0,78 | 0,19  | 0,10           | -0,22 | 0,95                         | 0,81                         | 0,77                         | 1     |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>  | -0,81  | -0,69 | 0,22  | -0,18          | -0,60 | 0,52                         | 0,60                         | 0,78                         | 0,59  | 1                             |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> | -0,72  | -0,85 | 0,10  | 0,18           | -0,17 | 0,90                         | 0,89                         | 0,85                         | 0,87  | 0,56                          | 1                              |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| N:P                            | 0,12   | -0,10 | 0,30  | 0,39           | 0,45  | 0,49                         | 0,24                         | 0,03                         | 0,39  | -0,46                         | 0,36                           | 1     |       |              |       |                  |       |       |      |
| N:Si                           | -0,66  | -0,67 | 0,34  | 0,18           | -0,31 | 0,89                         | 0,69                         | 0,72                         | 0,87  | 0,65                          | 0,73                           | 0,26  | 1     |              |       |                  |       |       |      |
| Chl <i>a</i>                   | -0,28  | -0,23 | -0,23 | 0,12           | 0,01  | 0,06                         | -0,04                        | 0,03                         | 0,00  | -0,08                         | 0,17                           | 0,12  | 0,06  | 1            |       |                  |       |       |      |
| Feop                           | -0,07  | 0,03  | -0,31 | -0,08          | 0,00  | -0,19                        | -0,07                        | -0,30                        | -0,12 | -0,39                         | -0,17                          | 0,16  | -0,24 | 0,43         | 1     |                  |       |       |      |
| Chl <i>a</i> :TP               | 0,05   | -0,08 | 0,21  | 0,10           | -0,02 | 0,28                         | 0,13                         | 0,38                         | 0,22  | 0,34                          | 0,31                           | -0,06 | 0,30  | -0,28        | -0,95 | 1                |       |       |      |
| SS                             | -0,24  | -0,34 | 0,70  | 0,36           | 0,20  | 0,58                         | 0,27                         | 0,46                         | 0,51  | 0,34                          | 0,38                           | 0,31  | 0,64  | -0,26        | -0,47 | 0,47             | 1     |       |      |
| SSFO                           | 0,17   | 0,32  | -0,20 | -0,39          | -0,24 | -0,26                        | -0,03                        | -0,18                        | -0,18 | -0,05                         | -0,29                          | -0,20 | -0,34 | -0,15        | 0,15  | -0,24            | -0,51 | 1     |      |
| SSFM                           | -0,17  | -0,32 | 0,20  | 0,39           | 0,24  | 0,26                         | 0,03                         | 0,18                         | 0,18  | 0,05                          | 0,29                           | 0,20  | 0,34  | 0,15         | -0,15 | 0,24             | 0,51  | -1,00 | 1    |

Na 2.<sup>a</sup> campanha de 2012, em maré-morta, registaram-se menos correlações significativas entre os vários parâmetros, possivelmente associados a uma menor variabilidade dos resultados. Em relação às correlações diretas, estas verificaram-se entre os nutrientes, que indica a mesma fonte para os mesmos; entre os nitratos e a clorofila *a* com a salinidade, que indica que estes variam na mesma proporção; entre a amónia e a clorofila *a*, oxigénio dissolvido, e sólidos em suspensão e fração inorgânica ( $p < 0,05$ ), que pode sugerir que a clorofila *a* respondeu à maior disponibilidade de amónia e que se reflete num aumento de oxigénio, numa altura em que os sólidos foram maioritariamente inorgânicos. Também se verificou que os sólidos em suspensão totais se associaram a silicatos, o que pode revelar que os mesmos resultaram de ressuspensão de material fino, rico em silicatos. Em relação as correlações inversas estas foram encontradas entre os nutrientes e os sólidos em suspensão com a temperatura ( $p < 0,05$ ), o que mostra que as maiores concentrações foram encontradas no período da vazante, coincidente com o final do dia, quando a temperatura foi mais baixa; e entre a salinidade e o pH, o que sugere que a salinidade ligeiramente mais elevada no período da enchente, ao início do dia coincidiu com o período de pH mais baixo, quando a taxa de respiração é maior.

**Tabela 3.2** - Matriz de correlação entre temperatura (°C), salinidade, pH, O<sub>2</sub>, saturação em O<sub>2</sub>, amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), azoto inorgânico total (NIT), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>), razão entre azoto e fosfatos (N:P), razão entre azoto e silicatos (N:Si), clorofila *a* (Chl *a* ativa), feopigmentos (Feop), razão clorofila *a* ativa/total pigmentos (Chl *a*:TP) sólidos em suspensão (SS), fração orgânica dos sólidos (SSFO) e fração mineral dos sólidos (SSFM) da campanha de 5 de dezembro de 2011.

|                                | T (°C) | S     | pH    | O <sub>2</sub> | % Sat | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NIT   | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> | N:P   | N:Si  | Chl <i>a</i> | Feop  | Chl <i>a</i> :TP | SS    | SSFO  | SSFM |
|--------------------------------|--------|-------|-------|----------------|-------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|--------------|-------|------------------|-------|-------|------|
| T (°C)                         | 1      |       |       |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| S                              | 0,07   | 1     |       |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| pH                             | 0,13   | -0,62 | 1     |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| O <sub>2</sub>                 | -0,25  | -0,27 | 0,15  | 1              |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| % Sat                          | 0,02   | -0,22 | 0,20  | 0,90           | 1     |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | -0,83  | 0,18  | -0,38 | 0,44           | 0,21  | 1                            |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | -0,70  | -0,31 | 0,23  | 0,28           | 0,05  | 0,52                         | 1                            |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | -0,34  | 0,35  | -0,35 | -0,45          | -0,47 | 0,27                         | -0,01                        | 1                            |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| NIT                            | -0,81  | 0,25  | -0,37 | 0,21           | 0,01  | 0,91                         | 0,46                         | 0,61                         | 1     |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>  | -0,76  | 0,07  | -0,06 | 0,26           | -0,01 | 0,69                         | 0,63                         | 0,26                         | 0,69  | 1                             |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> | -0,79  | 0,33  | -0,33 | 0,22           | -0,04 | 0,85                         | 0,57                         | 0,44                         | 0,86  | 0,80                          | 1                              |       |       |              |       |                  |       |       |      |
| N:P                            | -0,49  | 0,32  | -0,55 | -0,02          | -0,07 | 0,68                         | 0,13                         | 0,68                         | 0,82  | 0,22                          | 0,55                           | 1     |       |              |       |                  |       |       |      |
| N:Si                           | -0,41  | 0,13  | -0,44 | -0,01          | -0,04 | 0,54                         | 0,03                         | 0,60                         | 0,70  | 0,21                          | 0,31                           | 0,85  | 1     |              |       |                  |       |       |      |
| Chl <i>a</i>                   | -0,18  | 0,38  | -0,14 | 0,04           | 0,13  | 0,36                         | -0,10                        | 0,42                         | 0,48  | 0,17                          | 0,31                           | 0,55  | 0,55  | 1            |       |                  |       |       |      |
| Feop                           | -0,26  | -0,12 | -0,07 | 0,30           | 0,14  | 0,23                         | 0,32                         | -0,11                        | 0,15  | 0,09                          | 0,20                           | 0,09  | -0,06 | -0,33        | 1     |                  |       |       |      |
| Chl <i>a</i> :TP               | 0,13   | 0,04  | 0,19  | -0,22          | -0,06 | -0,15                        | -0,21                        | 0,17                         | -0,05 | 0,02                          | -0,14                          | -0,04 | 0,17  | 0,46         | -0,88 | 1                |       |       |      |
| SS                             | -0,56  | -0,09 | -0,08 | 0,38           | 0,16  | 0,60                         | 0,64                         | 0,00                         | 0,51  | 0,64                          | 0,59                           | 0,18  | 0,20  | 0,03         | 0,26  | -0,16            | 1     |       |      |
| SSFO                           | 0,33   | -0,18 | 0,33  | -0,16          | -0,12 | -0,33                        | -0,36                        | -0,22                        | -0,34 | -0,28                         | -0,39                          | -0,19 | -0,19 | -0,09        | -0,07 | -0,05            | -0,50 | 1     |      |
| SSFM                           | -0,33  | 0,18  | -0,33 | 0,16           | 0,12  | 0,33                         | 0,36                         | 0,22                         | 0,34  | 0,28                          | 0,39                           | 0,19  | 0,19  | 0,09         | 0,07  | 0,05             | 0,50  | -1,00 | 1    |

Na 3.<sup>a</sup> campanha, no ano de 2012, novamente numa situação de maré-morta, a variabilidade ao longo do dia foi, em geral, reduzida, mas registaram-se alterações nas correlações registadas no ano anterior. É de salientar que nesta campanha as condições foram características de final de verão, sem registo de chuva e com temperaturas na ordem dos 20-22 °C. Encontraram-se correlações diretas ( $p < 0,05$ ) entre si nos nutrientes, que indica a mesma fonte para os mesmos; entre os nutrientes (exceto nitratos e nitritos) e a temperatura, assim como entre a fração orgânica dos sólidos em suspensão e a temperatura, a % de saturação de oxigénio dissolvido, amónia e silicatos; entre amónia, silicatos e clorofila *a* com a salinidade, o que revela que as concentrações mais elevadas observadas em baixa-mar foram coincidentes com o período da tarde, altura em que a temperatura e a salinidade foram máximas, entre pH e oxigénio dissolvido também mais elevados a meio tarde próximo da baixa-mar, assim como a clorofila *a*. Em relação a correlações inversas ( $p < 0,05$ ) estas foram encontradas entre nitratos e nitritos com a salinidade e temperatura; clorofila *a* com os nitratos; pH com os nutrientes (exceto nitratos e nitritos); amónia, fosfatos e silicatos, com oxigénio dissolvido e pH; e entre os sólidos em suspensão e a % de saturação de oxigénio dissolvido, o que demonstra que o material particulado foi mais baixo a meio da tarde, coincidente com a baixa-mar, altura que o oxigénio dissolvido foi mais elevado por aumento da atividade fotossintética.

**Tabela 3.3-** - Matriz de correlação entre temperatura (°C), salinidade, pH, O<sub>2</sub>, saturação em O<sub>2</sub>, amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), azoto inorgânico total (NIT), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>), razão entre azoto e fosfatos (N:P), razão entre azoto e silicatos (N:Si), clorofila *a* (Chl *a* ativa), feopigmentos (Feop), razão clorofila *a* ativa/total pigmentos (Chl *a*:TP), sólidos em suspensão (SS), fração orgânica dos sólidos (SSFO) e fração mineral dos sólidos (SSFM) da campanha de 9 de outubro de 2012.

|                                | T (°C) | S     | pH    | O <sub>2</sub> | % Sat | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NIT   | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> | N:P   | N:Si  | Chl <i>a</i> | Feop  | Chl <i>a</i> :TP | SS    | SSFO  | SSFM |  |
|--------------------------------|--------|-------|-------|----------------|-------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|--------------|-------|------------------|-------|-------|------|--|
| T (°C)                         | 1      |       |       |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| S                              | 0,76   | 1     |       |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| pH                             | -0,70  | -0,63 | 1     |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| O <sub>2</sub>                 | -0,48  | -0,51 | 0,63  | 1              |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| % Sat                          | 0,38   | 0,18  | 0,03  | 0,58           | 1     |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | 0,71   | 0,45  | -0,54 | -0,61          | -0,05 | 1                            |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | -0,34  | -0,44 | 0,08  | 0,02           | -0,29 | -0,34                        | 1                            |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | -0,36  | -0,50 | 0,28  | 0,08           | -0,26 | 0,07                         | 0,26                         | 1                            |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| NIT                            | 0,50   | 0,20  | -0,35 | -0,46          | -0,11 | 0,87                         | -0,24                        | 0,46                         | 1     |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>  | 0,53   | 0,29  | -0,49 | -0,42          | 0,02  | 0,68                         | -0,16                        | 0,19                         | 0,69  | 1                             |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> | 0,89   | 0,70  | -0,75 | -0,47          | 0,33  | 0,56                         | -0,23                        | -0,43                        | 0,34  | 0,48                          | 1                              |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| N:P                            | 0,18   | 0,10  | -0,19 | -0,54          | -0,42 | 0,49                         | 0,08                         | 0,24                         | 0,49  | -0,02                         | 0,16                           | 1     |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| N:Si                           | -0,11  | -0,31 | 0,13  | -0,17          | -0,35 | 0,49                         | -0,03                        | 0,78                         | 0,77  | 0,37                          | -0,30                          | 0,45  | 1     |              |       |                  |       |       |      |  |
| Chl <i>a</i>                   | 0,44   | 0,49  | -0,51 | -0,41          | 0,03  | 0,08                         | 0,12                         | -0,44                        | -0,13 | 0,10                          | 0,61                           | 0,17  | -0,52 | 1            |       |                  |       |       |      |  |
| Feop                           | 0,12   | -0,13 | 0,11  | 0,31           | 0,44  | 0,09                         | -0,15                        | 0,42                         | 0,30  | 0,24                          | -0,04                          | -0,38 | 0,32  | -0,49        | 1     |                  |       |       |      |  |
| Chl <i>a</i> :TP               | 0,02   | 0,20  | -0,21 | -0,35          | -0,34 | -0,08                        | 0,18                         | -0,48                        | -0,30 | -0,15                         | 0,20                           | 0,31  | -0,42 | 0,72         | -0,93 | 1                |       |       |      |  |
| SS                             | -0,23  | -0,17 | -0,06 | -0,31          | -0,54 | 0,06                         | 0,20                         | 0,30                         | 0,10  | 0,16                          | -0,19                          | 0,18  | 0,27  | -0,01        | -0,20 | 0,20             | 1     |       |      |  |
| SSFO                           | 0,43   | 0,15  | -0,31 | -0,02          | 0,37  | 0,42                         | -0,02                        | -0,21                        | 0,25  | 0,30                          | 0,49                           | 0,06  | -0,01 | 0,18         | 0,07  | 0,02             | -0,26 | 1     |      |  |
| SSFM                           | -0,43  | -0,15 | 0,31  | 0,02           | -0,37 | -0,42                        | 0,02                         | 0,21                         | -0,25 | -0,30                         | -0,49                          | -0,06 | 0,01  | -0,18        | -0,07 | -0,02            | 0,26  | -1,00 | 1    |  |

Na 4.<sup>a</sup> e última campanha, em 2012, de novo em maré-viva, registaram-se alterações nas correlações registadas na semana anterior. É de referir que nesta campanha houve alterações das condições meteorológicas e oceanográficas, por forçamento do vento de oeste, favorável ao afloramento costeiro que provocou uma descida acentuada da temperatura da água, como referido na secção 3.3B. Durante este ciclo de maré, a variabilidade ao longo do dia foi evidente. Registaram-se correlações diretas entre si nos nutrientes (à exceção dos nitratos) que indica a mesma fonte para os mesmos; entre a amónia, nitritos e silicatos com a salinidade, pois as maiores concentrações destes nutrientes foram encontradas em baixa-mar, ao início da manhã quando a salinidade foi mais elevada. O pH também se correlacionou diretamente com o oxigénio dissolvido, % de saturação de oxigénio dissolvido e temperatura, pois os valores mais baixos foram encontrados ao início do dia em baixa-mar e os máximos a meio da tarde (preia-mar). Os sólidos em suspensão totais (e fração inorgânica dos sólidos em suspensão) correlacionaram-se diretamente com a salinidade, pelos mesmos motivos expressos anteriormente. No que diz respeito às correlações inversas estas foram encontradas entre os nutrientes (exceto a amónia) e a temperatura, pois as concentrações mais elevadas foram encontradas em baixa-mar, no início do dia, quando a temperatura da água foi mais baixa. Os nutrientes também se correlacionaram de forma oposta com o pH e o oxigénio dissolvido, pois estes atingiram valores mais baixos ao início do dia, quando a taxa de respiração é maior do que a de fotossíntese e associado também ao período de baixa-mar.

**Tabela 3.4-** - Matriz de correlação entre temperatura (°C), salinidade, pH, O<sub>2</sub>, saturação em O<sub>2</sub>, amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), azoto inorgânico total (NIT), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>), razão entre azoto e fosfatos (N:P), razão entre azoto e silicatos (N:Si), clorofila *a* (Chl *a* ativa), feopigmentos (Feop), razão clorofila *a* ativa/total pigmentos, sólidos em suspensão (SS), fração orgânica dos sólidos (SSFO) e fração mineral dos sólidos (SSFM) da campanha de 16 de outubro de 2012.

|                                | T (°C) | S     | pH    | O <sub>2</sub> | % Sat | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NIT   | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> | N:P   | N:Si  | Chl <i>a</i> | Feop  | Chl <i>a</i> :TP | SS    | SSFO  | SSFM |  |
|--------------------------------|--------|-------|-------|----------------|-------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|--------------|-------|------------------|-------|-------|------|--|
| T (°C)                         | 1      |       |       |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| S                              | 0,06   | 1     |       |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| pH                             | 0,80   | -0,39 | 1     |                |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| O <sub>2</sub>                 | 0,86   | -0,16 | 0,92  | 1              |       |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| % Sat                          | 0,92   | -0,08 | 0,90  | 0,99           | 1     |                              |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | -0,25  | 0,77  | -0,52 | -0,33          | -0,30 | 1                            |                              |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | -0,57  | 0,47  | -0,64 | -0,63          | -0,61 | 0,71                         | 1                            |                              |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | -0,65  | -0,23 | -0,37 | -0,45          | -0,50 | 0,13                         | 0,57                         | 1                            |       |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| NIT                            | -0,66  | 0,19  | -0,58 | -0,60          | -0,62 | 0,59                         | 0,82                         | 0,78                         | 1     |                               |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>  | -0,58  | 0,20  | -0,49 | -0,46          | -0,49 | 0,64                         | 0,74                         | 0,62                         | 0,85  | 1                             |                                |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> | -0,42  | 0,51  | -0,48 | -0,45          | -0,44 | 0,59                         | 0,89                         | 0,67                         | 0,60  | 0,60                          | 1                              |       |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| N:P                            | 0,10   | -0,03 | 0,09  | 0,02           | 0,03  | -0,15                        | -0,03                        | 0,05                         | -0,06 | -0,45                         | -0,01                          | 1     |       |              |       |                  |       |       |      |  |
| N:Si                           | -0,54  | -0,15 | -0,40 | -0,43          | -0,47 | 0,35                         | 0,45                         | 0,65                         | 0,82  | 0,72                          | 0,18                           | -0,07 | 1     |              |       |                  |       |       |      |  |
| Chl <i>a</i>                   | -0,09  | 0,04  | -0,01 | -0,04          | -0,05 | 0,13                         | 0,29                         | 0,20                         | 0,19  | 0,23                          | 0,23                           | -0,13 | 0,14  | 1            |       |                  |       |       |      |  |
| Feop                           | -0,02  | 0,24  | -0,07 | -0,05          | -0,03 | 0,14                         | 0,23                         | 0,11                         | 0,06  | 0,01                          | 0,40                           | 0,08  | -0,20 | -0,21        | 1     |                  |       |       |      |  |
| Chl <i>a</i> :TP               | 0,02   | -0,19 | 0,06  | 0,05           | 0,03  | -0,12                        | -0,18                        | -0,10                        | -0,05 | 0,02                          | -0,35                          | -0,12 | 0,19  | 0,36         | -0,98 | 1                |       |       |      |  |
| SS                             | -0,12  | 0,65  | -0,37 | -0,31          | -0,25 | 0,57                         | 0,60                         | 0,02                         | 0,34  | 0,34                          | 0,60                           | -0,06 | -0,04 | 0,01         | 0,27  | -0,22            | 1     |       |      |  |
| SSFO                           | 0,19   | -0,70 | 0,47  | 0,37           | 0,32  | -0,66                        | -0,66                        | -0,18                        | -0,47 | -0,45                         | -0,69                          | 0,04  | -0,09 | 0,09         | -0,21 | 0,18             | -0,83 | 1     |      |  |
| SSFM                           | -0,19  | 0,70  | -0,47 | -0,37          | -0,32 | 0,66                         | 0,66                         | 0,18                         | 0,47  | 0,45                          | 0,69                           | -0,04 | 0,09  | -0,09        | 0,21  | -0,18            | 0,83  | -1,00 | 1    |  |

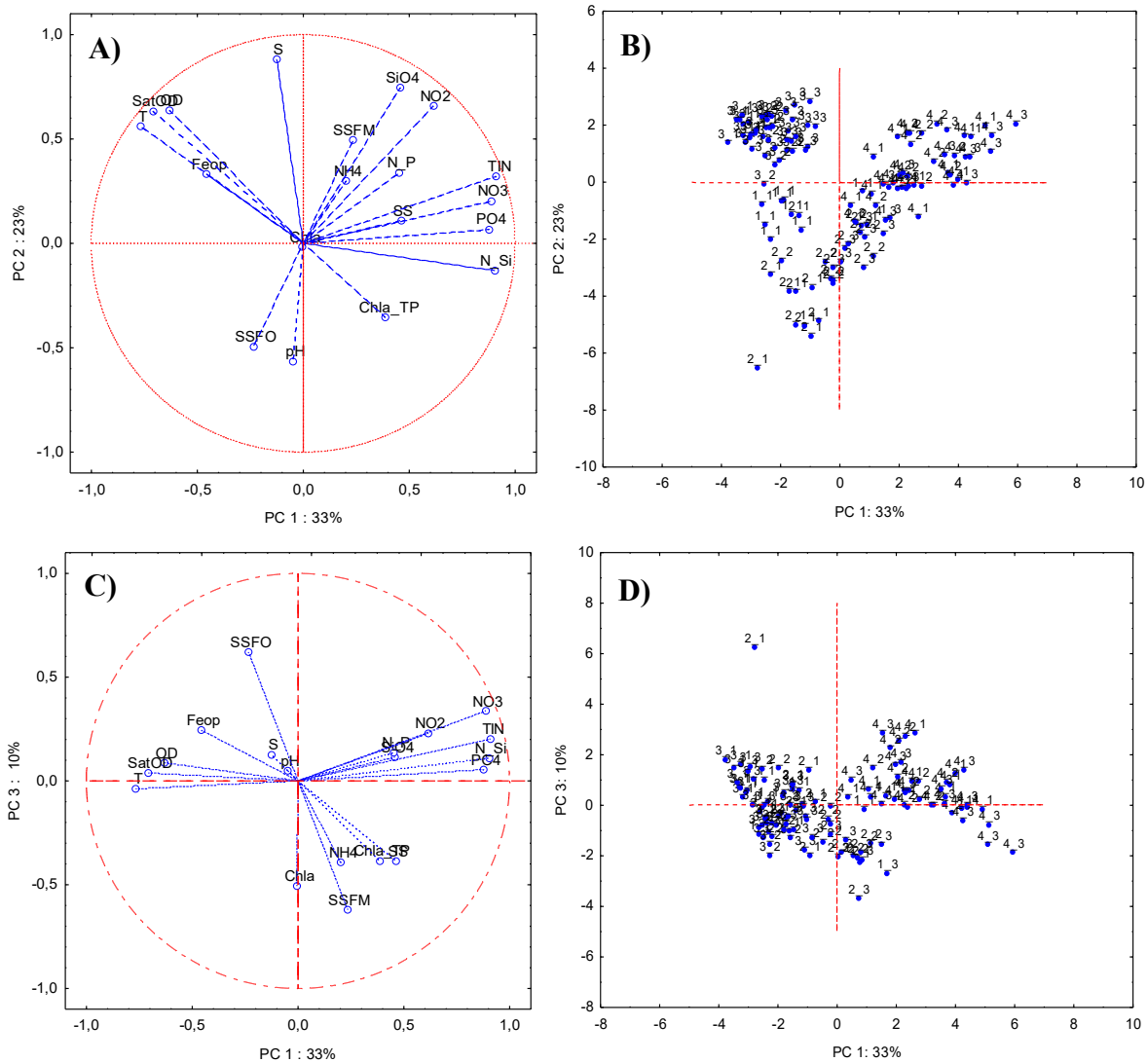
### 3.5. Análise de componentes principais (ACP)

Para tentar discriminar os fatores que melhor explicam a variabilidade global dos resultados para as quatro campanhas, aplicou-se uma Análise de Componentes Principais (ACP) aos parâmetros medidos *in situ*, nutrientes, clorofila *a* (chl *a*), feopigmentos e % de Chl *a*/pigmentos totais e sólidos em suspensão (SS) e suas frações, que está representada na Figura 3.11A e C. A Figura 3.11B e D projeta as quatro campanhas indicadas pelos n<sup>os</sup> 1 a 4, nas estações BFO (1), CF (2) e CO (3), associadas ao comportamento dos vários parâmetros analisados nas mesmas.

Os dados mostram que os três eixos principais explicam 66 % da variância, em que o fator 1 contribui com 33%, o fator 2 com 23 % e o fator 3 com 10%. Esta análise revela que o fator principal (PC1) que explica a maior variância dos resultados é a influência da condição de maré tal como demonstrado pelo comportamento inverso dos nutrientes e SS com a salinidade, a temperatura e a % de saturação de oxigénio dissolvido (Figura 3.11A). A projeção das estações e locais (Figura 3.11B) demonstra assim que a 4.<sup>a</sup> campanha, em maré-viva, coincidente com o período de afloramento costeiro, e particularmente no CO onde as concentrações de nutrientes foram máximas foi a que mais se distinguiu da 3.<sup>a</sup> campanha, em maré-morta para qualquer um dos três locais amostrados. Foi nesta campanha que se

atingiram os valores mais elevados de temperatura, salinidade, de oxigénio dissolvido (e de % de saturação) e de feopigmentos. Esse facto aponta que as maiores concentrações desses nutrientes e SS seja devido ao evento de afloramento costeiro particularmente numa condição de maré-viva, quando no período da vazante há como que um efeito de concentração pelo menor volume de água. O fator secundário (PC2) é influenciado pela variabilidade interanual, principalmente a variação da salinidade em oposição ao comportamento do pH e fração orgânica dos SS (Figura 3.11A). A projeção das campanhas e locais (Figura 3.11B) mostram que os valores mais elevados de salinidade foram nas 3.<sup>a</sup> e 4.<sup>a</sup> campanhas de outubro de 2012, em oposição à 2.<sup>a</sup> de 2011, na BFO altura em que a salinidade foi mais baixa mas o pH e a contribuição da matéria orgânica foram máximos (25 %). O terceiro fator que explica a variância (PC3) da clorofila *a*, % *chl a*/total de pigmentos, SS (e fração inorgânica destes) e amónia em oposição a fração orgânica dos SS (Figura 3.11C), reflete a maior diferença entre locais particularmente na 2.<sup>a</sup> campanha, entre BFO e CO (Figura 3.11D). Em CO, registou-se os maiores valores de clorofila, % *chl a*/total de pigmentos, SS (e sua fração inorgânica) e amónia em oposição a BFO, onde estes valores foram mais baixos e que nesta altura registou a maior contribuição de fração orgânica de SS.





**Figura 3.11-** Análise de componentes principais (ACP) aplicadas a todos os dados analisados (parâmetros *in situ*, nutrientes, Chl *a*, SS) para as quatro campanhas e para BFO, CF e CO. T: temperatura, S: salinidade, SatOD: % saturação de oxigênio,  $\text{NH}_4^+$ : amônia,  $\text{NO}_2^-$ : nitritos,  $\text{NO}_3^-$ : nitratos, TIN: azoto inorgânico total,  $\text{PO}_4^{3-}$ : fosfatos,  $\text{SiO}_4^{4-}$ : silicatos, N\_P: razão N:P, N\_Si: razão N:Si, chl *a*: clorofila *a*, Chl *a*\_TP: clorofila ativa, SS: sólidos em suspensão, SSFO: fração orgânica, SSFM: fração inorgânica. A) PC1 vs. PC2, B) projeção das campanhas (1-4) e locais (1-3) relativa ao comportamento dos parâmetros analisados em A), C) PC1 vs. PC3 e, D) projeção das campanhas (1-4) e locais (1-3) relativa ao comportamento dos parâmetros analisados em C).

### 3.6.Cálculo do índice TRIX

O índice TRIX (Figura 3.12), que permite avaliar o estado trófico das águas e que integra as concentrações de azoto, fosfato, clorofila *a* e desvios em relação à saturação de oxigénio, ilustra, a boa qualidade da água tanto na Barra Faro-Olhão como nos canais adjacentes, expresso pela classificação de muito bom, correspondente a valores entre 0-4 (código de cor azul), que reflete um estado oligotrófico, considerando todos os valores obtidos para as quatro amostragens

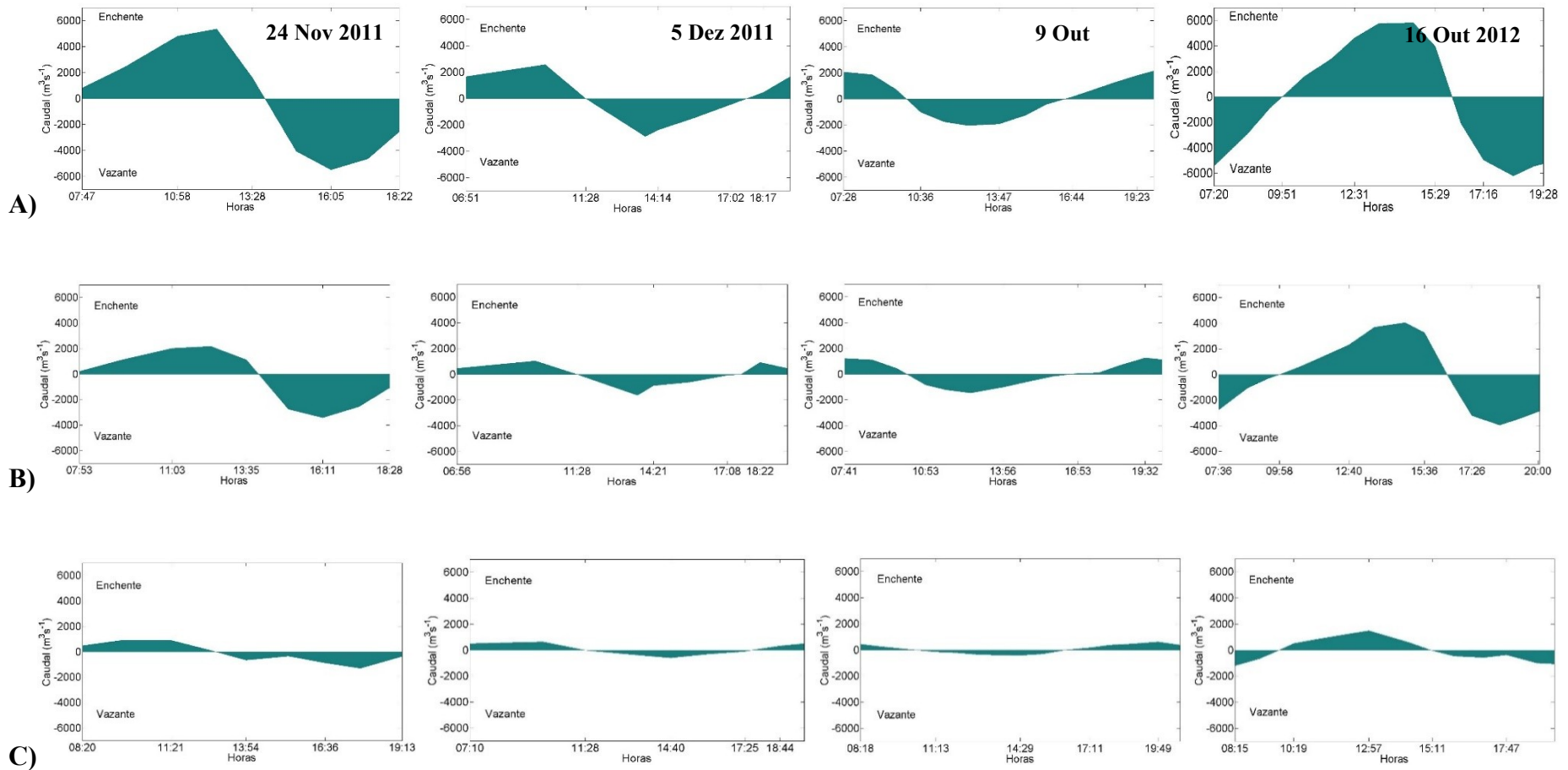


**Figura 3.12-** Índice trófico, TRIX- os valores médios das quatro amostragens para os três locais. Limite de classes- Azul: Muito Bom [0-4]; Verde: Bom [4-5]; Amarelo: Moderado [5-6] e Vermelho: Pobre [6-10]. As estrelas 1 e 2 representam a localização dos PT's e as linhas os transectos selecionados para a amostragem das velocidades.

### **3.7. Caudais calculados na Barra Faro-Olhão, canais de Faro e de Olhão**

O caudal é definido pelo volume total de água que atravessa a secção reta perpendicular à direção do escoamento por unidade de tempo. O seu conhecimento é essencial para os cálculos de transporte de massa e para fornecer, em última instância, informação sobre se ocorre importação ou exportação de água, nutrientes, sólidos em suspensão ou clorofila *a* pela Barra Faro-Olhão, Canal de Faro e Canal de Olhão. Os valores do caudal determinados hora a hora para os quatro ciclos de maré semidiurno amostrados (~12,5 h), em maré-viva e maré morta, nos outonos de 2011 e 2012, para os três locais amostrados encontram-se na Figura 3.13. Os valores positivos correspondem à condição de enchente, enquanto os valores negativos correspondem à condição de vazante. O transporte líquido ou residual representa a soma dos dois períodos, permitindo inferir o que predomina durante o ciclo de maré completo, se a importação ou a exportação.

Com os valores dos caudais é possível determinar os prismas de maré de enchente e de vazante, e posteriormente calcular o prisma de maré residual (Tabela 3.5).



**Figura 3.13-** Caudal, em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ : A) BFO, B) CF, C) CO ao longo dos ciclos semidiurnos de maré-viva em 24 de Novembro de 2011 e 16 de Outubro de 2012 em comparação com os dos ciclos semidiurnos de maré-morta em 5 de Dezembro de 2011 e 9 de Outubro de 2012. Os valores positivos correspondem a períodos de enchente e os negativos a períodos de vazante.

A amplitude de valores dos caudais entre campanhas (Figura 3.13) foi relativamente maior na 1.<sup>a</sup> e 4.<sup>a</sup> campanhas (marés-vivas) em comparação com a 2.<sup>a</sup> e 3.<sup>a</sup> campanhas (marés-mortas), o que mostra que a troca entre a barra e canais e o oceano adjacente durante o período de enchente e vazante é muito superior nos períodos onde a amplitude de maré é maior. Os caudais apresentaram diferenças ao longo do ciclo de maré, quer em períodos de enchente quer de vazante sendo consideravelmente mais elevados em BFO do que em ambos os canais. É importante salientar que CO apresentou caudais menores do que se esperaria em particular em maré-viva apresentando variações não espectáveis em meia enchente e meia vazante, talvez por influências externas.

Para calcular os valores de escoamento e do prisma de maré, mediu-se a velocidade ao longo da secção reta perpendicular à barra (BFO) e a ambos os canais (CF e CO) nas quatro campanhas de amostragem.

Como esperado, a velocidade variou em função da fase de maré. Os valores máximos da velocidade foram alcançados em meia maré durante o período de enchente e de vazante, enquanto os valores mínimos (0 m/s) ocorreram na estufa da maré. As velocidades máximas foram consistentemente medidas durante o período de vazante na barra, à exceção da campanha de 9 de outubro de 2012, em maré-morta, cuja velocidade máxima se registou em período de enchente. Os canais, em maré-viva também registaram velocidades máximas em período de vazantes enquanto em condição de maré-morta, na campanha de 5 de novembro de 2011 foram registadas em condição de enchente. Na campanha de 9 de outubro de 2012, CF registou as velocidades máximas em período de vazante enquanto CO, tal como BFO, registou as velocidades máximas no período de enchente.

A velocidade média ao longo dos ciclos de maré, para os três locais amostrados foi mais elevada em condição de maré-viva do que em maré-morta. Em BFO foi  $\sim 1,1$  m/s para a condição de maré-viva e de  $\sim 0,5$  m/s para a condição de maré-morta. Os canais apresentaram uma velocidade média semelhante entre si, tendo sido ligeiramente superiores em CF ( $\sim 0,9$  m/s) do que em CO (0,5 m/s).

O prisma de maré, calculado a partir dos caudais para as condições de enchente, vazante e residual, para BFO, CF e CO nas quatro amostragens está apresentado na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5** – Prismas de maré de enchente, vazante e residual (m<sup>3</sup>) para a barra Faro-Olhão (BFO), canal de Faro (CF) e canal de Olhão (CO) para 24 de novembro de 2011, 5 de dezembro de 2011, 9 de outubro de 2012 e 16 de outubro de 2012. Os valores positivos referem-se à importação e os negativos à exportação.

|                    | Local | Q Enchente (m <sup>3</sup> ) | Q Vazante (m <sup>3</sup> ) | Q Residual (m <sup>3</sup> ) |
|--------------------|-------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 24-11-2011<br>(MV) | BFO   | $7,2 \times 10^7$            | $-7,0 \times 10^7$          | $1,4 \times 10^6$            |
|                    | CF    | $3,1 \times 10^7$            | $-4,1 \times 10^7$          | $-1,0 \times 10^7$           |
|                    | CO    | $1,2 \times 10^7$            | $-1,5 \times 10^7$          | $-2,6 \times 10^6$           |
| 5-12-2011<br>(MM)  | BFO   | $3,5 \times 10^7$            | $-3,2 \times 10^7$          | $3,4 \times 10^6$            |
|                    | CF    | $1,5 \times 10^7$            | $-1,5 \times 10^7$          | $-2,1 \times 10^5$           |
|                    | CO    | $9,2 \times 10^6$            | $-6,7 \times 10^6$          | $2,5 \times 10^6$            |
| 9-10-2012<br>(MM)  | BFO   | $3,0 \times 10^7$            | $-3,0 \times 10^7$          | $-3,1 \times 10^5$           |
|                    | CF    | $1,7 \times 10^7$            | $-1,9 \times 10^7$          | $-2,0 \times 10^6$           |
|                    | CO    | $7,8 \times 10^6$            | $-5,5 \times 10^6$          | $2,4 \times 10^6$            |
| 16-10-2012<br>(MV) | BFO   | $8,4 \times 10^7$            | $-8,6 \times 10^7$          | $-1,5 \times 10^6$           |
|                    | CF    | $5,3 \times 10^7$            | $-4,8 \times 10^7$          | $5,6 \times 10^6$            |
|                    | CO    | $1,6 \times 10^7$            | $-1,7 \times 10^7$          | $-1,3 \times 10^6$           |

Em relação à situação de maré, apesar do intercâmbio de água em BFO ter sido muito maior em condição de maré-viva do que em maré-morta, verificou-se que o volume residual foi maior em 2011, em condição de maré-morta do que em maré-viva.

É importante referir, que no ano de 2011 BFO foi uma barra de enchente e no ano de 2012 registou-se o inverso, sendo uma barra de vazante. CF foi maioritariamente um canal de vazante, exceto na última campanha em maré-viva, que foi de enchente. Já o CO foi um canal de vazante em maré-viva e de enchente em maré-morta. O prisma de maré residual em CF no ano de 2011 na condição de maré-viva apresentou uma ordem de grandeza acima de BFO e CO, tendo-se verificado, uma ordem de grandeza menor que BFO e CO em condição de maré-morta do mesmo ano. No ano de 2012 na condição de maré-morta, BFO apresentou uma ordem de grandeza menor que CF e CO.

Quanto à contribuição dos canais para o volume trocado pela BFO verificou-se que a soma dos volumes trocados pelos dois canais em enchente e em vazante foram inferiores aos volumes trocados pela BFO, o que significa que há perdas de água que não são contabilizadas nos canais. Entre canais, CF contribuiu com maiores volumes trocados do que CO. Os volumes de CF representam 45-65 % do volume total por BFO enquanto CO representa 15-25 %. Tal indica que a não contabilização de algum volume de água neste canal para BFO é relevante. Tal poderá dever-se ao facto da secção amostrada neste canal ser uma zona pouco profunda e pelo canal ser menos definido que CF. Na sua envolvência existe uma área de sapal importante (Figura 2.1) onde uma quantidade relativamente elevada de água se propaga/dispersa sobre os sapais e que também pode sofrer alguma influência da circulação de água através da Barra da Armona, como se pode supor pela observação da Figura 2.1, em enchente.

### **3.8. Cálculo dos transportes de nutrientes, clorofila *a* e sólidos em suspensão**

Para caracterizar a dinâmica e quantificar o transporte de nutrientes, clorofila *a* e matéria particulada através da Barra e dos canais, e para avaliar a influência dessa contribuição para a produtividade biológica do ecossistema em estudo, para além dos prismas de maré também se estimou o transporte de massa de enchente, de vazante e líquido ou residual (Tabela 3.6).

**Tabela 3.6-** Transportes de enchente, de vazante e líquidos dos nutrientes, sólidos em suspensão (SS) e clorofila *a* (Chl *a*) da barra Faro-Olhão (BFO), do canal de Faro (CF) e do canal de Olhão (CO), durante as 4 amostragens realizadas: 24 de novembro de 2011, 5 de dezembro de 2012, 9 de outubro de 2012 e 16 de outubro de 2012.

|            |          | Transporte líquido (kg) |                              |                              |                              |                               |                                |              |          |
|------------|----------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|----------|
|            |          | Local                   | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> | Chl <i>a</i> | SS (ton) |
| 24-11-2011 | Enchente | BFO                     | 718                          | 30                           | 356                          | 127                           | 4098                           | 40,8         | 428      |
|            |          | CF                      |                              |                              |                              |                               |                                | 8,6          | 179      |
|            |          | CO                      | 298                          | 13                           | 145                          | 93                            | 725                            | 6            | 85       |
|            | Vazante  | BFO                     | -1474                        | -46                          | -349                         | -153                          | -3722                          | -32,3        | -584     |
|            |          | CF                      |                              |                              |                              |                               |                                | -4,8         | -418     |
|            |          | CO                      | -272                         | -11                          | -147                         | -94                           | -834                           | -6,9         | -138     |
|            | Residual | BFO                     | -756                         | -16                          | 6                            | -25                           | 376                            | 8,5          | -156     |
|            |          | CF                      |                              |                              |                              |                               |                                | 3,9          | -240     |
|            |          | CO                      | 26                           | 3                            | -2                           | -0,5                          | -110                           | -0,9         | -52      |
| 5-12-2011  | Enchente | BFO                     | 141                          | 12                           | 243                          | 166                           | 926                            | 8,1          | 113      |
|            |          | CF                      | 145                          | 11                           | 163                          | 81                            | 674                            | 3,4          | 69       |
|            |          | CO                      | 134                          | 2                            | 113                          | 49                            | 375                            | 6,1          | 28       |
|            | Vazante  | BFO                     | -207                         | -15                          | -119                         | -132                          | -941                           | -7,1         | -131     |
|            |          | CF                      | -144                         | -8                           | -139                         | -103                          | -735                           | -4,7         | -62      |
|            |          | CO                      | -163                         | -4                           | -8                           | -49                           | -396                           | -4,6         | -35      |
|            | Residual | BFO                     | -66                          | -3                           | 123                          | 34                            | -15                            | 0,9          | -18      |
|            |          | CF                      | 0,3                          | 3                            | 24                           | -22                           | -61                            | -1,3         | 7        |
|            |          | CO                      | -29                          | -1                           | 36                           | 0                             | -21                            | 1,5          | -7       |
| 9-10-2012  | Enchente | BFO                     | 281                          | 62                           | 372                          | 165                           | 2324                           | 6,5          | 95       |
|            |          | CF                      | 186                          | 36                           | 140                          | 59                            | 1550                           | 8,5          | 59       |
|            |          | CO                      | 168                          | 13                           | 81                           | 31                            | 730                            | 2,3          | 30       |
|            | Vazante  | BFO                     | -379                         | -55                          | -328                         | -143                          | -2392                          | -4,1         | -91      |
|            |          | CF                      | -252                         | -36                          | -80                          | -68                           | -1900                          | -8,6         | -87      |
|            |          | CO                      | -130                         | -10                          | -89                          | -32                           | -528                           | -2,1         | -34      |
|            | Residual | BFO                     | -98                          | 7                            | 43                           | 22                            | -68                            | 2,4          | 4        |
|            |          | CF                      | -66                          | -0,6                         | 60                           | -9                            | -350                           | -0,1         | -28      |
|            |          | CO                      | 38                           | 3                            | -8                           | -2                            | 202                            | 0,2          | -4       |
| 16-10-2012 | Enchente | BFO                     | 498                          | 227                          | 6111                         | 1266                          | 9199                           | 23           | 331      |
|            |          | CF                      | 375                          | 154                          | 3802                         | 443                           | 5850                           | 16           | 209      |
|            |          | CO                      | 251                          | 49                           | 1288                         | 175                           | 1939                           | 6,4          | 75       |
|            | Vazante  | BFO                     | -760                         | -204                         | -4837                        | -1118                         | -8840                          | -19          | -541     |
|            |          | CF                      | -378                         | -121                         | -3159                        | -346                          | -5272                          | -11          | -265     |
|            |          | CO                      | -368                         | -49                          | -1116                        | -200                          | -1952                          | -6           | -90      |
|            | Residual | BFO                     | -262                         | 23                           | 1274                         | 149                           | 359                            | 4            | -210     |
|            |          | CF                      | -3                           | 33                           | 644                          | 97                            | 578                            | 4            | -56      |
|            |          | CO                      | -117                         | 0                            | 172                          | -25                           | -12                            | 0,4          | -15      |

Os transportes de massa de enchente, vazante e líquidos, por influência do maior caudal, foram mais elevados em BFO, particularmente para amónia, nitratos, silicatos,



clorofila *a* e SS. Esta situação verificou-se principalmente nas campanhas de maré-viva, de 24 de novembro de 2011 e na de 16 de outubro de 2012, ambas influenciadas por afloramento costeiro (apesar de em fases diferentes de desenvolvimento), que foram substancialmente maiores do que os correspondentes de maré-morta. Esta barra apresentou um comportamento variável quanto às trocas com a zona costeira para os vários compostos durante as quatro campanhas. No que diz respeito aos transportes residuais/líquidos verificou-se que para a amónia, este nutriente foi sempre exportado (66-756 kg), preferencialmente trocado para a zona costeira adjacente, mostrando que a Ria Formosa, nesta área de estudo fertiliza a costa em amónia. Os nitratos foram sempre importados (6-1274 kg), o que sugere que a zona costeira fornece preferencialmente este nutriente de azoto, fertilizando a Ria Formosa, os nitritos tiveram um comportamento alternado entre anos. Foi exportado (3-16 kg) nas campanhas de 2011 e importado (7-23 kg) nas campanhas de 2012. É importante também realçar que para os nutrientes amónia e nitratos chegam a trocar-se mais de uma tonelada destes compostos em causa (Tabela 3.6). No entanto, a amónia foi predominante na 1.<sup>a</sup> e 3.<sup>a</sup> campanha enquanto nas restantes predominaram os nitratos e em especial na 4.<sup>a</sup> campanha, que decorreu sob influência de afloramento costeiro. Os fosfatos foram globalmente importados (22-149 kg) da zona costeira para o interior da barra, exceto na 1.<sup>a</sup> campanha em que foram exportados 25 kg. Os silicatos foram importados em maré-viva (359-376 kg) fertilizando a Ria Formosa e exportados em maré-morta (15-68 kg), altura em que a Ria Formosa por sua vez fertilizou a zona costeira adjacente. A clorofila *a* que representa um *proxy* do fitoplâncton mostrou nestas quatro campanhas ser sempre importada (~1-2,5 kg) da zona costeira adjacente para o interior da Ria e em particular em maré-viva, altura que ocorreu sob influência de afloramento costeiro em estados de evolução diferente. No que concerne aos sólidos em suspensão, estes globalmente foram exportados (18-210 toneladas) para a costa, à exceção da 1.<sup>a</sup> campanha de outono de 2012, em maré-morta em que ocorreu uma importação de quatro toneladas. É de salientar que as trocas foram aumentadas em maré-viva quando se chegaram a exportar 156-201 toneladas. Se for assumido que aproximadamente 20% desse valor corresponde a matéria orgânica, isto representa uma exportação entre 30 a 40 toneladas de matéria orgânica, que fertilizará também a costa adjacente.

Relativamente à diferença entre os três locais, verificou-se que em particular na 1.<sup>a</sup> campanha se registou uma grande diferença de transporte de BFO em relação ao CO, que se pode atribuir à grande diferença de caudais nestes dois locais. Para BFO e CF estas diferenças nunca foram tão acentuadas.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Influência das condições meteorológicas e dos mecanismos forçadores na variabilidade das características da água na Barra Faro-Olhão e canais adjacentes

As lagoas costeiras representam ecossistemas dinâmicos complexos onde os processos físicos, químicos, biológicos e geológicos têm grande importância. Na Ria Formosa tal também acontece e por se tratar de um ecossistema valioso do ponto de vista ecológico e socioeconómico torna-se fundamental o seu conhecimento. As trocas de água com o oceano são muito importantes para o seu funcionamento e aqui destaca-se o papel da Barra Faro-Olhão, que é a mais importante e que contribuiu para o total das trocas com o Oceano com ~60% em maré-viva e ~45 % em maré-morta (Pacheco *et al.*, 2010). Assim, o estudo da sua dinâmica e dos canais adjacentes, nomeadamente a nível dos nutrientes, clorofila *a* e sólidos em suspensão que afetam a produtividade biológica destas águas torna-se imperativo para se perceber a sua resposta à variabilidade ambiental, a diferentes escalas temporais - maré, sazonal e intra-anual. Tal constituiu um dos objetivos desta tese, considerando a situação de outono, em dois anos consecutivos em condições de maré-viva e de maré-morta. Para além de se quantificar a contribuição global das trocas através da Barra Faro-Olhão é também muito importante quantificar a contribuição individual de cada um dos seus canais adjacentes (de Faro e de Olhão), para o transporte de massa (água, nutrientes, clorofila *a* e sólidos em suspensão) de modo a perceber a dinâmica no interior da Ria Formosa, junto desta barra. Esta abordagem torna este trabalho inovador, pois até à data não se encontrou esta informação reportada em bibliografia disponível na literatura.

No interior da Ria Formosa, as propriedades químicas da água dependem da interação de vários processos, como difusão molecular a partir dos sedimentos, escoamento terrestre, pressão antropogénica (Newton *et al.*, 2003; Newton & Mudge, 2005; Loureiro *et al.*, 2006; Cabaço *et al.*, 2008; Brito *et al.*, 2012) e da troca/ mistura com as águas da costa adjacente (Newton & Icely, 2004). Aí, as características da água dependem bastante dos forçamentos físicos associados à variabilidade meteorológica (Cravo *et al.*, 2014).

Neste estudo, a temperatura da água variou entre valores típicos (16-23°C) para a época do ano (Barbosa, 2010), com os mais altos a refletirem a influência de uma situação de verão tardio, em outubro de 2012, também com alguma influência de uma contracorrente costeira (Figura 3.4C) proveniente do Golfo de Cádiz (Relvas *et al.*, 2002; Garel *et al.*, 2016), e os mais baixos a transição para o inverno em dezembro de 2011 ou a influência do afloramento costeiro no arrefecimento da água, na última campanha de 2012 (Figura 3.4D). A salinidade enquadrou-se também, globalmente, nos valores típicos da Ria Formosa, entre 36 e 36,5 (Falcão & Vale, 2003; Newton & Mudge, 2003; Barbosa, 2006, 2010; Cravo *et al.*, 2012, 2013). O pH (~8) e a percentagem de saturação de oxigénio (80-120%) variaram dentro dos valores obtidos em estudos anteriores (Falcão & Vale, 2003; Barbosa, 2010; Cravo *et al.*, 2012, 2013), tal como as concentrações de nutrientes (Falcão & Vale, 2003; Newton & Mudge, 2005; Barbosa, 2010; Cravo *et al.*, 2012, 2013). Em suma, no conjunto das quatro campanhas o estado trófico das águas foi muito bom, característico de águas oligotróficas, refletindo valores baixos de concentrações de nutrientes, como na zona costeira adjacente. No entanto, algumas das concentrações de nutrientes na última campanha apresentaram-se um pouco mais elevadas, como resultado da ocorrência do evento de afloramento costeiro, com maior disponibilidade de nutrientes a partir da zona costeira adjacente. Este aumento de nutrientes provocou alteração nas razões N:P e N:Si. O fitoplâncton esteve limitado por fósforo em maré-viva, ao contrário de maré-morta em que foi limitado por azoto, como típico de águas costeiras (Howarth & Marino, 2006) e já reportado neste sistema por outros autores (Loureiro *et al.*, 2005; Newton & Mudge, 2005). A limitação em fósforo poderá dever-se a uma maior disponibilidade de azoto, em períodos de afloramento costeiro, como se verificou na última campanha (Figura 3.8C). A limitação por silício (Figura 3.8D) ocorreu somente nesta última campanha e reforça a ideia de que durante eventos de afloramento costeiro a disponibilidade de azoto aumenta substancialmente. A limitação do silício pode também estar associado ao facto de existirem diatomáceas, as quais respondem rapidamente à presença deste nutriente na coluna de água para a sua incorporação nas frústulas (Loureiro *et al.*, 2006; Barbosa, 2009). As diatomáceas são dominantes durante os eventos de afloramento costeiro e respondem de forma rápida, principalmente ao nitrato recentemente aflorado (Wilkerson *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2006; Fawcett & Ward, 2011). De facto este grupo tem sido referido como dominante em zonas de afloramento como na costa SW de Portugal, na costa NW da Península Ibérica e nas costas da Califórnia (Moita, 2001; Estrada & Blasco, 1985; Chavez *et al.*, 1991; respetivamente). Infelizmente, neste estudo não há dados de identificação do fitoplâncton para se poder confirmar esta ocorrência.

As concentrações de clorofila *a* não foram superiores a ~1,5 µg/L, e apesar de não serem valores baixos também não se podem considerar elevados e representativos de uma situação de *bloom* outonal. Tal situação poderá ter ocorrido após a última campanha, como visto na imagem de satélite compósita de 8 dias (Figura 3.10D). Os valores de clorofila *a* (< 2 µg/L), foram similares aos de águas costeiras junto da Ria Formosa, para esta altura do ano (Falcão & Vale, 2003; Cardoso *et al.*, 2005; Newton & Mudge, 2005; Barbosa, 2010). Valores superiores, até 10 µg/L têm sido observados em zonas sujeitas a afloramento costeiro forte tanto na costa sul de Portugal (Moita, 2001), como na costa NW Espanhola (Alvarez-Salgado *et al.*, 2003), no Golfo de Cádiz (Navarro & Ruiz, 2006; Reul *et al.*, 2006) e na costa oeste Australiana (Peter *et al.*, 2005). O conjunto de dados da clorofila *a* e a análise de imagens de satélite permitem inferir o impacto das diferentes fases do afloramento costeiro sobre o crescimento do fitoplâncton.

Durante as campanhas de 2011, apesar da 1.<sup>a</sup> ter sido precedida por, pelo menos, dois eventos de afloramento costeiro (Figura 3.2), a chl *a* apresentou concentrações baixas. Esta situação pode ser explicada por o fitoplâncton já ter começado a diminuir após 2 semanas de ocorrência de afloramento ou ter ocorrido inversão do vento, que não promoveu condições de estabilidade da coluna de água para o desenvolvimento do fitoplâncton (Wilkerson *et al.*, 2006). Além disso, a transição de condições de final de outono para inverno pode também ter influenciado a diminuição do fitoplâncton nesta altura do ano. Já em 2012, as concentrações também foram baixas, quer na 1.<sup>a</sup> campanha por influência de água que recirculava no Golfo de Cádiz (tipicamente oligotrófica; Navarro *et al.*, 2006) quer na última campanha, porque no decorrer de afloramento costeiro não se verificam condições de estabilidade da coluna de água propícias para o desenvolvimento do fitoplâncton mesmo que haja um aumento da disponibilidade dos nutrientes.

Quanto ao estado das populações fitoplanctónicas, apesar da variabilidade entre campanhas verificou-se que os valores mais baixos (~40%) correspondentes a uma população mais envelhecida foram encontrados na 1.<sup>a</sup> campanha de 2012 enquanto os mais elevados (>80%) na última, confirmando que a população estava em desenvolvimento.

Relativamente aos sólidos em suspensão, em geral, as concentrações foram baixas (<15 mg/L), não obstante o aumento observado na última campanha. Parte da fração orgânica, minoritária (~20%), correspondeu quer a fitoplâncton quer a excreções e/ou outra matéria particulada em decomposição. A restante fração inorgânica (~80 %) correspondeu a partículas minerais em suspensão na coluna de água.

Em relação à variabilidade entre campanhas, verificou-se que em 2011, os parâmetros *in situ* seguiram a transição do outono para o inverno, tal como observado para a temperatura. Neste caso os valores mais baixos de salinidade refletiram os eventos de precipitação forte que se fizeram sentir antes das campanhas. Já em relação às campanhas de 2012, a primeira ocorreu em condições de verão tardio, com valores de temperatura da água superiores a 20 °C (Figuras 3.4C-D; 3.6A), salinidades mais elevadas (Figura 3.6B) por intensificação da evaporação e valores de supersaturação de oxigénio (Figura 3.6D), mas após um evento de afloramento a temperatura desceu ~5 °C, assim como ocorreu uma diminuição ligeira da salinidade e do oxigénio dissolvido, mas houve um aumento concomitante dos nutrientes (Figuras 3.7; 3.8A-B).

Os dados mostram claramente que os processos químicos e biológicos nos locais estudados nos dois anos (Figuras 3.2; 3.3) foram fortemente condicionados pela ação do vento como mecanismo físico forçador. O mesmo já foi reportado na mais pequena das barras do setor oeste da Ria Formosa – a barra do Ancão (Alcântara *et al.*, 2012). No decorrer das campanhas, os ventos foram variáveis na costa sul de Portugal apesar de terem soprado predominantemente do quadrante oeste, favoráveis ao afloramento costeiro durante ou anteriormente às campanhas de maré-viva (Figuras 3.2A; 3.3A). De facto, na última campanha o vento, apesar de mais fraco, foi persistente de oeste. Antes da 1.<sup>a</sup> campanha, houve dois eventos de afloramento costeiro intervalados por relaxamento de vento, que fez com que em maré-viva as características da água fossem diferentes, refletindo os diferentes estádios de desenvolvimento dos eventos de afloramento costeiro.

É reconhecido que na costa Sudeste/Sul de Portugal o afloramento costeiro é recorrente, principalmente no período entre maio e outubro, quando os ventos são predominantes de norte ou noroeste (Relvas *et al.*, 2002). No entanto, o afloramento costeiro não é um processo espacialmente uniforme ou temporalmente contínuo (Cervantes-Duarte *et al.*, 2013). A intensidade do mesmo depende da variabilidade da direção e da intensidade do vento (Alvarez *et al.*, 2008). A água mais fria aflorada nas regiões costeiras sob ventos favoráveis contribui para a troca eficiente de matéria, incluindo nutrientes. Isto representa um processo importante nas águas mais pobres em nutrientes, o que contribui assim para aumentar a produtividade biológica das águas (Leví, 2008, Cardeira *et al.*, 2013).

É reconhecido que os eventos de afloramento costeiro ao longo da costa sul da Península Ibérica não se limitam ao cabo de São Vicente, estendendo-se até ao cabo de Santa Maria (Criado-Aldeanueva *et al.*, 2006a, 2006b; García-Lafuente *et al.*, 2006) e ocasionalmente para além deste cabo (Relvas & Barton, 2002) até à zona da foz do Rio

Guadiana (Cravo *et al.*, 2013b). O afloramento foi sentido em frente à Barra Faro-Olhão, tendo-se estendido para o interior da Ria Formosa, como foi registado no PT, 6 km a montante da Barra Faro-Olhão, com a diminuição da temperatura da água em 5 °C (Figuras 3.2B; 3.3B). No início deste processo, a água é trazida para a superfície, provocando alterações na disponibilidade de nutrientes, mas as condições nesta altura não são as ótimas para o crescimento do fitoplâncton (Bode *et al.*, 1997). Daí resultam concentrações de clorofila *a* baixas e de nutrientes elevadas (Wilkerson *et al.*, 2006), tal como se observou na última campanha, e que são acompanhadas pelos valores mais baixos de oxigénio, sempre de subsaturação. Após o afloramento costeiro é induzida uma resposta do fitoplâncton (Dugdale *et al.*, 1990). Existe um atraso no desenvolvimento fitoplanctónico, que só ocorre posteriormente ao evento de afloramento costeiro, no seguimento de um período de relaxamento de vento, diminuindo a turbulência da coluna de água. Ocorrem elevadas taxas de absorção dos nutrientes por parte do fitoplâncton e verifica-se o seu esgotamento dentro de um período de 3 a 7 dias (Dugdale *et al.*, 1990; Alvarez-Salgado *et al.*, 2001, 2003; Barbosa *et al.*, 2001; Moita, 2001; Wilkerson *et al.*, 2006). Cerca de uma semana após a última amostragem, em condições de relaxamento do vento, registou-se um aumento de clorofila *a*, como se pode observar na imagem de satélite (Figura 3.10D).

Em situação de maré morta, sem evidência de afloramento, as características da água nos três locais foram semelhantes entre campanhas (Figura 3.6). As maiores diferenças podem dever-se a variabilidade interanual, condicionada pela meteorologia mas também pela intensificação dos processos químicos e biológicos devido ao maior tempo de residência da água dentro do sistema da Ria Formosa, tal como reportado para este sistema lagunar por outros autores (Falcão, 1997).

A variação ao longo do ciclo de maré foi mais acentuada em maré-viva, uma vez que os volumes trocados são máximos, conduzindo a um forte efeito de diluição durante a enchente, por maior mistura com a água do mar e de “concentração” durante a vazante, pois a mistura com água do oceano é mínima e os processos de difusão molecular a partir do sedimento são máximos. Este facto foi refletido no maior número e mais intensas correlações entre os parâmetros analisados (Tabelas 3.1-3.4)

Quanto à variação dos parâmetros ao longo dos ciclos de maré, registou-se um aumento global da temperatura, pH, oxigénio e clorofila *a* ao longo do dia por aumento de fotossíntese enquanto a salinidade, os nutrientes e SS variaram inversamente com a altura da maré. Este facto revela que a água que sai da Ria Formosa tem valores de salinidade mais elevadas, particularmente no final do verão devido a processos de evaporação, mais intensos

num sistema pouco profundo, e também devido à escassez de entrada de água doce e pelos reduzidos períodos de precipitação (Mudge *et al.*, 2008). A salinidade mais baixa foi registada na campanha de 5 de dezembro de 2011, que refletiu a elevada precipitação de 60 mm em apenas 72 horas que ocorreu 2-3 dias antes da campanha. Quanto aos nutrientes e SS, os valores mais elevados foram medidos no período de vazante, altura em que não se faz sentir a entrada de água do oceano adjacente, em geral, mais pobre em nutrientes, tal como reportado por Cravo *et al.* (2013).

Relativamente à variação vertical dos parâmetros medidos *in situ*, os dados revelam que em todas as situações estudadas a água na Barra Faro-Olhão e nos canais adjacentes encontra-se bem misturada, sem qualquer estratificação, refletido na inexistência de diferenças significativas entre as três profundidades de amostragem selecionadas ( $p > 0,05$ ). Tal facto evidencia que a entrada de água doce no sistema é negligente, como encontrado por outros autores (Newton & Mudge, 2002, 2009; Falcão & Vale, 2003; Mudge *et al.*, 2008; Barbosa, 2010; Cravo *et al.*, 2012, 2013). A variação vertical reduzida destes parâmetros (Figura 3.5) pode resultar não só da ausência de entradas de água doce mas também dos valores relativamente elevados da velocidade da corrente (0,5-1,1 m/s) que permitem uma homogeneização da coluna de água.

Em relação aos três locais amostrados, houve similaridade entre as suas características, dada a sua proximidade e homogeneidade do sistema nesta área de estudo. No entanto, as maiores diferenças foram observadas no Canal de Olhão, por ser um canal menos profundo e demarcado, e que devido à sua localização, também sofre influência da Barra da Armona, tal como foi observado nos valores de transporte de água obtidos no mesmo local.

Os resultados da aplicação de um modelo numérico confirmam este padrão de circulação e indicam que o Canal de Faro pode ter também alguma influência de circulação residual da Barra do Ancão (Fabião *et al.*, *in press*). No Canal de Olhão encontraram-se as maiores concentrações de nutrientes, chl *a* e SS e os menores valores de pH e oxigénio dissolvido. Isto pode refletir alguma influência de ressuspensão de material de fundo que pode ocorrer na vasta área de sapal localizada na área envolvente. De facto, a inundação do sapal contribui fortemente para um enriquecimento da água em nutrientes (Falcão, 1997). Em situação de maré-viva, a inundação dos sedimentos intertidais no início da enchente faz com que os compostos de azoto e silicatos sejam mais facilmente remobilizados para a água, enquanto os de fósforo são particularmente libertados em função do aumento da temperatura (maior no verão; Falcão, 1997). Pode haver ainda contribuição de outras fontes externas como aquaculturas, o aglomerado populacional da Ilha do Farol, a descarga de efluentes das ETAR

em áreas mais próximas desta zona (Cravo *et al.*, 2012), que possa chegar até aqui através do Canal de Olhão, ou ainda de outras fontes não identificadas neste estudo. Foi de facto aqui que se encontraram as maiores percentagens de amónia em relação às formas inorgânicas do azoto, como resultado de maiores taxas de remineralização da matéria orgânica, ao contrário da Barra Faro-Olhão, onde predominaram os nitratos, situação típica de zonas oxigenadas, onde há uma rápida taxa de nitrificação (Brito *et al.*, 2010).

Quanto ao estado “fisiológico” da população fitoplanctónica, os valores da razão clorofila *a*/Total de Pigmentos foram mais elevados nos canais e em particular no CO, na última amostragem. Estes valores são indicativos de uma população mais jovem, possivelmente por se tratarem de ambientes menos profundos, mais protegidos, onde as correntes são mais fracas do que na BFO, e que pode permitir uma maior taxa de crescimento de fitoplâncton pela maior disponibilidade de nutrientes (incluindo a amónia, o nutriente de azoto preferencialmente consumido, Kaiser *et al.*, 2011) e menor turbulência na coluna de água.

A análise de componentes principais permitiu identificar os três fatores mais importantes para a explicação da variabilidade dos resultados. O principal fator corresponde à condição de maré, acompanhada por outros mecanismos físicos forçadores ligados às condições meteorológicas e aos processos oceanográficos. É de reforçar a ideia de que as condições de maré-viva coincidiram com períodos em que houve afloramento costeiro e que em maré-morta se observaram períodos de relaxamento do vento. As diferenças interanuais entre 2011 e 2012 parecem ser o segundo fator a explicar a variabilidade dos resultados, enquanto a variabilidade espacial só se destaca como terceiro fator.

Não é fácil contextualizar e comparar as características químicas da Ria Formosa com outras lagoas costeiras europeias. A Ria de Aveiro, localizada na costa noroeste de Portugal e as Rias da Galiza, na costa noroeste de Espanha, são sistemas mesotidais que também são influenciados por eventos de afloramento costeiro. Contudo, representam sistemas verdadeiramente estuarinos, onde há forte influência do escoamento dos rios, com gradientes de salinidade muito acentuados, ao contrário da Ria Formosa. Ainda assim, para ambos os sistemas na costa Atlântica, a magnitude da concentração dos nutrientes e da clorofila *a* foi semelhante. Já em relação às lagoas costeiras na bacia do Mediterrâneo, a sua comparação não é realista uma vez que as lagoas aí existentes são microtidais e os efeitos da maré são muito pequenos ou negligenciáveis (Cravo *et al.*, 2014).



## **4.2. Papel da Barra de Faro-Olhão e canais adjacentes na dinâmica dos nutrientes, clorofila *a* e matéria em suspensão**

Muito poucos estudos têm estimado o transporte de água através da Barra Faro-Olhão e dos canais adjacentes (Cravo *et al.*, 2014; Pacheco *et al.*, 2014), onde foi medida a velocidade da corrente ao longo de uma secção transversal reta. Não se conhecem até à data outros dados relativos à dinâmica de nutrientes, clorofila *a* e SS nesta área, usando a mesma metodologia deste trabalho, o que motivou este estudo e lhe dá um carácter inovador para o conhecimento da contribuição global das trocas através da Barra Faro-Olhão e a contribuição individual de cada um dos seus canais adjacentes para os balanços de água e de matéria (dissolvida e particulada), para melhor compreender a dinâmica no interior da Ria Formosa.

O presente estudo corrobora a ideia de que as trocas de massa através da Barra Faro-Olhão e dos canais dependem não só da condição de maré (volumes de água) mas também da variabilidade dos processos atmosféricos/oceanográficos. Estas condições afetam e alteram substancialmente os padrões de transporte de massa induzidos pelo escoamento, como é observado em outros sistemas lagunares (Smith, 2001). Neste trabalho, os transportes foram superiores em maré-viva do que em maré-morta ou na ausência de afloramento costeiro, cujos nutrientes (nitratos, fosfatos e silicatos) foram disponibilizados do oceano adjacente para o interior da Ria Formosa durante a enchente, através da Barra Faro-Olhão, sendo esta a mais importante a nível das trocas. É de salientar a maior importância dos processos físicos de troca entre o sedimento e a coluna de água em maré-viva que permitirá uma exportação dos silicatos, indicadores de trocas com o fundo e os nitratos, indicadores de trocas com o mar, tal como referido por Falcão (1997).

Existe uma diferença notória nos prismas de maré de enchente e vazante na barra e nos canais adjacentes, tendo sido máximos em ambas as condições de maré em BFO e mínimos em CO. Relativamente à contribuição dos canais, verificou-se que a soma dos dois foi inferior aos volumes trocados pela Barra Faro-Olhão. A menor contribuição do Canal de Olhão poderá dever-se ao facto de haver um volume substancial de água a escoar para os sapais que ladeiam este canal durante a enchente e que não se consegue amostrar, ou devido à influência da Barra da Armona sobre o Canal de Olhão no lado oposto relativamente a BFO. Também poderá haver alguma influência da Barra do Ancão sobre o Canal de Faro, no lado oposto ao de BFO, como explicado anteriormente, mas que deverá ser menor devido à distância a que está a Barra do Ancão e ao valor do prisma de maré através dela ser muito menor.

Apesar de CF apresentar nestas quatro campanhas maiores prismas que CO, em maré morta CO foi predominantemente de enchente enquanto CF foi de vazante. Este comportamento, que também foi registado por Pacheco *et al.* (2010), sugere um padrão de circulação da água entre os dois canais através dos sapais localizados entre eles, de tal forma que alguma da água que entra pela barra e passa através do CO durante a enchente vai rodar no sentido direto, passando por cima dos sapais e saindo preferencialmente pelo CF em direção à Barra Faro-Olhão e ao mar durante a vazante.

Adicionalmente, devido à circulação complexa pelo intrincado de canais principais e secundários e barras naturais e à evolução morfodinâmica deste sistema, têm ocorrido pequenas alterações nos prismas de maré em todas as barras ao longo do tempo (Soares *et al.*, 2000; Pacheco *et al.*, 2011), afetando nomeadamente o equilíbrio que se julgava estável entre esta barra e a Barra da Armona ligadas entre si pelo Canal de Olhão. Segundo Pacheco *et al.* (2010), a largura da Barra da Armona tem vindo a diminuir devido ao seu assoreamento. Por sua vez, a barra do Ancão encontra-se em constante migração (Dias, 2009). Estas mudanças em ambas as barras podem levar a alterações na hidrodinâmica da Ria Formosa, mudando nomeadamente o padrão dominante de enchente verificado na Barra Faro-Olhão (Duarte *et al.*, 2008; Pacheco *et al.*, 2010). De facto, em ambas as campanhas de 2012 (maré-viva e maré-morta) verificou-se que esta barra teve um comportamento de vazante, ao contrário do reportado por outros autores (Duarte *et al.*, 2008; Pacheco *et al.*, 2010; Jacob *et al.*, 2013).

Apesar de se verificarem diferenças em relação aos prismas de maré calculados por Pacheco *et al.* (2010) para a Barra de Faro-Olhão, ambas as estimativas são da mesma ordem de grandeza. As diferenças podem estar relacionadas com pequenas variações na altura da maré e nos períodos de enchente e vazante considerados, que têm repercussões nos volumes estimados. As marés são semidiurnas, e como não são perfeitamente simétricas apresentam diferenças entre as duas marés diárias sucessivas. Por outro lado, devido à força de atrito exercida pelo fundo e pelas margens no interior da Ria Formosa durante a vazante, ocorre distorção da maré, que também influencia o cálculo do escoamento (Cravo *et al.*, 2013).

Quanto aos balanços de massa, sempre maiores na Barra Faro-Olhão, a variabilidade entre campanhas também refletiu a influência das condições ambientais como os eventos de afloramento costeiro. Isto pode ser claramente evidenciado pelos maiores valores estimados na última campanha comparativamente com as outras campanhas.

Durante esta campanha (Tabela 3.6) a Ria Formosa comportou-se como um sumidouro, importando através da barra as maiores quantidades particularmente de nitratos, mas também de fosfatos, silicatos e chl *a* da área costeira adjacente, potenciando a

produtividade biológica no seu interior. A importação de nitratos e fosfatos neste estudo em condição de outono contraria a tendência referida por Falcão (1997) para a Ria Formosa, para a mesma estação do ano no período de setembro de 1985 a setembro de 1986. Os únicos compostos exportados na última campanha foram amónia e SS (que contribuiu com 20% de matéria orgânica, uma quantidade relevante face às toneladas exportadas de SS).

Nas restantes campanhas, a Barra Faro-Olhão fertilizou a zona costeira com nutrientes em quantidades relevantes (kg a toneladas), contribuindo para aumentar a produtividade da zona costeira. A exportação de amónia e SS foi consistente em todas as campanhas, o que revela a Ria Formosa como uma fonte importante de nutrientes e matéria orgânica particulada para a costa. A exportação dos silicatos tem sido associada à troca sedimento-água por difusão molecular (Falcão & Vale, 2003; Vieillard *et al.*, 2011), enquanto a amónia deve resultar da decomposição de matéria orgânica. Esta tendência de exportação de nutrientes, já foi reportada em estudos anteriores, que usaram uma abordagem diferente de cálculo de trocas de matéria (Falcão, 1997; Falcão & Vale, 2003, Newton & Mudge, 2005) ou mais recentemente na Barra do Ancão (Alcântara *et al.*, 2012).

É ainda relevante referir que apesar da Ria Formosa se considerar um sistema produtivo houve importação de chl *a* nas quatro campanhas, contribuindo para o aumento da produtividade biológica no seu interior. A importação de clorofila *a* já tem sido referida em estudos anteriores mas noutras épocas do ano, nomeadamente na primavera (Falcão & Vale, 2003; Alcântara *et al.*, 2012). Este facto pode também sugerir que o crescimento fitoplanctónico se inicia em águas oceânicas, como referido por Falcão & Vale (2003), de forma mais evidente em situação de afloramento costeiro, sendo posteriormente importado para o interior da Ria.

Em relação aos valores da troca de massa através dos canais, o CO, apresentou prismas de maré menores do que CF, e apesar de ter apresentado as maiores concentrações de nutrientes, chl *a* e SS, globalmente as quantidades permutadas através dele foram menores, pela menor contribuição dos caudais.

## 5. CONCLUSÕES

A variabilidade das propriedades físico-químicas na Barra Faro-Olhão e nos seus canais adjacentes dependeu da dinâmica das marés, particularmente em condições de maior amplitude, i.e, em maré-viva, promovendo a mistura mais intensa com as águas costeiras adjacentes. Durante esta condição de maré notou-se um efeito de concentração durante o período de vazante até baixa-mar e um efeito de diluição mais acentuado durante o período de enchente até preia-mar. Em maré-morta, o tempo de residência da água é maior e os processos biológicos pareceram ser mais efetivos do que em maré-viva, altura em que os processos físicos de mistura foram dominantes. No entanto, o estado trófico global dos locais amostrados nas quatro campanhas revelou-se de qualidade muito bom, típico de águas oligotróficas. Este trabalho demonstrou que as trocas através da barra e dos canais não dependem apenas da influência das marés e das características das massas de água de “fronteira” em mistura, mas também das condições meteorológicas / oceanográficas que atuam na zona costeira adjacente.

Por se tratar de um sistema dinâmico e de alta complexidade, em permanente alteração, onde ocorre forte interconectividade entre as barras e os canais principais (e secundários), a morfologia e a batimetria também influenciam as trocas através das principais barras da Ria Formosa. Assim, pela congregação e multitude de fatores em jogo, uma elevada variabilidade pode ser esperada a diferentes escalas temporais, desde a pequena escala, como são as marés, até escalas maiores como a variabilidade estacional/intra-anual e interanual.

Este trabalho veio complementar o conhecimento que existe na área da Barra Faro-Olhão e seus canais, no contexto da sua variabilidade temporal (mareal e interanual) em condições de outono, quando a produtividade biológica das águas ainda pode ser relevante.

No período de estudo verificou-se existir influência de afloramento costeiro, ainda que sob estádios de intensidade diferente. Casualmente, este efeito foi mais notório em condições de maré-viva, e refletiu-se claramente quer nas características físico-químicas da água quer nas trocas promovidas ao longo dos ciclos semidiurnos de maré entre a Barra Faro-Olhão e o oceano.

As águas costeiras do sul de Portugal sofrem afloramento quando as condições do vento são favoráveis, predominantes do quadrante oeste, podendo a sua “marca” ser estendida para o interior da Ria Formosa, pelo menos ~6 km para montante da barra principal. A dinâmica e evolução deste processo e sua influência a nível da variação de nutrientes e

crescimento fitoplanctónico vão depender do forçamento do vento (relaxamento ou persistência), como observados nas 1.<sup>a</sup> e 4.<sup>a</sup> campanhas.

Quanto ao transporte de massa de água, o valor calculado através da Barra Faro-Olhão é superior à soma dos transportes através dos dois canais. Tal poderá dever-se ao facto dos canais não serem estanques/fechados durante o período de enchente (há um volume substancial que cobre zonas de sapal que não se consegue amostrar) ou que há recirculação / interconectividade entre as outras barras e estes canais (ex: Armona-Canal de Olhão e Ancão-Canal de Faro). A contribuição do Canal de Faro, mais estreito e mais profundo, foi superior à do Canal de Olhão, mais largo e menos profundo.

Em termos globais, o Canal de Faro comportou-se como um canal de vazante, e mais importante a nível de trocas de matéria do que o canal de Olhão. A nível de circulação os dados sugerem que a água recircula entre a barra e os canais saindo preferencialmente em direção à Barra Faro-Olhão pelo Canal de Faro, e que pode incluir alguma contribuição da Barra do Ancão. No entanto, a contribuição do Canal de Olhão para as concentrações de nutrientes, chl *a* e SS foi máximo, o que mostra que nesta área de estudo há ocorrência de fontes externas que contribuem para o aumento destes compostos, nomeadamente remineralização de matéria orgânica no fundo, ou proveniente da inundação do sapal, de aquaculturas, ETAR na envolvência, da Ilha do Farol, entre outras.

Independentemente da situação de maré e do ano considerado, a Ria Formosa atuou como fonte de nutrientes, exportando amónia e silicatos através da barra, fertilizando e aumentando a produtividade biológica nas proximidades da zona costeira adjacente. É de salientar que a quantidade de sólidos exportados para a zona costeira adjacente, principalmente em condição de maré-viva, variou entre 150-200 toneladas. Assumindo que aproximadamente 20 % desse valor corresponde a matéria orgânica, isto representa uma exportação entre 30 a 40 toneladas de matéria orgânica, fração essa que depois de remineralizada irá fertilizar a zona costeira adjacente.

Mesmo no final da estação de outono, a ocorrência de afloramento costeiro teve um forte impacto sobre as trocas de nutrientes e clorofila *a*, entre a Ria Formosa e a zona costeira adjacente através da Barra Faro-Olhão e de ambos os canais, particularmente durante a condição de maré-viva. Nesta altura houve uma alteração do comportamento da Barra Faro-Olhão pois ocorreu uma maior importação de nitratos, de fosfatos, de silicatos e de clorofila *a*, o que contribuiu certamente para o aumento da produtividade biológica no interior da lagoa. É de referir que o Canal de Olhão exportou fosfato, silicatos e clorofila *a* durante os eventos de

afloramento costeiro, o que pode sugerir que este canal foi também influenciado pela Barra da Armona.

Em suma, a análise dos dados obtidos em condições de maré-viva e maré-morta confirmam que as condições da água na barra e nos canais são afetadas pela amplitude das marés e dependem de outros forçadores físicos condicionados por processos meteorológicos/oceanográficos. Estes resultados refletem as características dos locais na altura em que as quatro campanhas foram realizadas. No entanto, estas características podem mudar, quer devido a alterações na dinâmica de marés ou por alteração dos processos biológicos e químicos afetadas por processos atmosféricos e oceanográficos, que no presente caso foi o afloramento costeiro.

Para complementar a informação extraída deste estudo, seria muito interessante avaliar as alterações nas características físico-químicas e nos transportes de massa na mesma área de estudo, na mesma em condições de maré quinzenal opostas, mas numa situação meteorológica diferente das que se verificaram, que não promovesse uma situação de afloramento costeiro, como por ex.: influência da contracorrente que recircula no Golfo de Cádiz, imposta por relaxamento de vento ou sob influência de vento do quadrante leste (levante).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcântara, A., Cravo, A., Jacob, J., 2012. Variability of nutrients and chlorophyll a in Ancão inlet during a spring tidal cycle in April 2009. *Ciencias Marinas*, 30 (1B), 161-176.
- Almeida, C., Soares, F., 2012. Microbiological monitoring of bivalves from the Ria Formosa Lagoon (south coast of Portugal): A 20 years of sanitary survey. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 252-262.
- Álvarez-Salgado, X.A., Castro, C.G., Pérez, F.F., Fraga, F., 1997. Nutrient mineralization patterns in shelf waters of the Western Iberian upwelling. *Continental Shelf Research*, 17, 1247-1270.
- Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., deCastro, M., Dias, J.M., 2008. Spatiotemporal evolution of upwelling regime along the western coast of the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, 113 (C07020), 1-14.
- Álvarez-Salgado, X.A., Doval, M.D., Borges, A.V., Joint, I., Frankignoulle, M., Woodward, E.M.S., Figueiras, F.G., 2001. Off-shelf fluxes of labile materials by an upwelling filament in the NW Iberian Upwelling System. *Progress in Oceanography*, 51, 321-337.
- Álvarez-Salgado, X.A., Figueiras, F., Pérez, F., Groom, S., Nogueira, E., Borges, A., Chou, L., Castro, C., Moncoiffé, G., Ríos, A., Miller, A., Frankignoulle, M., Savidge, G., Wollast, R., 2003. The Portugal coastal counter current off NW Spain: new insights on its biogeochemical variability. *Progress in Oceanography*, 56, 281-321.
- American Public Health Association (A.P.H.A.), American Water Works Association and Water Environment Federation, 2002. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington, DC.
- Andrade, C.F., 1990. *O Ambiente de barreira da Ria Formosa, Algarve-Portugal*. Tese para obtenção do grau de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 645 pp.
- Aníbal, J., Rocha, C., Sprung, M., 2007. Mudflat surface morphology as a structuring agent of algae and associated macroepifauna communities: A case study in the Ria Formosa. *Journal of Sea Research*, 57, 36-46.
- Arnone, R.A., Terrie, G., Oriol, R.A., 1993. Relationships between surface chlorophyll and solar irradiance in North Atlantic. *Marine Technology Society Journal* 27, 16-23.
- Asmus, R.M., Sprung, M., Asmus, H., 2000. Nutrient fluxes in intertidal communities of a South European lagoon (Ria Formosa) – similarities and differences with a northern Wadden Sea bay (Sylt – Rømø Bay). *Hydrobiologia*, 436, 217-235.
- Barbosa, A.B., Galvão, H.M., Mendes, P.A., Álvarez-Salgado, X.A., Figueiras, F.G., Joint, I., 2001. Short-term variability of heterotrophic bacterioplankton during upwelling off the NW Iberian margin. *Progress in Oceanography*, 51, 339-359.
- Barbosa, A., 2006. *Estrutura e dinâmica da teia alimentar microbiana na Ria Formosa*. Tese para obtenção do grau de Doutoramento, Universidade do Algarve, 517 pp.

- Barbosa, A., 2009. Dynamics of living phytoplankton: implications for paleoenvironmental reconstructions. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 5, No. 1). IOP Publishing.
- Barbosa, A., 2010. Seasonal and interannual variability of planktonic microbes in a mesotidal coastal lagoon (Ria Formosa, SE Portugal): impact of climatic changes and local-human influences. *In: Coastal Lagoons: critical habitats of environmental change*, Eds.: H. Paerl and M. Kennish, CRC Press, Taylor & Francis Group, Marine Science Book Series, Boca Raton, 335-366.
- Barnes, R.S.K., 1980. *Coastal Lagoons*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bendsneider, K. & Robinson, R. J., 1952. A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea-water. *Journal of Marine Research*, 11, 87-96.
- Béthoux, J.P., Morin, P., Ruiz-Pino, D.P., 2002. Temporal trends in nutrient ratios: chemical evidence of Mediterranean ecosystem changes driven by human activity. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49 (11), 2007-2016.
- Bettencourt, A.M., Bricker, S.B., Ferreira, J.G., Franco, A., Marques, J.C., Melo, J.J., Nobre, A., Ramos, L., Reis, C.S., Salas, F., Silva, M.C., Simas, T., Wolff, W.J., 2004. *Typology and reference conditions for Portuguese transitional and coastal waters*. INAG/IMAR, Lisbon.
- Bode, A., Botas, J.A., Fernández, E., 1997. Nitrate storage by phytoplankton in a coastal upwelling environment. *Marine Biology*, 129, 399-406.
- Brito, A., Newton, A., Tett, P., Fernandes, T., 2010. Sediment and water nutrients and microalgae in a coastal shallow, Ria Formosa (Portugal): Implications for Water Framework Directive. *Journal of Environmental Monitoring*, 12 (1), 318-328.
- Brito, A., Newton, A., Fernandes, T.F., Tett, P., 2011. The role microphytobenthos on shallow coastal lagoons: a modelling approach. *Biogeochemistry*, 106, 207-228.
- Brito, A., Newton, A., Tett, P., Fernandes, T.F., 2012c. How will shallow coastal lagoon respond to climate change? A modeling investigation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 112, 98-104.
- Cabaço, S., Marchás, R., Vieira, V., Santos, R., 2008. Impact of urban wastewater discharge on seagrass meadows (*Zostera noltii*). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78, 1-13.
- Capellacci, S., Battocchi, C., Casabianca, S., Giovine, M., Bavestrello, G., Penna, A., 2012. Bioavailability of different chemical forms of dissolved silica can affect marine diatom growth. *Marine Ecology*, 1-9.
- Cardeira, S., Rita, F., Relvas, P., Cravo, A., 2013. Chlorophyll *a* and chemical signatures during and upwelling event off the South Portuguese coast (SW Iberia). *Continental Shelf Research*, 52, 133-149.



- Cardoso, A., Santos, A., Cruz, I., 2005. A Ria Formosa – uma visão global da química das águas e sedimentos. *ANAIS do Instituto Hidrográfico*, 17 (2003-2004), 7-12.
- Carrit, D.E, Carpenter, J.H., 1966. Comparison and evaluation of currently employed modifications of the Winkler method for determining dissolved oxygen in sea water. A NASCO Report. *Journal of Marine Research*, 24, 286-318.
- Carter, R.W.G., 1988. Coastal Environments: An Introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. *Academic Press*, 617pp.
- Casin, M., Mocenni, C., Paoletti, S., Pranzo, M., 2015. Decision support system development for integrated management of European coastal lagoons. *Environmental Modelling & Software*, 64, 47-57.
- Ceia, F.R., Patrício, J., Marques, J.C., Dias, J.A., 2010. Coastal vulnerability in barrier islands: The high risk areas of the Ria Formosa (Portugal) system. *Ocean & Coastal Management*, 53, 478-486.
- Cervantes- Duarte, R., Prego, R., López-López, S., Aguirre-Bahena, F., Ospina-Alvarez, N., 2013. Annual patterns of nutrients and chlorophyll in a subtropical coastal lagoon under the upwelling influence (SW of Baja- California Peninsula). *Estuarine Coastal Shelf Science*, 120, 54-63.
- Chavez, F.P., Barber, R.T., Kosro, P.M., Huyer, A., Ramp, S.R., Stanton, T.P., Rojas de Mendiola, B., 1991. Horizontal transport and the distribution of nutrients in the coastal zone off northern California: effects on primary production, phytoplankton biomass and species composition. *Journal Geophysical Research*, 96, 14833-14848.
- Cravo, A., Relvas, P., Cardeira, S., Rita, F., Madureira, M., Sánchez, R., 2010. Na upwelling filament of southwest Iberia: Effect on the chlorophyll *a* and nutrient export. *Continental Shelf Research*, 30, 1601-1613.
- Cravo, A., Jacob, J., Cardeira, S., Rosa, M., Madureira, M., Rita, F., & Luís, J., 2012. Mass exchanges between the Ria Formosa lagoon and the adjacent ocean through the Faro-Olhão inlet during a neap tide in autumn conditions, *2<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, 257–260.
- Cravo, A., Cardeira, S., Pereira, C., Rosa, M., Madureira, M., Rita, F., Luís, J., Jacob, J., 2013a. Nutrient and particulate matter exchanges through the Ria Formosa coastal lagoon, Portugal. *In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E., O’Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12<sup>th</sup> International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research*, SI 65, 1999-2004.
- Cravo, A., Relvas, P., Cardeira, S., Rita, F., 2013b. Nutrient and chlorophyll *a* transports during an upwelling event in the NW margin of the Gulf of Cadiz. *Journal of Marine Systems*, 128, 208-221.

- Cravo, A., Cardeira, S., Pereira, C., Rosa, M., Alcântara, P., Madureira, M., Rita, F., Luís, L., Jacob, J., 2014. Exchanges of nutrient and chlorophyll a through two inlets of Ria Formosa, South of Portugal, during coastal upwelling events. *Journal of Sea Research*, 93, 63-74.
- Criado-Aldeanueva, F., García-Lafuente, J., Vargas, J.M., Del Río, J., Vázquez, A., Reul, A., Sánchez, A., 2006 a. Distribution and circulation of water masses in the Gulf of Cadiz from in situ observations. *Deep Sea Research II*, 53, 1144-1160.
- Criado-Aldeanueva, F., García-Lafuente, J., Vargas, J.M., Del Río, J., Sánchez, A., Delgado, J., Sánchez, J.C., 2006 b. Wind induced variability of hydrographic features and water masses distribution in Gulf of Cadiz (SW Iberia) from in situ data. *Journal of Marine Systems*, 63, 130-140.
- Cunha, A.H., Assis, J., Serrão, E.A., 2009. Estimation of available seagrass meadow area in Portugal for transplanting purposes. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 1100-1104.
- Davidson, K., Gowen, R.J., Tett, P., Bresnam, E., Harrison, P.J., McKinney, A., Milligan, S., Mills, D.K., Silk, J., Crooks, AM., 2012. Harmfull algae bloom: How stray is the evidence that nutrient ratios and forms influence their occurrence?. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 115, 399-413.
- Dias, J.M.A., Boski, T., Rodrigues, A., Magalhães, F., 2000. Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial maximum until present – a synthesis. *Marine Geology*, 170, 177-186.
- Dias, J. M., Sousa, M. C., Bertin, X., Fortunato, a B., & Oliveira, A., 2009. Numerical modeling of the impact of the Ancão Inlet relocation (Ria Formosa, Portugal). *Environmental Modelling Software*, 24, 711-725.
- Duarte, P., Azevedo, B., Guerreiro, M., Ribeiro, C., Bandeira, R., Pereira, A., Falcão, M., Serpa, D., Reia, J., 2008. Biogeochemical modelling of Ria Formosa (South Portugal). *Hydrobiologia*, 611, 115-132.
- Dugdale, R.C., Wilkerson, F.P., Morel, A., 1990. Realization of new production in coastal upwelling areas: a means to compare relative performance. *Limnology & Oceanography*, 35, 822-829.
- Estrada, M., Blasco, D., 1985. Phytoplankton assemblages in coastal upwelling areas. *In: International Symposium on the upwelling areas off Western Africa*, Eds.: Bas, C., Margalef, R., Rubies, P., Instituto de Investigaciones Pesqueras, Barcelona, 1, 379-402.
- Fabião, J., Rodrigues, M., Fortunato, A.B., Jacob, J., Cravo, A. (in press). Water exchanges between a multi-inlet lagoon and the ocean: the role of forcing mechanisms. *Ocean Dynamics* (accepted for publication November 2015).
- Falcão, M., Vale, C., 1990. Study of the Ria Formosa ecosystem: benthic nutrient remineralization and tidal variability of nutrients in the water. *Hydrobiologia*, 207, 137-146.

- Falcão, M. 1997. *Dinâmica de nutrientes na Ria Formosa: interação da laguna com as suas interfaces na reciclagem de azoto, fósforo e sílica*. Tese de Doutoramento. Universidade do Algarve, Faro, 223 pp.
- Falcão, M., Vale, C., 2003. Nutrient Dynamics in a coastal lagoon (Ria Formosa, Portugal): the importance of lagoon-sea water exchanges on the biological productivity. *Ciencias Marinas*, 29, 425-433.
- Fawcett, S.E., Ward, B.B., 2011. Phytoplankton succession and nitrogen utilization during the development of an upwelling bloom. *Marine Evology Progress Series*, 428, 13-31.
- Fommervault, O.P., Migon, C., D'Ortenzio, F., Ribeira d'Alcalá, M., Coppola, L., 2015. Temporal variability of nutrient concentration in the northwestern Mediterranean sea (DYFAMED time-series station). *Deep-Sea Research I*, 100, 1-12.
- Frigstad, H., Andersen, T., Hessen, D.O., Naustvoll, L.J., Johnsen, T.M., Bellerby, R.G.J., 2011. Seasonal variation in marine C:N:P stoichiometry: can the composition of seston explain stale Redfield ratios?. *Biogeosciences*, 8, 2917-2933.
- Gamito, S., Patrício, J., Neto, J.M., Marques, J.C., Teixeira, H., 2012. The importance of habitat-type for defining the reference conditions and the ecological quality status based on benthic invertebrates: The Ria Formosa coastal lagoon (Southern Portugal). *Ecological Indicators*, 19, 61-72.
- García-Lafuente, J., Delgado, J., Criado-Aldeanueva, F., Bruno, M., Rio, J., Vargas, J.M., 2006. Water mass circulation on the continental shelf of the Gulf of Cadiz. *Deep Sea Research II*, 53, 1182-1197.
- Garel, E., Laiz, I., Drago, T., Relvas, P. (2016). Characterisation of coastal counter-currents on the inner shelf of the Gulf of Cadiz. *Journal of Marine Systems*, 155, 19-34.
- Grasshoff, K. 1983. *Methods of seawater analysis*. Verlag Chemie, Weinheim, New York, 419 pp.
- Guimarães, M.H.M.E., Cunhas, A.H., Nzinga, R.L., Marques, J.F., 2012. The distribution of seagrass (*Zostera noltii*) in the Ria Formosa lagoon system and the implications of clam farming on its conservation. *Journal of Nature Conservation*, 20, 20-30.
- Howarth, R.W., Marino, R., 2006. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades. *Limnology & Oceanography*, 51, 364-376.
- IH, 2000. Instituto Hidrográfico. Relatório de Progresso dos Trabalhos, Rel. PT. 0606/2000 – Monitorização Ambiental da Ria Formosa, 1999. Relatório Técnico, 24 pp.
- Jacob, J., Cardeira, S., Rodrigues, M., Bruneau, N., Azevedo, A., Fortunato, A. B., Rosa, M., Cravo, A., 2013. Experimental and numerical study of the hydrodynamics of the western sector of Ria Formosa. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E., O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12<sup>th</sup> International Coastal Symposium (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, 65, 2011–2016.

- Jacob, J., Simões, N. e Cravo, A., 2014. Influência e propagação no interior da Ria Formosa dos processos oceanográficos de mesoescala na costa sul de Portugal. *3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, 171-174.
- Johnson, K.S., 2010. Simultaneous measurements of nitrate, oxygen, and carbon dioxide on oceanographic moorings: observing the Redfield ratio in real time. *Limnology & Oceanography*, 55(2), 615-627.
- Kaiser, M.J., Attril, M.J., Jennings, S., Thomas, D.N., Barnes, D.K.A., Brierley, A.S., Hiddink, J.G., Kaartokallio, H., Polunin, N.V.C & Raffaelli, D.G., 2011. *Marine Ecology: processes, systems, and impacts*, 2<sup>nd</sup> Ed., Oxford University Press, 501 pp.
- Kennish, M.J., Pearl, H.W., 2010. Coastal lagoons critical habitats of environmental change. *In: Coastal Lagoons: critical habitats of environmental change*, Eds.: H. Paerl and M. Kennish, CRC Press, Taylor & Francis Group, Marine Science Book Series, Boca Raton, 335-366.
- Kjerfve, B., 1994. *Coastal lagoons*. *In: Coastal Lagoons Processes*, Ed.: B. Kjerfve, Elsevier Science Publishers B. V., Elsevier Oceanography Series, Amsterdam, 1-8.
- Leví, M., 2008. The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence. *Lecture Notes in Physics*, 744, 219-261.
- Libes, S., 1992. *An introduction to marine biogeochemistry*, John Wiley & Sons, Inc, Singapore, 734 pp.
- Lorenzen Carl J., 1967. Vertical distribution of chlorophyll and phaeo-pigments: Baja California. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 14 (6): 735-745.
- Loureiro, S., Newton, A., Icely, J., 2005. Effect of nutrients enrichments on primary production in the Ria Formosa coastal lagoon (Southern Portugal). *Hydrobiologia*, 550, 29-45.
- Loureiro, S., Newton, A., & Icely, J., 2006. Boundary conditions for the European Water Framework Directive in the Ria Formosa lagoon, Portugal (physico-chemical and phytoplankton quality elements). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67, 382-398.
- Manzolini, R.P., Portz, L., Paiva, M., 2011. Oceanografia Química. *In: Estudos Oceanográficos: do instrumental ao prático*, Ed.: D. Calazans, Editora Textos, 462 pp.
- Martins, F., Pina, P., Calado, S., Delgado, S., Neves, R., 2003. A coupled hydrodynamics and ecological model to manage water quality in Ria Formosa coastal lagoon. *Advances in Ecological Science*, 18, 93-100.
- Matias, A., Ferreira, Ó., Vila-Concejo, A., Garcia, T., & Dias, J. A., 2008. Classification of washover dynamics in barrier islands. *Geomorphology*, 97, 655-674.
- McLusky, D.S., Elliott, M., 2007. Transitional waters: a new approach, semantics or just muddying the waters? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71, 359-363.

- Meyeres, L., Pedro, P., Beltrão, J., Gliesche, C., Dionisio, L., 2010. Anthropogenic effects in a coastal lagoon (South Portugal) related to tidal and special changes in nutrients. *Wseas Transactions on Environment and Development*, 6, 529-537.
- Millero, F.J., 2013. *Chemical Oceanography*, 4<sup>th</sup> edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 571 pp.
- Moita, T., 2001. *Estrutura, Variabilidade e Dinâmica do Fitoplâncton na costa de Portugal Continental*. Tese para obtenção do grau de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 238 pp.
- Mudge, S.M., Icely, J.D., Newton, A., 2008. Residence times in a hypersaline lagoon: Using salinity as a tracer. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77, 278-284.
- Navarro, G., Ruiz, J., Huertas, I.E., García, C.M., Criado-Aldeanueva, F., Echevarría, F., 2006. Basin-scale structures governing the position of the deep fluorescence maximum in the Gulf of Cádiz. *Deep-sea Research II*, 53, 1261-1281.
- Navarro, G., Ruiz, J., 2006. Spatial and temporal variability of phytoplankton in the Gulf of Cádiz through remote sensing images. *Deep Sea Research II*, 53, 1241-1260.
- Newton, A. 1995. *The water quality of the Ria Formosa lagoon, Portugal*. Dissertation submitted to the School of Ocean Sciences in candidacy for the degree of Doctor of Philosophy, Menai Bridge, U.K, 226 pp.
- Newton, A., Icely, J.D., 2002. Impact of Coastal Engineering on the Water Quality of the Ria Formosa Lagoon, Portugal. Littoral, 6<sup>th</sup> International Conference (Porto, Portugal), EUROCOAST Portugal Association.
- Newton, A., & Mudge, S. M., 2003. Temperature and salinity regimes in a shallow, mesotidal lagoon, the Ria Formosa, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(1-2), 73–85.
- Newton, A., Icely, J.D., Falcão, M., Nobre, A., Nunes, J.P., Ferreira, J.G., Vale, C., 2003. Evaluation of eutrophication in the Ria Formosa coastal lagoon, Portugal. *Continental Shelf Research*, 23, 1945-1961.
- Newton, A., Icely, J.D., 2004. Oceanographic Applications to Eutrophication on Tidal, Coastal Lagoons, the Ria Formosa, Portugal. *Journal of Coastal Research*, 39, 1346-1350.
- Newton, A., Mudge, S., 2005. Lagoon-sea exchanges, nutrient dynamics and water quality management of the Ria Formosa (Portugal). *Estuarine, Coastal Shelf Science*, 62, 405-414.
- Newton, A. and J. D. Icely. 2006. Oceanographic applications to eutrophication in a tidal, coastal lagoon, the Ria Formosa, Portugal. *Journal Coastal Research* 3 (SI 39): 1346–1350.

- Newton, A., Oliveira, P.S., Icely, J.D., Foster, P.A., 2009. Monitoring of oxygen conditions in the Ria Formosa coastal lagoon, Portugal. *Journal of Environmental Monitoring*, 12, 355-360.
- Opfergelt, S., Delmelle, P., 2012. Silicon isotopes and continental weathering processes: Assessing control on Si transfer to the ocean. *Comptes Rendus Geoscience*, 344, 723-738.
- Ounissi, M., Ziouch, O.R., Aounallah, O., 2014. Variability of the dissolved nutrient (N, P, Si) concentrations in the Bay of Annaba in relation to the inputs of the Seybouse and Mafragh estuaries. *Marine Pollution Bulletin*, 80 (1-2), 234-244.
- Pacheco, A., Carrasco, A.R., Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., Dias, J.M.A., 2007. A coastal management program for channels located in backbarrier systems. *Ocean & Coastal Management*, 50, 119-143.
- Pacheco, A., Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., & Dias, J. A., 2008. Assessment of tidal inlet evolution and stability using sediment budget computations and hydraulic parameter analysis. *Marine Geology*, 247, 104–127.
- Pacheco, A., Ferreira, Ó., Williams, J. J., Garel, E., Vila-Concejo, A., & Dias, J. A., 2010. Hydrodynamics and equilibrium of a multiple-inlet system. *Marine Geology*, 274(1-4), 32–42.
- Pacheco, A., Williams, J.J., Ferreira, Ó., Garel, E., Reynolds, S., 2011. Applicability of sediment transport models to evaluate medium term evolution of tidal inlet systems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 96, 119–134.
- Pacheco, A., Ferreira, Ó., Carballo, R., & Iglesias, G., 2014. Evaluation of the production of tidal stream energy in an inlet channel by coupling field data and numerical modeling. *Energy*, 71, 104-117.
- Parsons, T.R., Moita, Y. & Lalli, C.M., 1984. *A manual of Chemical and Biological methods for seawater analysis*, Pergaman Press, 173pp.
- Penna, N., Capellacci, S., Ricci, F., 2004. The influence of the Po River discharge on phytoplankton bloom dynamics along the coastline of Pesaro (Italy) in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 48, 321-326.
- Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C., Pérez-Ruzafa, I.M., Pérez-Marcos, M., 2013. Are coastal lagoons physically or biologically controlled ecosystems? Revisiting r vs. K strategies in coastal lagoons and estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 132, 17-33.
- Peter, B., Sreeraj, P., Kumar, K., 2005. Structure and variability of the Leeuwin Current in the south eastern Indian Ocean. *Journal Indian Geophysics Union*, 9 (2), 107-119.
- Redfield, A.C., 1963. The influence of organisms on the composition of seawater. In: *The Sea*, Ed.: Hill, M.N., John Wiley, New York, volume II, 26-77.

- Relvas, P., Barton, E.D., 2002. Mesoscale patterns in the Cape São Vicente (Iberian Peninsula) upwelling region. *Journal of Geophysical Research*, 107 (C10), 3164 (28 (1-23)).
- Reul, A., Munõz, M., Criado-Aldenueva, F., Rodríguez, V., 2006. Spatial distribution of phytoplankton < 13 µm in the Gulf of Cadiz in relation to the water masses and circulation pattern under westerly and easterly wind regimes. *Deep Sea Research II*, 53, 1294-1313.
- Rosa, M., 2007. *Caracterização físico-química da contracorrente na costa sul da Península Ibérica*, Relatório Técnico-científico, Licenciatura de Oceanografia, Universidade do Algarve, 68 pp.
- Salles, P., 2001. Hydrodynamic controls on multiple tidal inlet persistence. PhD Thesis Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution (272 pp.).
- Salles, P., Voulgaris, G., & Aubrey, D. G., 2005. Contribution of nonlinear mechanisms in the persistence of multiple tidal inlet systems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65, 475-491.
- Serpa, D., D. Jesus, M. Falcão, and L. Cancela da Fonseca. 2005. *Ria Formosa ecosystem: Socio-economic approach*. Relatório Científico Técnico IPIMAR, Série digital, n.º 28.
- Serpa, D., Falcão, M., Duarte, P., Fonseca, L.C., Vale, C., 2007. Evaluation of ammonium and phosphate release from intertidal and subtidal sediments of a shallow coastal lagoon (Ria Formosa-Portugal): a modeling approach. *Biogeochemistry*, 82, 291-304.
- Shinn, M.B., 1941. Colorimetric Method for Determination of Nitrate. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 13 (1), 33-35.
- Shinn, M.B., 1941. Colorimetric Method for Determination of Nitrate. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 13 (1), 33-35.
- Silva, A., Palma, S., Oliveira, P.B., Moita, M.T., 2009. Composition and interannual variability of phytoplankton in a coastal upwelling region (Lisbon Bay, Portugal). *Journal Sea Research*, 62, 238-249.
- Sin, Y., Hyun, B., Jeong, B., Soh, H.Y., 2013. Impacts of eutrophic freshwater inputs on water quality and phytoplankton size structure in a temperate estuary altered by a sea dike. *Marine Environmental Research*, 85, 54-63.
- Sin, Y., Hyun, B., Jeong, B., Soh, H.Y., 2013. Impacts of eutrophic freshwater inputs on water quality and phytoplankton size structure in a temperate estuary altered by a sea dike. *Marine Environmental Research*, 85, 54-63.
- Smith, N.P., 2001. Seasonal-scale transport patterns in a multi-inlet coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52, 15-28.

- Soares, C., Onofre, J., Grade, N., 2001. Caracterização Hidrodinâmica do Sistema de Barras da Ria Formosa. Actas das 2<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeiras e Portuárias (Sines, Portugal), Associação Internacional de Navegação, CD-ROM, 14 pp.
- Sontek, 2005. Current Surveyor System Manual: Software Version 4.30. San Diego, California, 160 pp.
- Sprung, M. 1994. High larval abundances in the Ria Formosa (Southern Portugal): Methodological or local effect? *Journal Plankton Research* 16: 151–160.
- Sprung, M., H. Asmus, and R. Asmus. 2001. Energy flow in benthic assemblages of tidal basins: Ria Formosa (Portugal) and Sylt-Romo Bay (North Sea) compared. Pp. 237–254. In: K. Reise (ed.), *Ecological comparisons of sedimentary shores*. Ecological Studies, Volume 151. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Statham, P., 2012. Nutrients in estuaries – An overview and the potential impacts of climate change. *Science of the Total Environment*, 434, 213-227.
- Turner, R.E., 2002. Element Ratios and Aquatic Food Webs. *Estuaries*, 25 (4b), 694-703.
- Valiela, I., 1995. *Marine ecological processes*, 2<sup>nd</sup> edition, Springer-Verlag, 686pp.
- Varney, M.S., 2000. *Chemical Sensors in Oceanography*, volume 1, Gordon and Breach Science Publishers, 333 pp.
- Vieillard, A.M., Fulweiler, R.W., Hughes, Z.J., Carey, J.C., 2011. The ebb and flood of silica: quantifying dissolved and biogenic silica fluxes from a temperate salt marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95, 415-423.
- Vila-Concejo, A., Matias, A., Pachaco, A., Ferreira, Ó., Dias, J.A., 2006. Quantification of inlet-related hazards in barrier Island systems. An example from the Ria Formosa (Portugal). *Continental Shelf Research*, 26, 1045-1060.
- Vollenweider, R.A., Giovanardi, F., Montanari, G., Rinaldi, A., 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 9, 329-357.
- Wilkerson, F.P., Lassiter, A.M., Dugdale, R.C., Marchi, A., Hogue, V.E., 2006. The phytoplankton bloom response to wind events and upwelling nutrients during the CoOP WEST study. *Deep Sea Research II*, 53, 3023-3048.