

**Análise do potencial de crescimento de mexilhões azuis  
em estuários**

**Diogo João Correia Lourenço**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia do Ambiente**

Orientadores: Prof. Dr. Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Dr. Lúgia Laximi Machado de Amorim Pinto

**Júri**

Presidente: Prof. Dr. Tiago Morais Delgado Domingos

Orientador: Prof. Dr. Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Vogais: Dr. Gonçalo Marques

**Outubro 2021**

## Abstract

*Mytilus edulis*, also known as the blue mussel, is a mussel species cultivated in Europe, but its aquaculture production has declined in recent decades. Investing in blue mussel aquaculture production practices in Portugal's coastal regions and estuaries is an important step toward reversing Europe's blue mussel production decline, and the planning of these practices begins with the study of the growth potential in these regions.

The potential growth of blue mussels is studied in two estuarine systems in this project: a schematic estuary and the Tagus estuary. Using MOHID *Water*, a numerical model, the analysis is carried out by simulating the physical and biogeochemical processes in each estuary, as well as bivalve growth in mussel beds. The mathematical formulation used to simulate the development and metabolism of mussels is described by the *DEB* model, which relates the evolution of the organism's individual state variables, such as reserve or structure, to environmental conditions, such as food availability.

Phytoplankton concentration directly impacts the amount of energy that is assimilated to the mussels' reserve, and the mobilization rate of energy that is invested in the organism's metabolic needs is dependent on the level of reserve and structure of the mussels.

The mussel beds in the Tagus estuary demonstrate potential growth suitable for commercialization. These findings can be used to plan the implementation of blue mussel aquaculture cultivation systems.

Keywords: mussels; aquaculture; numerical modelling; *Mytilus edulis*; estuary

## Resumo

*Mytilus edulis*, conhecido por mexilhão-azul, é uma espécie de mexilhão cultivada na Europa, no entanto, a sua produção em aquacultura tem reduzido ao longo das últimas décadas. O investimento em práticas de cultivo de mexilhão azul em aquacultura na costa marítima e em estuários de Portugal é um importante passo para contrariar o declínio da sua produção na Europa, e o planeamento destas práticas começa com o estudo do potencial de crescimento nestas regiões.

O potencial de crescimento do mexilhão azul é estudado em dois sistemas estuarinos neste projeto: um estuário esquemático e o estuário do Tejo. Utilizando o *MOHID Water*, um modelo numérico, a análise é realizada simulando os processos físicos e biogeoquímicos em cada estuário, bem como o crescimento de bivalves em bancos de cultivo. A formulação matemática utilizada para simular o desenvolvimento e metabolismo dos mexilhões é descrita pelo modelo *DEB*, que relaciona a evolução de variáveis de estado do indivíduo, como a reserva ou a estrutura, e condições ambientais, como a disponibilidade de alimento.

A concentração de fitoplâncton impacta diretamente a quantidade de energia assimilada para a reserva do mexilhão, e a taxa de mobilização de energia investida nos setores metabólicos do organismo, depende dos seus níveis de reserva e estrutura.

No estuário do Tejo, os mexilhões dos bancos de cultivo demonstram potencial de crescimento satisfatório para a sua comercialização. Estes resultados são úteis no planeamento de projetos de implementação de sistemas de produção destes bivalves em aquacultura.

Palavras-chave: mexilhões; aquacultura; modelação numérica; *Mytilus edulis*; estuário.

## Índice

Abstract.....	ii
Resumo .....	iii
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vii
Tabela de Abreviaturas .....	viii
1 – Introdução.....	1
2 – Estado-de-arte .....	2
2.1 – Hidrodinâmica em Oceanos e Estuários .....	2
2.1.1 – Biogeoquímica oceânica e nutrientes .....	2
2.1.2 – Estuários .....	4
2.2 – Bivalves.....	5
2.3 – <i>Mytilus edulis</i> .....	6
2.4 – Aquacultura de Mexilhões .....	7
3 – Metodologia.....	10
3.1 – Descrição do Modelo Numérico.....	10
3.2 – Equações .....	12
3.2.2 – Módulo <i>Bivalve</i> .....	12
3.3 – Aplicação do Modelo Numérico .....	21
3.4 – Dados e Parametrização .....	22
4 – Análise e Discussão de Resultados .....	24
4.1 – Estuário Esquemático .....	24
4.1.1 – Descrição do Estuário .....	24
4.1.2 – Fatores que Condicionam a Produção .....	29
4.1.3 – Identificação e Seleção de Locais para Cultivo .....	31
4.1.4 – Análise do Crescimento de Mexilhões.....	32
4.2 – Estuário do Tejo.....	50
4.2.1 – Descrição do Estuário .....	50
4.2.2 – Fatores que Condicionam a Produção .....	53
4.2.3 – Seleção de Locais para Cultivo.....	55
4.2.4 – Análise do Crescimento de Mexilhões.....	56
5 – Conclusão.....	63
6 – Bibliografia .....	64

## Índice de Figuras

Figura 1 - Ilustração da bomba biológica nos oceanos. Fonte: <a href="https://rapid.ac.uk/abc/bg/bcp.php">https://rapid.ac.uk/abc/bg/bcp.php</a> .....	3
Figura 2 - Foto de mexilhões azuis, tirada em New Jersey, no Seaside Park (Photo Ark Home Blue Mussels   National Geographic Society) .....	6
Figura 3 - Esquema de cultivo de mexilhões long-line, com duas configurações possíveis. Fonte: <a href="https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-basic-mussel-longline-system-The-two-most-common-systems-used-in-Canada_fig1_238731789">https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-basic-mussel-longline-system-The-two-most-common-systems-used-in-Canada_fig1_238731789</a> .....	8
Figura 4 - Esquema de uma cultura em jangada. Fonte: <a href="https://www.researchgate.net/figure/Raft-for-adult-freshwater-pearl-mussel-culture-Kovitvadi-2008_fig2_221923318">https://www.researchgate.net/figure/Raft-for-adult-freshwater-pearl-mussel-culture-Kovitvadi-2008_fig2_221923318</a> .....	8
Figura 5 - Cultura Bouchout em França. Fonte: <a href="https://www.sciencephoto.com/media/390676/view/mussel-growing-france">https://www.sciencephoto.com/media/390676/view/mussel-growing-france</a> .....	9
Figura 6 - Esquema do Modelo Individual para o Bivalve. Retângulos com linha contínua representam compartimentos de massa, e retângulos com linha tracejada representam investimento energético. Elipses representam os principais processos metabólicos do organismo. Setas representam fluxos de massa, entre os compartimentos do indivíduo ou com o exterior. Saraiva et al. (2012) .....	12
Figura 7 - Batimetria variável do estuário.....	24
Figura 8 - Mapas de temperatura da água para os dias: a) 01 de Janeiro; b) 01 de Março; c) 01 de Junho .....	25
Figura 9 - Mapas de temperatura da água para os dias: d) 01 de Agosto; e) 01 de Setembro; f) 01 de Dezembro .....	26
Figura 10 - Concentração de nitrato no estuário em: a) 8 de Janeiro; b) 24 de Maio; c) 8 de Outubro; d) 15 de Dezembro .....	28
Figura 11 - Concentração de fitoplâncton no estuário em: a) 18 de Março; b) 17 de Junho.....	29
Figura 12 - Concentração de fitoplâncton no estuário em: c) 22 de Setembro; d) 10 de Novembro ...	30
Figura 13 – Campo de velocidades no estuário em: a) 24 de Janeiro; b) 9 de Abril .....	30
Figura 14 - Campo de velocidades no estuário em: c) 21 de Julho; d) 16 de Outubro .....	31
Figura 15 - Seleção de locais para sistemas de cultivo .....	32
Figura 16 - Comprimento dos mexilhões nos bancos de cultivo do estuário, em: a) 1 de Abril; b) 1 de Agosto.....	33
Figura 17 - Comprimento dos mexilhões nos bancos de cultivo do estuário, em: c) 1 de Outubro; d) 1 de Dezembro .....	34
Figura 18 - Séries temporais para o comprimento de mexilhões nos bancos de cultivo.....	35
Figura 19 - Concentração de fitoplâncton nos bancos de cultivo .....	36
Figura 20 - Concentração de sedimentos coesivos nos bancos de cultivo.....	36
Figura 21 - Evolução da reserva nos mexilhões nos bancos de cultivo .....	38
Figura 22 - Evolução da Temperatura nos bancos de cultivo .....	39
Figura 23 - Evolução de maturidade nos bancos de cultivo .....	40
Figura 24 - Evolução do buffer reprodutivo nos bancos de cultivo .....	41
Figura 25 - Número de ovos libertados nos eventos de desova .....	42
Figura 26 - Número de ovos libertados nos eventos de <i>spawning</i> para nova estrutura de mexilhão recém-nascido.....	44
Figura 27 - Evolução da concentração de amónia nos bancos de cultivo .....	45
Figura 28 - Evolução populacional nos bancos de cultivo .....	47
Figura 29 - Comparação de nível de fitoplâncton entre simulações no banco de cultivo Este .....	47
Figura 30 - Comparação de comprimento de mexilhões entre simulações no banco de cultivo Este ..	48
Figura 31 - Evolução do comprimento dos mexilhões em estado larval para cada banco de cultivo ...	49
Figura 32 - Batimetria do estuário do Tejo. O círculo de contorno a vermelho indica a única descarga considerada nesta análise, proveniente do rio Tejo. A batimetria foi determinada a partir de dados do Instituto Hidrográfico ( <a href="https://www.hidrografico.pt/op/33">https://www.hidrografico.pt/op/33</a> ) .....	50
Figura 33 - Mapas de temperatura no estuário do Tejo, para as datas: a) 15 de Janeiro; b) 25 de Março; c) 5 de Junho; d) 20 de Agosto; e) 10 de Novembro; f) 26 de Dezembro .....	52
Figura 34 - Mapas de concentração de fitoplâncton no estuário do Tejo, para as datas: a) 22 de Janeiro; b) 20 de Março; c) 14 de Junho; d) 12 de Agosto; e) 8 de Novembro; f) 19 de Dezembro ...	54

Figura 35 - Mapas de velocidade de escoamento no estuário do Tejo, para as datas: a) 29 de Janeiro; b) 28 de Junho; c) 4 de Dezembro .....	55
Figura 36 - Localização dos bancos de cultivo. Banco a norte é identificado como banco do estuário e o banco a sul é identificado como banco oceânico .....	56
Figura 37 - Evolução do comprimento dos mexilhões nos bancos de cultivo .....	57
Figura 38 - Evolução da disponibilidade de fitoplâncton para os bancos de cultivo .....	58
Figura 39 - Evolução do comprimento dos mexilhões dos bancos de cultivo para os dois anos de simulação .....	59
Figura 40 - Evolução da disponibilidade de fitoplâncton nos bancos de cultivo para os dois anos de simulação .....	59
Figura 41 - Evolução da concentração de fitoplâncton nos bancos de cultivo ao longo dos dois anos de simulação .....	61

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Variáveis de Estado do Modelo e Formulações. Saraiva et al. (2012) .....	13
Tabela 2 - Formulações do modelo individual (continuação).....	14
Tabela 3 - Formulação para correção de Arrhenius. Kooijman (2000) .....	15
Tabela 4 - Formulações do processo de filtração imposta. ....	15
Tabela 5 - Formulações do processo de filtração simples. Kooijman (2006) .....	16
Tabela 6 - Formulações do processo de filtração complexa. $X_0$ representa a concentração de material inorgânico, enquanto $X_1$ representa a concentração de algas, fonte de alimento dos bivalves considerada no modelo. Saraiva et al. (2012) .....	17
Tabela 7 - Formulações do processo de filtração complexa, no caso de assimilação complexa. ....	17
Tabela 8 - Parâmetros auxiliares à interpretação do modelo. Saraiva et al. (2012) .....	18
Tabela 9 - Formulações do Modelo Populacional. * representa os predadores, que podem ser camarões, caranguejos ou aves, representados pelas letras S, C e B, respetivamente. Saraiva et al. (2014) .....	19
Tabela 10 - Formulações do Modelo Populacional (continuação). * representa os predadores, que podem ser camarões, caranguejos ou aves, representados pelas letras S, C e B, respetivamente. Saraiva et al. (2014) .....	20
Tabela 11 - Parâmetros relativos à espécie de mexilhão <i>Mytilus edulis</i> .....	22
Tabela 12 - Parâmetros relativos à espécie de mexilhão <i>Mytilus edulis</i> (continuação).....	23
Tabela 13 - Temperaturas e caudais das descargas dos rios, ao longo do ano .....	27
Tabela 14 - Propriedades no estuário (iniciais), descargas e condições fronteira. ....	27
Tabela 15 - Parâmetros de quantidade de reserva para um mexilhão recém-nascido .....	43
Tabela 16 - Parâmetros de mortalidade e predação.....	46
Tabela 17 - Valores médios mensais de caudal e temperatura na descarga do rio Tejo.....	51
Tabela 18 - Propriedades do estuário do Tejo .....	53

## Tabela de Abreviaturas

DEB	<i>Dynamic Energy Budget</i>
GSR	Índice Gonado-Somático (do inglês <i>Gonadal-Somatic Ratio</i> )
DON	Azoto Orgânico Dissolvido (do inglês <i>Dissolved Organic Nitrogen</i> )
DONnr	Azoto Orgânico Dissolvido Não-refratário (do inglês <i>Non-refractory Dissolved Organic Nitrogen</i> )
DONr	Azoto Orgânico Dissolvido Refratário (do inglês <i>Refractory Dissolved Organic Nitrogen</i> )
DOP	Fósforo Orgânico Dissolvido (do inglês <i>Dissolved Organic Phosphorous</i> )
DOPnr	Fósforo Orgânico Dissolvido Não-refratário (do inglês <i>Non-refractory Dissolved Organic Phosphorous</i> )
DOPr	Fósforo Orgânico Dissolvido Refratário (do inglês <i>Refractory Dissolved Organic Phosphorous</i> )
PON	Azoto Orgânico Particulado (do inglês <i>Particulate Organic Nitrogen</i> )
POP	Fósforo Orgânico Particulado (do inglês <i>Particulate Organic Phosphorous</i> )
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais

## 1 – Introdução

O mexilhão-azul, *Mytilus edulis* (ver figura 2), é a segunda espécie de mexilhão com maior importância económica cultivada na Europa, no entanto a sua produção em aquacultura tem reduzido na Europa durante as últimas décadas, contrariamente à produção a nível global, que é crescente (Avdelas et al., 2020; Saurel et al., 2022). O declínio na produção de mexilhões na Europa não é apenas centrado no mexilhão azul. A produção total de mexilhões em aquacultura atingiu máximos na Europa no final da década de 1990, com mais de 600 000 toneladas por ano, mas em 2016 a produção anual baixou para cerca de 480 000 toneladas (Avdelas et al., 2020). Esta redução de produção contribui para a estagnação do setor de aquacultura na Europa.

O investimento em atividades de cultivo de mexilhão azul, tal como de outras espécies, contraria a estagnação deste setor económico, e em Portugal, o estudo do potencial de crescimento de bivalves é um dos primeiros passos no planeamento de atividades de produção em aquacultura e a sua implementação ao longo da costa marítima e em estuários.

Neste trabalho pretende-se simular as condições hidrodinâmicas e biogeoquímicas em estuários — um esquemático e o estuário do Tejo — e em regiões oceânicas próximas de estuários e, nas zonas com condições favoráveis, simular o crescimento de mexilhões azuis em bancos de cultivo. As simulações são realizadas com o MOHID *Water*, um modelo numérico utilizado para descrever processos físicos e biogeoquímicos em sistemas marinhos. No estuário do Tejo, os resultados das simulações do potencial de crescimento de mexilhões azuis podem servir como ferramentas de apoio ao planeamento de projetos relacionados com a implementação de sistemas de cultivo em aquacultura.

Os resultados deste trabalho servem como base para o estudo da produção de bivalves em Portugal, nomeadamente no estuário do Tejo, e também na região costeira adjacente, onde atualmente se procede apenas à apanha de um grupo de bivalves, sob condições que não permitem o total aproveitamento do potencial de crescimento e produção da região. Este grupo de bivalves inclui mexilhões do género *Mytilus*, segundo o mapa das zonas de produção de bivalves do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), sem detalhar se mexilhões da espécie estudada são ou não produzidos nesta região.

## 2 – Estado-de-arte

### 2.1 – Hidrodinâmica em Oceanos e Estuários

#### 2.1.1 – Biogeoquímica oceânica e nutrientes

Nos oceanos, os nutrientes são distribuídos, e a sua concentração afetada, por processos físicos ou bioquímicos (Garcia et al., 2013). A circulação oceânica e processos de *upwelling*, mistura convectiva ou deposição atmosférica de nutrientes são alguns destes mecanismos, responsáveis por repor os níveis de nutrientes, como o azoto, o fósforo ou o carbono, na camada superficial dos oceanos, onde são esgotados por atividade biológica (Letscher et al., 2016).

Nos sistemas marinhos as funções de cada nível trófico, como produtores, consumidores ou decompositores, e as suas interações, são caracterizadas por fluxos de nutrientes (Vichi et al., 2007). Bristow et al. (2017) caracterizam o fitoplâncton como base das teias tróficas dos sistemas marinhos e responsável pelo sequestro de cerca de metade do CO<sub>2</sub> global, regulando a sua concentração na atmosfera e o clima da Terra. O fitoplâncton é autotrófico e o seu crescimento e atividade metabólica dependem diretamente da luz solar (estando por isso presente na zona eufótica dos oceanos onde há penetração de luz), mas também da presença de nutrientes, assegurada por processos de reciclagem, reintrodução, proveniente de águas profundas, ou de fonte externa. Bristow et al. (2017) indicam ainda que o fornecimento externo destes nutrientes, como o azoto, o fósforo, o ferro ou a sílica pode ocorrer através da costa, rios ou deposição atmosférica, e o seu principal meio de remoção é a sedimentação de matéria particulada. O azoto, no entanto, apresenta também o sequestro de N<sub>2</sub> como fonte biológica, e os processos de desnitrificação e *anammox*, como meios de remoção biológica.

O fitoplâncton apresenta na sua biomassa uma composição de carbono (C), azoto (N) e fósforo (P), com relação atômica média de 106C:16N:1P, muito semelhante à relação destes mesmos nutrientes verificada no oceano (Redfield, 1958). Esta relação, denominada de relação de *Redfield*, foi obtida através de análise de fitoplâncton, e desvios deste rácio são normalmente indicativos de um nutriente limitante para o crescimento do fitoplâncton (Atkinson & Smith, 1983), crescimento esse que ocorre a taxa máxima quando a relação de Redfield apresenta o rácio mencionado (Goldman et al., 1979).

O papel do ciclo do azoto à escala global é fulcral para a biogeoquímica dos oceanos (Fowler et al., 2013). O azoto é integrado na estrutura de aminoácidos e compostos oxidados, e o seu retorno para a atmosfera é assegurado por processos de desnitrificação (Galloway et al., 2004).

Segundo Brandes et al. (2007), nos sistemas marinhos apresentam-se 5 formas de azoto molecular: N<sub>2</sub>, uma molécula estável e difícil de quebrar; o nitrato (NO<sub>3</sub>), a molécula de azoto mais oxidada; o ião amónio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), a forma mais reduzida, muito presente em ambientes anóxicos; azoto particulado, presente em sedimentos, sobretudo como azoto orgânico (PON); e azoto orgânico dissolvido (DON).

Tal como o azoto, o fósforo é também um nutriente essencial para a vida, e faz parte da composição de moléculas, como os ácidos nucleicos, DNA e RNA, o ATP, molécula responsável por transferência

de energia em processos metabólicos, ou ainda os fosfolípidos, que compõem as membranas celulares das células (Ruttenberg, 2001).

Paytan e McLaughlin (2007) indicam que, nos oceanos, o fósforo encontra-se sob a forma dissolvida e particulada. Na fração dissolvida identifica-se o ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), uma forma inorgânica e geralmente solúvel, compostos orgânicos dissolvidos (DOP) e fósforo coloidal macromolecular. Na fração particulada são incluídos precipitados minerais de fósforo, fases amorfas deste elemento ou matéria particulada composta por fósforo (POP).

A bomba biológica é um mecanismo de transporte vertical de nutrientes e carbono inorgânico, como o  $\text{CO}_2$ , a partir da sua conversão em matéria orgânica por parte dos produtores primários (DeVries et al., 2012). Na zona superficial do oceano, parte da matéria orgânica particulada produzida é remineralizada, por processos de dissolução, hidrólise microbiológica ou predação por zooplâncton (Arnosti, 2011), e a restante sedimenta. A sua decomposição no fundo oceânico devolve, juntamente com excreções de zooplâncton, nutrientes inorgânicos dissolvidos e dióxido de carbono às águas profundas dos meios marinhos (De La Rocha & Passow, 2014), que, através de processos de mistura vertical e *upwelling*, são transportados de volta para a superfície, completando o ciclo (Sunda, 2012).

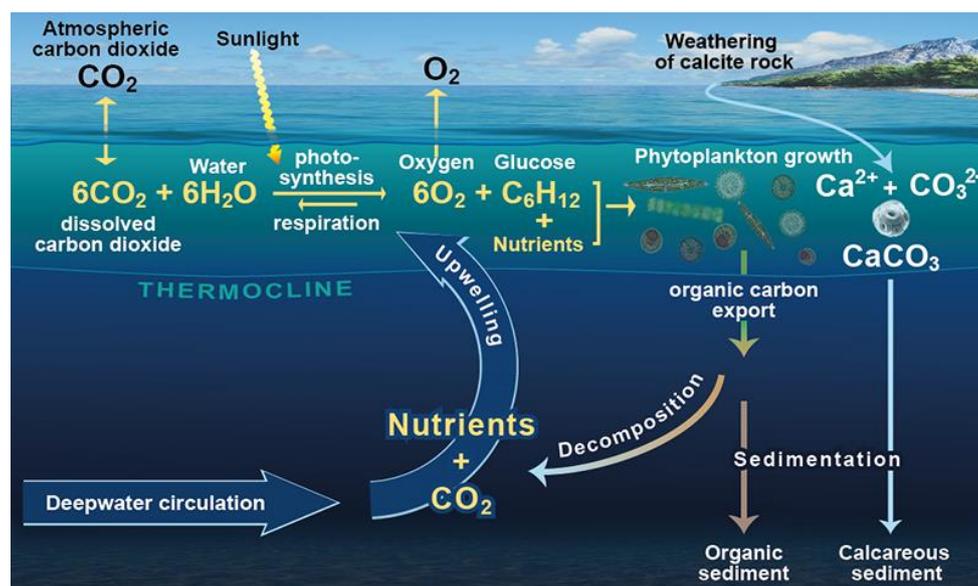


Figura 1 - Ilustração da bomba biológica nos oceanos. Fonte: <https://rapid.ac.uk/abc/bg/bcp.php>

### 2.1.2 – Estuários

Devlin e Pan (2018) caracterizam os estuários como sistemas onde os rios convergem para os oceanos, formando uma zona de transição entre estes dois tipos de ambientes, com interação entre água doce e água salgada, num estado dinâmico entre descargas dos rios, sedimentos, efeitos de maré, ventos e ondas, onde também a sua morfologia e estrutura geológica têm um papel relevante neste dinamismo. Embora os estuários sejam definidos de forma simples e intuitivamente compreendidos, existem diversos fatores que os distinguem e permitem a sua classificação segundo determinados critérios e características em comum.

O processo de classificação de um estuário pode ser feito relativamente ao seu balanço hídrico, à sua geomorfologia, estratificação, parâmetros de circulação e estrutura lateral de escoamento (Hansen & Rattray, 1966; Valle-Levinson, 2010).

Em relação ao balanço hídrico, Devlin e Pan (2018) consideram que os estuários podem ser classificados como positivos, nos quais a adição de água doce proveniente dos rios, chuva ou gelo, supera as perdas por evaporação ou congelamento, promovendo gradientes longitudinais de densidade. Podem ser classificados como estuários inversos, ou negativos, o oposto do anteriormente descrito, e neles as perdas de água superam as entradas, formando-se gradientes de densidade inversos aos do caso anterior. Podem ainda ser classificados como estuários de baixa afluência, e estes encontram-se em regiões secas ou semiáridas, com altas taxas de evaporação e baixo caudal do rio afluente.

Quanto à geomorfologia, Perillo (1995) classifica os estuários como planícies costeiras, *fjords*, *bar-built* e tectónicos. Estuários classificados como planícies costeiras apresentam formato afunilado, são largos, podendo ter dezenas de quilómetros de largura e profundidades de cerca de 10 m, que podem chegar a mais de 20 na saída para o oceano (a boca). *Fjords* são estuários com profundidades entre 200 e 800 m, localizados a altas latitudes, e apresentam largura relativamente uniforme e formato de letra U quando vistos em perfil longitudinal, devido à presença de um cume rochoso quase superficial à boca do estuário. Estuários *bar-built*, também denominados de lagoas costais, localizam-se em vales de rios de baixo-relevo costeiro com descargas de baixo caudal, com fraco efeito da maré na oscilação do nível do mar, onde se formam barreiras devido ao transporte de materiais por ação do vento, ondas e correntes. Estuários tectónicos não se incluem nas outras categorias, e são formados por dinamismo em sistemas de falhas tectónicas.

Relativamente aos restantes critérios, os estuários podem ser classificados, quanto à sua estratificação, ou estrutura salina vertical, como fortemente estratificados, fracamente estratificados, verticalmente misturados, ou estuários de cunha salina (Cameron & Pritchard, 1963). O parâmetro de circulação corresponde ao rácio entre a velocidade de escoamento próxima à superfície e a velocidade média do escoamento em profundidade, e indica a força da circulação gravítica nos estuários (Valle-Levinson, 2010). Estes dois parâmetros são úteis para caracterizar o transporte salino nos estuários.

## 2.2 – Bivalves

A classe *Bivalvia* é caracterizada por organismos que habitam águas salgadas ou águas doces, e são compostos por duas conchas conectadas, como os mexilhões, as ameijoas ou as ostras (Vaughn & Hoellein, 2018). Habitam diferentes tipos de ecossistemas marinhos, incluindo mares temperados, tropicais ou polares, estuários ou fontes hidrotermais, e algumas espécies vivem enterradas nos fundos marinhos, enquanto outras aderem a substratos sólidos (Arapov et al., 2010).

Os bivalves alimentam-se por filtração, e alguns têm a capacidade de controlar este processo e selecionar partículas de acordo com a sua forma, tamanho, valor nutritivo e componentes químicas (Arapov et al., 2010). As partículas em suspensão, entram pelo sifão e são direcionadas para as brânquias, onde a filtração é feita, e em seguida, as partículas são direcionadas para os palpos labiais que as transportam para a boca, onde são assimiladas (Saraiva et al., 2012).

Os bivalves consomem sobretudo fitoplâncton, dependendo muito deste alimento, mas também zooplâncton, matéria orgânica dissolvida, alguns sedimentos e bactérias, podendo adotar uma estratégia de consumo de alimento em suspensão na coluna de água, ou uma estratégia de consumo a partir do fundo marinho (Levinton, 1972). Estas diferenças nas estratégias de alimentação implicam diferenças nas interações com o ecossistema.

O processo de filtração torna os bivalves muito importantes em ambientes marinhos, devido à sua influência nos fluxos de energia, e nutrientes, entre comunidades bentônicas e pelágicas (Arapov et al., 2010). Para além de afetar a disponibilidade de nutrientes, a sua agregação em grandes densidades pode afetar sistemas marinhos, influenciando a hidrodinâmica local, ou ainda a disponibilidade de luz ao longo da coluna de água, devido ao consumo de fitoplâncton que reduz a turbidez da água (Vaughn & Hoellein, 2018).

Ciclos de nutrientes, como o caso do azoto, são influenciados por densas populações de bivalves em ecossistemas costais (Dame, 1996; Newell, 2004). Há um controlo *bottom-up* de nutrientes, exercido pelos bivalves através da deposição de matéria orgânica, proveniente da ingestão de detritos orgânicos e fitoplâncton, e excreção de azoto, que facilita a reciclagem deste nutriente na zona bentónica destes ecossistemas (Cranford et al., 2007).

A presença destes organismos em zonas costeiras apresenta efeitos potenciais para lidar com o stress gerado por atividades humanas sobre estes ecossistemas, e densas populações de bivalves podem contribuir positivamente para regular a qualidade de água nestes locais, respondendo às descargas de nutrientes, filtrando e ingerindo microalgas e exercendo um controlo *top-down* (Dame, 1996; Cloern, 2001; Newell, 2004).

### 2.3 – *Mytilus edulis*

O mexilhão da espécie *Mytilus edulis*, também conhecido como mexilhão azul, é uma espécie comestível, que habita o nordeste do oceano Atlântico, desde o mar Branco até ao sul de França e Reino Unido, o noroeste do oceano Atlântico, desde as províncias marítimas do Canadá até Carolina do Sul, nos Estados Unidos da América, e pode ser encontrado nas costas do Chile e Argentina, ou nas ilhas Malvinas e nas ilhas Kerguelen (Tyler-Walters, 2008). Este mexilhão habita tipicamente zonas entremarés e sublitorais superficiais, onde aderem a substratos rochosos ao longo da costa, ou em estuários.

O primeiro estágio de vida de um mexilhão é o de larva pelágica, e pode ser dividido em fases de desenvolvimento, alimentação e crescimento. Neste estágio, a larva desloca-se livremente na coluna de água. Entretanto, o mexilhão passa por uma fase de estabelecimento, durante a qual completa o seu desenvolvimento larval e adere a um substrato adequado para iniciar a fase de metamorfose (Widdows, 1991).

Tyler-Walters (2008) indica que a concha do *Mytilus edulis* apresenta um formato triangular, com as pontas arredondadas (como se verifica na figura 3). As condições ambientais podem afetar o desenvolvimento do seu formato, mas em condições normais, a concha é lisa e apresenta linhas concêntricas, podendo ter a característica cor azul, mas também tons de roxo ou castanho. O seu comprimento varia tipicamente entre 5 e 10 cm, embora em algumas populações, alguns organismos atinjam apenas os 2 ou 3 cm de comprimento, ou noutros casos, possam atingir os 15 ou 20 cm.

Os mexilhões azuis servem como fonte de alimento, mas também têm a função de sentinela nos ecossistemas que habitam, e monitorizam a evolução de poluentes de origem antropogénica (Goldberg, 1975, 1980; Farrington et al., 2016). Espécies sentinela são definidas pela sua capacidade de bioacumulação de determinados poluentes nos seus tecidos sem efeitos negativos, sendo por isso utilizadas para estimar a disponibilidade biológica desse poluente (Bechmann et al., 2011).



Figura 2 - Foto de mexilhões azuis, tirada em New Jersey, no Seaside Park ([Photo Ark Home Blue Mussels | National Geographic Society](#))

## 2.4 – Aquacultura de Mexilhões

A aquacultura de bivalves é uma atividade em crescimento à escala global durante os últimos 20 anos (Gallardi, 2014), representando em 2010, 23.6% da produção mundial em aquacultura, com 14 milhões de toneladas (FAO, 2012). A China lidera na produção, com 9.5 milhões de toneladas cultivadas em 2005, representando 80.2% da produção mundial em aquacultura, e 70% da produção total, que engloba também a produção por pesca (FAO, 2008).

Para Gibbs (2007), uma das características mais atrativas neste tipo de aquacultura é depender praticamente apenas de fontes de alimento naturais, havendo, portanto, interesse em compreender como o crescimento de culturas pode ser restringido ou suportado pelas condições ambientais onde se inserem. Como as adições de alimento são mínimas, as culturas de bivalves competem pelo alimento disponível com outras espécies no ambiente marinho, e estas interações ao nível trófico podem ocorrer na região bentónica ou ao longo da coluna de água, na região pelágica. Devem por isso ser definidos limites para produção sustentável de bivalves, considerando o conceito de capacidade de carga ecológica, definido como a produção máxima suportada pelas condições ambientais, sem condicionar os processos ecológicos e o dinamismo populacional no ecossistema.

As culturas de bivalves podem não apenas impactar os ambientes onde se encontram, como podem também ser afetadas por alterações climáticas, estando expostas aos efeitos negativos do aquecimento, aumento de acidez e do nível de água dos oceanos, alterações nos padrões de precipitação, transporte de nutrientes e salinidade, ou aumento de frequência e intensidade de eventos climáticos extremos (Scavia et al., 2002; Harley et al., 2006; Ruckelshaus et al., 2013).

No caso da aquacultura de mexilhões, esta atividade é realizada também em estuários, para além de zonas costeiras abrigadas (de forma a reduzir as necessidades tecnológicas de operação), no entanto, caso se pretenda instalar um sistema de cultivo em alto-mar, o design desse sistema deve ser feito considerando as limitações impostas por esse local (Landmann et al., 2019).

A produção de mexilhões inicia-se com a recolha de sementes de mexilhão. Segundo Smaal (2009), esta recolha é realizada em bancos naturais, com cordas e redes como materiais de recolha, nas quais as larvas de mexilhão, em suspensão na coluna de água, naturalmente aderem e crescem até ao estado juvenil, sendo depois transportadas para o sistema de produção suspenso onde continuam o seu desenvolvimento. No caso de culturas de fundo marinho, a recolha de sementes é realizada na zona bentónica (para a qual mexilhões juvenis migram depois de atingirem entre 1 e 2 mm de comprimento), através de dragagens (Protopopescu & Beal, 2015; Smaal, 2002; Dolmer et al., 2012).

Sementes produzidas em viveiros podem ser também utilizadas para complementar o fornecimento de sementes naturais, altamente dependente da sazonalidade dos eventos de desova e produção de larvas (Kamermans et al., 2013). Esta opção tem tido pouca utilização devido ao custo económico associado, mas será cada vez mais vista como uma alternativa viável, perante a crescente procura por mexilhões (Protopopescu & Beal, 2015).

De acordo com Avdelas et al. (2020), são utilizadas quatro técnicas de produção de mexilhões na Europa. Duas delas são de cultivo em suspensão e as outras duas são implementadas em fundo oceânico, e são descritas abaixo:

- Cultura *Long-line* – cultura suspensa em cordas, verticalmente dispostas, presas a uma longa corda horizontal, que está suspensa em água, com auxílio de boias, e fixada num local, através da colocação de âncoras no fundo. Alternativa a culturas em jangada para zonas expostas a alta energia das ondas.

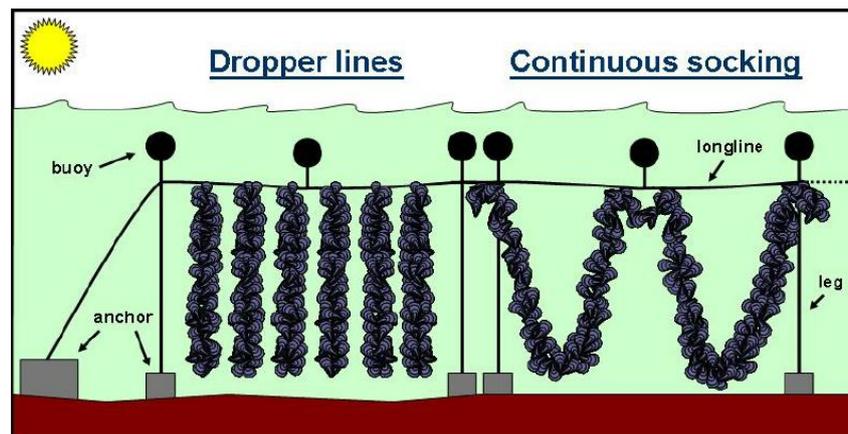


Figura 3 - Esquema de cultivo de mexilhões long-line, com duas configurações possíveis. Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-basic-mussel-longline-system-The-two-most-common-systems-used-in-Canada\\_fig1\\_238731789](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-basic-mussel-longline-system-The-two-most-common-systems-used-in-Canada_fig1_238731789)

- Cultura em jangada – cultura suspensa em cordas, com comprimento de cerca de 30 m, presas a uma jangada flutuante. As cordas podem apresentar diferentes configurações, dependendo da profundidade do local onde a jangada se encontra, e é nelas que os mexilhões juvenis (sementes) são fixados e crescem, sendo a colheita realizada após um período apropriado.

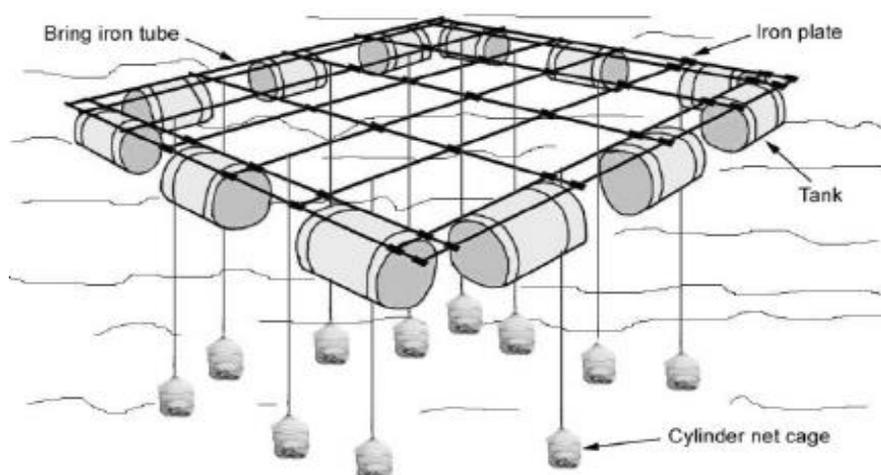


Figura 4 - Esquema de uma cultura em jangada. Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/Raft-for-adult-freshwater-pearl-mussel-culture-Kovitvadhi-2008\\_fig2\\_221923318](https://www.researchgate.net/figure/Raft-for-adult-freshwater-pearl-mussel-culture-Kovitvadhi-2008_fig2_221923318)

- Cultura de fundo — fixada no fundo marinho, em zonas entremarés ou sublitorais, onde as sementes são depositadas e anexadas, depois de retiradas de zonas onde se tinham estabelecido naturalmente. Estas culturas estão mais expostas a predação por caranguejos e estrelas-do-mar (Christensen et al., 2011).
- Cultura de *Bouchout* — esta técnica de cultivo em fundo marinho utiliza postes (*bouchout* em francês), colocados verticalmente ao longo da zona entremarés. Os mexilhões crescem em cordas, enroladas em espiral nestes postes com malha, que previnem a sua queda e predação.



Figura 5 - Cultura Bouchout em França. Fonte: <https://www.sciencephoto.com/media/390676/view/mussel-growing-france>

### 3 – Metodologia

#### 3.1 – Descrição do Modelo Numérico

Modelos numéricos são ferramentas bastante úteis para estudar processos físicos e biogeoquímicos em sistemas naturais e construir cenários que permitem compreender o funcionamento e evolução destes sistemas, e como estes podem ser geridos de forma mais sustentável, minimizando o impacto ambiental e ecológico de intervenções humanas, tendo em vista a sua preservação.

Sistemas marinhos são amplamente estudados com recurso a modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água e, neste trabalho, o *MOHID Water* é o modelo hidrodinâmico utilizado na realização das simulações. Este modelo, desenvolvido em *Fortran 95*, com programação orientada a objetos, permite simular uma variedade de processos físicos e biogeoquímicos na coluna de água, e também interações que nela ocorrem com os sedimentos e a atmosfera, através de módulos que representam diversas componentes de cada um destes três domínios num sistema marinho.

Neste trabalho o módulo *Bivalve* é fulcral para simular e analisar a evolução e crescimento de mexilhões em áreas de cultivo, sob diferentes condições e regimes, como individual ou populacional.

#### Módulo *Bivalve*

Tendo o papel central na análise das simulações realizadas neste trabalho, o módulo *Bivalve* simula o crescimento e os processos metabólicos de organismos da classe *Bivalvia*, como os mexilhões, através da aplicação do modelo *DEB* (*Dynamic Energy Budget*).

Este modelo descreve matematicamente taxas de assimilação e alocação de energia em compartimentos do organismo, que caracterizam a sua reserva, a sua reprodução e a sua estrutura e dependem de características do organismo, como o volume ou a área superficial, e condições ambientais (Nisbet et al., 2000; Kooijman, 2001).

Uma hipótese central do modelo é que a matéria assimilada — a comida —, é transportada para a reserva, e a partir da reserva, esta matéria é transportada para os setores já referidos, sendo uma fração  $\kappa$  fixa, alocada para o crescimento e manutenção somática do indivíduo, enquanto a restante fração é direcionada para a manutenção de maturidade e maturação ou reprodução (Van der Meer, 2006).

Segundo Saraiva (2019), o modelo *DEB* pode ser aplicado a diferentes espécies, variando a parametrização, que é característica de cada uma. Para além da simulação de indivíduos, é também possível simular populações de determinada espécie com este módulo, compostas por *cohorts*, que consistem em conjuntos de indivíduos nascidos no mesmo instante, com características e propriedades semelhantes entre si.

## Módulos adicionais

Nas simulações realizadas para este trabalho, estão envolvidos outros módulos para além do módulo *Bivalve*, com um papel central na descrição das características e complexidade dos sistemas simulados. São apresentadas breves descrições para cada um deles.

- *WaterProperties* – Este módulo é responsável pela simulação da evolução de propriedades na coluna de água, por transporte (servindo-se do módulo complementar *AdvectionDiffusion*), e por processos biogeoquímicos (através do módulo *WaterQuality*). Temperatura, salinidade, fitoplâncton ou nutrientes são algumas das propriedades simuladas por este módulo.
- *WaterQuality* – Módulo responsável pela descrição de ciclos biogeoquímicos de nutrientes, como o azoto, oxigénio, fósforo e sílica.
- *Atmosphere* – Este módulo simula dados meteorológicos e processos atmosféricos que caracterizam interações entre a água e o ar.
- *Benthos* – Módulo adimensional, que descreve interações biogeoquímicas em regiões bênticas oceânicas.
- *Discharges* – Módulo que descreve descargas de água em pontos selecionados, que podem transportar propriedades.
- *Free Vertical Movement* – Módulo que descreve fluxos verticais de propriedades particuladas, através da velocidade de sedimentação de cada propriedade.
- *Geometry* – Módulo que determina as características da malha, como o seu tipo e as coordenadas em que é definida, tal como o passo espacial e temporal utilizados na simulação e as respetivas datas de início e fim de dada simulação.
- *Hydrodynamic* – Módulo responsável pelos principais forçamentos na hidrodinâmica de uma simulação, resolvendo as equações de continuidade e conservação de quantidade de movimento para o escoamento.
- *InterfaceSedimentWater* – Módulo que descreve as condições no fundo da coluna de água, tais como tensão de corte e fluxos na interface água-sedimento.
- *InterfaceWaterAir* – Módulo responsável pelos processos físicos que ocorrem na interface entre a água e a atmosfera, tais como tensão de corte, balanços energéticos e fluxos de calor.
- *Model* – Módulo que gere toda a informação de um modelo, incluindo os fluxos de informação entre módulos ao longo do tempo de simulação.
- *Tide* – Módulo onde são configurados os parâmetros harmónicos de maré.

### 3.2 – Equações

#### 3.2.2 – Módulo *Bivalve*

O módulo *Bivalve* simula o crescimento de bivalves tanto a nível individual, simulando processos metabólicos para um único organismo, como a nível populacional, através de uma dinâmica de *cohorts*. Cada *cohort* consiste num número de indivíduos, de uma determinada espécie, nascidos ao mesmo tempo e com as mesmas propriedades, descritas pelo modelo individual, e um conjunto de *cohorts* representa uma população dessa espécie de bivalves.

Os processos metabólicos num organismo, e o seu crescimento, são simulados através do modelo *DEB* que descreve os principais compartimentos e processos metabólicos do indivíduo, como a assimilação, a mobilização, a reserva, a estrutura, *buffer* reprodutivo ou a maturidade, e são adicionados processos específicos ao modelo, para simular determinadas características específicas dos bivalves, como por exemplo a filtração enquanto método de alimentação (Saraiva et al., 2014).

#### Processos Individuais

Abaixo, a figura 5 representa o esquema de fluxos e processos metabólicos, característicos de um bivalve, e simulados pelo modelo DEB individual.

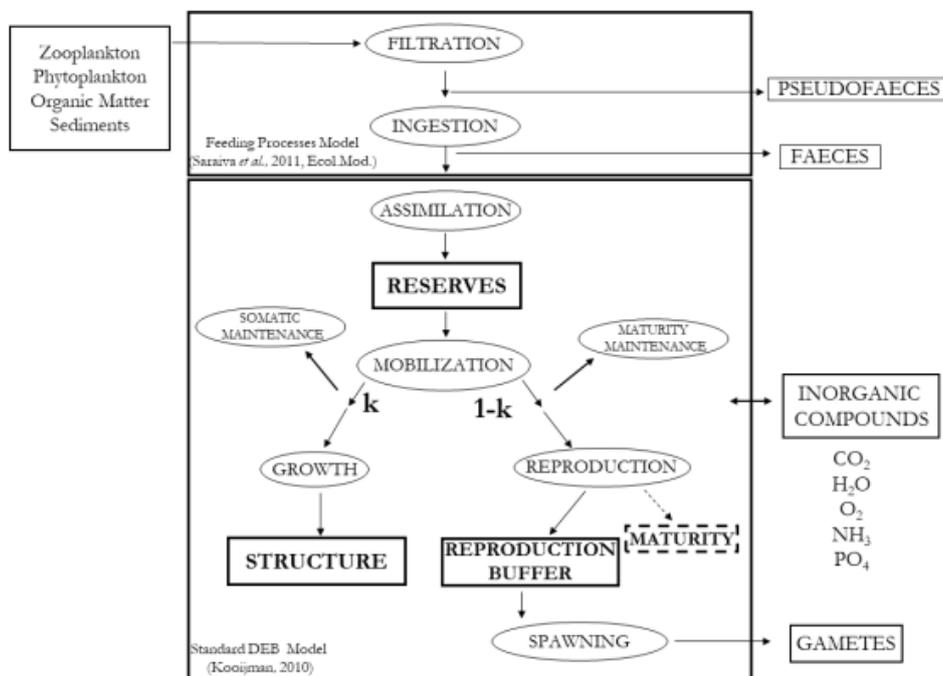


Figura 6 - Esquema do Modelo Individual para o Bivalve. Retângulos com linha contínua representam compartimentos de massa, e retângulos com linha tracejada representam investimento energético. Elipses representam os principais processos metabólicos do organismo. Setas representam fluxos de massa, entre os compartimentos do indivíduo ou com o exterior. Saraiva et al. (2012)

Segundo Saraiva et. al (2014), o modelo individual prevê que, ao nível da alimentação, os bivalves conseguem filtrar partículas de dimensão superior a 1  $\mu\text{m}$ , incluindo fitoplâncton, zooplâncton e diversos detritos, estando aptos a filtrar a maior parte da matéria suspensa na coluna de água. Depois de filtrado, o alimento passa por um processo de ingestão, onde as partículas rejeitadas são transportadas de novo para a água sob a forma de pseudofezes, e o alimento selecionado é ingerido e depois assimilado, e a comida é convertida em reserva do organismo, sendo a porção não assimilada transportada para a água como fezes. Esta reserva é mobilizada, segundo uma fração  $\kappa$  fixa, para manutenção somática e crescimento, enquanto a restante reserva mobilizada, a fração  $1-\kappa$ , é alocada em maturação (em embriões e juvenis) e na sua manutenção, ou em reprodução (em adultos).

O modelo também assume que os bivalves são organismos isomorfos, significando que a sua forma não se altera durante o crescimento, e o seu comprimento real é proporcional ao comprimento volumétrico ( $V^{1/3}$ ), pelo parâmetro adimensional  $\delta_M$ . Para além disto, durante períodos de escassez de alimento, estes organismos estão aptos a realocar energia (que seria inicialmente dirigida para o *buffer* reprodutivo) para custos de manutenção somática, através de reabsorção de gâmetas, ou podem ainda usar parte da sua estrutura para este efeito. Pelo mesmo motivo, podem também, de forma semelhante, reduzir o seu nível de maturidade e realocar energia na manutenção da mesma.

A tabela 1 resume a formulação matemática utilizada para expressar as 4 variáveis de estado descritas pelo modelo DEB, que caracterizam um indivíduo.

Tabela 1 - Variáveis de Estado do Modelo e Formulações. Saraiva et al. (2012)

Símbolo	Descrição	Unidades	Formulação
$M_V$	Estrutura do bivalve	mol C <sup>V</sup>	$\frac{dM_V}{dt} = J_{VG}$
$M_E$	Reserva do bivalve	mol C <sup>E</sup>	$\frac{dM_E}{dt} = J_E = J_{EA} - J_{EC}$
$M_H$	Investimento em maturidade do bivalve	mol C <sup>E</sup>	$\frac{dM_H}{dt} = J_{ER}^M$
$M_R$	Buffer Reprodutivo do bivalve	mol C <sup>E</sup>	$\frac{dM_R}{dt} = J_{ER}^R$

A evolução destas 4 variáveis de estado ao longo do tempo, ocorre pelo balanço de taxas de energia, e a tabela 2 apresenta as formulações das taxas que descrevem processos de mobilização de energia para os diferentes compartimentos metabólicos do organismo.

Tabela 2 - Formulações do modelo individual (continuação)

Processo	Símbolo	Descrição	Unidades	Formulação
Mobilização	$j_{EC}$	Taxa de mobilização	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$j_{EC} = \frac{[E]}{[E_G] + \kappa[E]} \cdot \left( \frac{[E_G]}{\mu_E} \dot{V} V^{\frac{2}{3}} + j_{ES} \right)$
Manutenção Somática	$j_{ES}$	Taxa de Manutenção Somática	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$j_{ES} = \frac{[p_M]}{\mu_E} V$
Crescimento	$j_{EG}$	Fluxo alocado para o crescimento	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$j_{EG} = \kappa j_{EC} - j_{ES}$
	$j_{VG}$	Taxa de Crescimento	mol C <sup>V</sup> d <sup>-1</sup>	$j_{VG} = \gamma_{VE} j_{EG}$
Maturidade Reprodução	$j_{EJ}$	Manutenção de Maturidade	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$j_{EJ} = k_J M_H$
	$j_{ER}$	Fluxo alocado para Reprodução/Maturidade	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$j_{ER} = (1 - \kappa) j_{EC} - j_{EJ}$
	$j_{ER}^M$	Fluxo para Maturidade	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$j_{ER}^M = \begin{cases} j_{ER} & \text{se } M_H < M_H^P \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
	$j_{ER}^R$	Fluxo para o Buffer Reprodutivo	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$j_{ER}^R = \begin{cases} 0 & \text{se } M_H < M_H^P \\ j_{ER}, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Como é possível verificar, a taxa de mobilização de reserva ( $j_{EC}$ ) depende da densidade de reserva, [E] (mol C<sup>E</sup> cm<sup>-3</sup>). Se for assumida a hipótese de homeostase fraca, a densidade de reserva do organismo ( $[E] = \frac{E}{V}$ ) tende para um valor constante ao longo do tempo. Relativamente à manutenção somática ( $j_{ES}$ ), esta taxa é proporcional à estrutura do organismo (os custos de manutenção estrutural aumentam com o crescimento do bivalve) e da área superficial do organismo. No entanto, os custos de manutenção relacionados com a área superficial do indivíduo são negligenciados no caso dos bivalves, pois estes organismos são ectotérmicos e não consomem energia a regular a sua temperatura corporal. A manutenção somática é também um processo prioritário relativamente ao crescimento ( $j_{EG}$ ), implicando que a porção da fração  $\kappa$  da energia, que é mobilizada para este setor metabólico, que fica disponível depois da alocação nos processos de manutenção é progressivamente menor com o próprio crescimento do organismo.

No caso da maturidade ( $j_{ER}^M$ ) e *buffer* reprodutivo ( $j_{ER}^R$ ) de um organismo, a energia investida num destes processos depende do estado de maturidade do mexilhão. Durante as fases de embrião e juvenil, é alocada energia em maturidade, de forma a desenvolver sistemas de regulação e órgãos reprodutivos do organismo, mas após o nível de maturidade atingir um determinado limite,  $M_H^P$ , o bivalve torna-se adulto e o fluxo de energia alocado neste processo passa agora a ser investido na produção de gâmetas (*buffer* reprodutivo).

Todas as taxas são afetadas pela temperatura corporal do organismo, e considera-se um método de calcular esta dependência, descrito pela relação de Arrhenius, apresentado na tabela 3.

Tabela 3 - Formulação para correção de Arrhenius. Kooijman (2000)

Correção	Formulação
Arrhenius	$k(T) = k_1 \exp\left(\frac{T_A}{T_1} - \frac{T_A}{T}\right)$

## Processos de Filtração

Como já referido, o processo de filtração é uma característica específica dos bivalves e, por isso, é adicionada ao modelo DEB *standard* de forma a simular com maior detalhe as interações destes organismos com o ambiente marinho em que estão normalmente inseridos. No módulo *Bivalve*, os processos de filtração podem ser simulados com 3 níveis de complexidade: filtração imposta, filtração simples ou filtração complexa.

### 1 – Filtração Imposta

Na tabela 4, são apresentadas as formulações correspondentes ao processo de filtração imposta.

Tabela 4 - Formulações do processo de filtração imposta.

Processo	Símbolo	Descrição	Unidades	Formulação
Filtração	$f$	Resposta Funcional	–	$f = \frac{X}{X + K}$
	$J_{X_iF}$	Taxa de Filtração	mol C d <sup>-1</sup> g d <sup>-1</sup>	$J_{X_iF} = f \frac{\{p_{X_m}\}}{\mu_E} V^{2/3}$
Ingestão	$J_{X_iI}$	Taxa de Ingestão	mol C d <sup>-1</sup> g d <sup>-1</sup>	$J_{X_iI} = J_{X_iF}$
	$J_{P_iF}$	Taxa de produção de Pseudofezes	mol C d <sup>-1</sup> g d <sup>-1</sup>	$J_{P_iF} = 0$
Assimilação	$J_{EA}$	Taxa de Assimilação	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$J_{EA} = y_{EX^V} \cdot J_{X_iI}$
	$J_{P_iI}$	Taxa de produção de Fezes	mol C d <sup>-1</sup>	$J_{P_iI} = J_{X_iI} - J_{EA}$

Para este tipo de processo de filtração, é assumido que a única fonte de alimento é o fitoplâncton. Esta opção de filtração tem o propósito de testar cenários teóricos, e a resposta funcional (sendo  $X$  a concentração de alimento e  $K$  a constante de meia saturação), que relaciona a mudança na densidade de alimento com a mudança do seu consumo, é descrita de acordo com o modelo DEB *standard*.

## 2 – Filtração Simples

Relativamente ao processo de filtração simples, a sua formulação é expressa na tabela 5.

Tabela 5 - Formulações do processo de filtração simples. Kooijman (2006)

Processo	Símbolo	Descrição	Unidades	Formulação
Filtração	$f$	Resposta Funcional	–	$f = \frac{X}{X+K'(Y)}$
	$K'(Y)$	Coefficiente Aparente de Meia Saturação	–	$K'(Y) = K(1 + \frac{Y}{K_Y})$
	$J_{X_iF}$	Taxa de Filtração	mol C d <sup>-1</sup> g d <sup>-1</sup>	$J_{X_iF} = f \frac{\{p_{X_m}\}}{\mu_E} V^{2/3}$
Ingestão	$J_{X_iI}$	Taxa de Ingestão	mol C d <sup>-1</sup> g d <sup>-1</sup>	$J_{X_iI} = J_{X_iF}$
	$J_{P_iF}$	Taxa de Produção de Pseudofezes	mol C d <sup>-1</sup> g d <sup>-1</sup>	$J_{P_iF} = 0$
Assimilação	$J_{EA}$	Taxa de Assimilação	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$J_{EA} = y_{EX^V} \cdot J_{X_iI}$
	$J_{P_iI}$	Taxa de Produção de Fezes	mol C d <sup>-1</sup>	$J_{P_iI} = J_{X_iI} - J_{EA}$

Neste processo de filtração, a formulação matemática é praticamente igual à do processo de filtração imposta. No entanto, a resposta funcional,  $f$ , descrita de acordo com Kooijman (2006), por uma equação de *Holling* tipo II, apresenta um coeficiente aparente de meia saturação,  $K'$  (dependente não só da concentração de fitoplâncton,  $X$ ; mas também da concentração de matéria inorgânica na água,  $Y$ ), em vez da constante de meia saturação,  $K$ , aplicada no modelo DEB *standard* e no processo de filtração imposta (dependente apenas da concentração de alimento em água,  $X$ ). Esta diferença deve-se ao facto de, para este processo de filtração, se assumir que, para além de alimento, está também matéria inorgânica dissolvida na coluna de água – sedimentos coesivos –, que pode ser filtrada pelo bivalve e interferir com a filtração de alimento (Kooijman, 2006).

Se negligenciarmos a presença de sedimentos na água, ou seja, se a sua concentração for nula,  $Y=0$ ,  $K'(Y) = K$  e  $f = \frac{X}{X+K}$ , e o processo de filtração simples é simplificado para filtração imposta.

Tanto para filtração imposta como filtração simples, não se assume produção de pseudofezes, sendo ingerido tudo o que é filtrado.

## 3 – Filtração Complexa

No caso da filtração complexa, esta abordagem assume que os processos de filtração, ingestão e assimilação são processos separados, ainda que relacionados (Saraiva et al., 2011b), e para os

descrever, é utilizado o conceito de Unidade Sintetizadora (US), introduzido no modelo DEB por Kooijman (1998, 2000, 2010). As tabelas 6 e 7 apresentam as formulações utilizadas para descrever os 3 processos associados a este tipo de filtração.

Tabela 6 - Formulações do processo de filtração complexa.  $X_0$  representa a concentração de material inorgânico, enquanto  $X_1$  representa a concentração de algas, fonte de alimento dos bivalves considerada no modelo. Saraiva et al. (2012)

Processo	Símbolo	Descrição	Unidades	Formulação
Filtração	$\dot{C}_R$	Taxa de Remoção	$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$	$\dot{C}_R = \frac{\{C_{Rm}\}}{1 + \sum_{i=0}^1 \frac{X_i \{C_{Rm}\}}{\{J_{X_i Fm}\}}} V^{2/3}$
	$\dot{J}_{X_i F}$	Taxa de Filtração	$\text{mol C d}^{-1} \text{ g d}^{-1}$	$\dot{J}_{X_i F} = \dot{C}_R X_i$
Ingestão	$\dot{J}_{X_i I}$	Taxa de Ingestão	$\text{mol C d}^{-1} \text{ g d}^{-1}$	$\dot{J}_{X_i I} = \frac{\rho_{X_i I} \cdot \dot{J}_{X_i F}}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{X_i I} \cdot \dot{J}_{X_i F}}{\{J_{X_i Im}\}}}$
	$\dot{J}_{P_i F}$	Taxa de Produção de Pseudofezes	$\text{mol C d}^{-1} \text{ g d}^{-1}$	$\dot{J}_{P_i F} = \dot{J}_{X_i F} - \dot{J}_{X_i I}$
Assimilação Simples	$\dot{J}_{EA}$	Taxa de Assimilação	$\text{mol C}^E \text{d}^{-1}$	$\dot{J}_{EA} = y_{EX^V} \cdot \dot{J}_{X_i I}$
	$\dot{J}_{P_i I}$	Taxa de Produção de Fezes	$\text{mol C d}^{-1}$	$\dot{J}_{P_i I} = \dot{J}_{X_i I} - \dot{J}_{EA}$
Assimilação Complexa	$\dot{J}_{EA}$	Taxa de Assimilação	$\text{mol C}^E \text{d}^{-1}$	$\dot{J}_{EA} = \dot{J}_{EA^E} + \dot{J}_{EA^V}$
	$\dot{J}_{P_i I}$	Taxa de Produção de Fezes	$\text{mol C d}^{-1}$	$\dot{J}_{P_i I} = \dot{J}_{X_i I} - \dot{J}_{EA}$

Tabela 7 - Formulações do processo de filtração complexa, no caso de assimilação complexa.

Símbolo	Unidades	Formulação
$\dot{r}_C$	—	$\dot{r}_C = \dot{J}_{X_1 I} \cdot f_E$
$\dot{r}_N$	—	$\dot{r}_N = \dot{J}_{X_1 I} \cdot f_E \cdot \frac{n_{X_1}^N}{n_E^N}$
$\dot{r}_P$	—	$\dot{r}_P = \dot{J}_{X_1 I} \cdot f_E \cdot \frac{n_{X_1}^P}{n_E^P}$
$\dot{J}_{EA^E}$	$\text{mol C}^E \text{d}^{-1}$	$\dot{J}_{EA^E} = \left( \frac{1}{\dot{r}_C} + \frac{1}{\dot{r}_N} + \frac{1}{\dot{r}_P} - \frac{1}{\dot{r}_C + \dot{r}_N} - \frac{1}{\dot{r}_C + \dot{r}_P} - \frac{1}{\dot{r}_N + \dot{r}_P} + \frac{1}{\dot{r}_C + \dot{r}_N + \dot{r}_P} \right)^{-1}$
$\dot{J}_{EA^V}$	$\text{mol C}^E \text{d}^{-1}$	$\dot{J}_{EA^V} = y_{EX^V} \cdot \dot{J}_{X_1 I} \cdot (1 - f_E)$

As Unidades Sintetizadoras, substituíveis e sequenciais, regulam a filtração de cada tipo de substrato (denotado pela letra  $i$ , com concentração  $X_i$  na coluna de água) através da taxa de remoção ( $\dot{C}_R$ ), e nestas unidades, cada tipo de partícula pode ser separadamente filtrada, e a filtração de um tipo de

alimento influencia a filtração de outros. As partículas filtradas são posteriormente selecionadas entre as que são ingeridas e as que são rejeitadas e transportadas de novo para a água, sob a forma de pseudofezes.

Este mecanismo de unidades substituíveis e sequenciais é também aplicado no processo de ingestão. As formulações da taxa de remoção ( $\dot{C}_R$ ) e da taxa de ingestão ( $\dot{J}_{X_{iI}}$ ) são ambas descritas por mecanismos similares ao da equação de Holling tipo II, usada para descrever a resposta funcional.

Os processos de filtração e ingestão funcionam como 2 sistemas de unidades sintetizadoras, e quando o primeiro sistema (o de filtração) liberta os seus produtos para o sistema seguinte, este segundo sistema (o de ingestão) seleciona os substratos, dependendo da probabilidade de ligação de cada tipo de alimento ( $\rho_{X_{iI}}$ ) aos palpos labiais do bivalve, e transporta a matéria ingerida para a boca, enquanto ocorre produção de pseudofezes com os materiais filtrados não retidos.

O último processo, de assimilação, é caracterizado pela absorção de alimento e a sua conversão em reserva do organismo. A eficiência deste processo depende diretamente da similaridade entre as composições químicas dos diferentes tipos de alimento ingeridos e da reserva, sendo o menos similar expulso sob a forma de fezes ( $\dot{J}_{P_{iI}}$ ).

Para auxiliar na interpretação da formulação matemática do modelo individual dos bivalves, são apresentados e identificados na tabela 8, alguns dos parâmetros presentes em algumas expressões que descrevem processos metabólicos.

Tabela 8 - Parâmetros auxiliares à interpretação do modelo. Saraiva et al. (2012)

Parâmetro	Descrição	Unidades	Parâmetro	Descrição	Unidades
$[E]$	Densidade de Reserva	$\text{mol C}^E \text{cm}^{-3}$	$k_j$	Coefficiente da Taxa de Manutenção de Maturidade	$\text{d}^{-1}$
$[E_G]$	Custo Específico para Estrutura	$\text{J cm}^{-3}$	$\{\dot{p}_{X_m}\}$	Taxa de Ingestão Específica Máxima	$\text{J d}^{-1} \text{cm}^{-2}$
$\mu_E$	Potencial Químico da Reserva	$\text{J mol}^{-1}$	$\gamma_{EX^V}$	Coefficiente de Produção da Reserva na Estrutura das Algas (alimento)	$\text{mol C}^E \text{mol}^{-1} \text{C}^V$
$\dot{\nu}$	Condutância de Energia	$\text{cm d}^{-1}$	$\{\dot{C}_{R_m}\}$	Taxa de Remoção Máxima Específica	$\text{m}^3 \text{d}^{-1} \text{cm}^{-2}$
$[\dot{p}_M]$	Manutenção Somática Específica	$\text{J d}^{-1} \text{cm}^{-3}$	$\{\dot{J}_{X_{iFm}}\}$	Taxa de Filtração Máxima Específica	$\text{mol C d}^{-1} \text{cm}^{-2}$
$\gamma_{VE}$	Coefficiente de Produção da Estrutura na Reserva	$\text{mol C}^V \text{mol}^{-1} \text{C}^E$	$\{\dot{J}_{X_{iIm}}\}$	Taxa de Ingestão Máxima Específica	$\text{mol C d}^{-1} \text{cm}^{-2}$

## Processos Populacionais

As dinâmicas populacionais têm como base os *cohorts*, compostos por um número variável de indivíduos com as suas propriedades individuais. O modelo populacional guarda a informação criada pelo modelo individual para todas as variáveis de estado, relativamente a cada *cohort*, ao longo do tempo de simulação, mas também tem em conta processos à escala populacional como mortalidade, causada por predação, canibalismo ou causas naturais. As tabelas 9 e 10 apresentam a formulação utilizada no modelo populacional.

Tabela 9 - Formulações do Modelo Populacional. \* representa os predadores, que podem ser camarões, caranguejos ou aves, representados pelas letras S, C e B, respetivamente. Saraiva et al. (2014)

Processo	Símbolo	Descrição	Unidades	Formulação
—	$N_i$	Indivíduos no <i>Cohort</i> $i$	#	$\frac{dN_i}{dt} = -m_i^S P^S - m_i^C P^C - m_i^B P^B - m^N N_i - m^F N_i$
—	$nC$	Nº de <i>Cohorts</i>	#	$\frac{dnC}{dt} = B - D$
Nascimento de <i>Cohort</i>	$B$	Novos <i>Cohorts</i>	#	$B = \begin{cases} 1, & \text{se } \sum_{i=1}^{nC} N_i^{spawn} > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
	$j_{ER}^{spawn}$	Desova	mol C <sup>E</sup> d <sup>-1</sup>	$j_{ER}^{spawn} = \begin{cases} \frac{k_R(M_R - M_{RE})}{R^{spawn}}, & \text{se } GSR \geq GSR^{spawn} \text{ e } T \geq T^{spawn} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
	$GSR$	Índice Gónado-somático	—	$GSR = \frac{M_R}{M_R + M_V + M_E}$
	$N_i^{spawn}$	Nº de Gâmetas Libertados	# d <sup>-1</sup>	$N_i^{spawn} = \frac{j_{ER}^{spawn}}{M_E^b + M_V^b}$
	$M_{RE}$	Quantidade de gâmetas que permanece no <i>buffer</i> reprodutivo	mol C <sup>E</sup>	$M_{RE} = \frac{GSR^{min}}{1 - GSR^{min}} \times (M_E + M_V)$
	$N^0$	Indivíduos no novo <i>Cohort</i>	# d <sup>-1</sup>	$N^0 = N_i^{spawn} (1 - m^{egg})$

Tabela 10 - Formulações do Modelo Populacional (continuação). \* representa os predadores, que podem ser camarões, caranguejos ou aves, representados pelas letras S, C e B, respectivamente. Saraiva et al. (2014)

Processo	Símbolo	Descrição	Unidades	Formulação
Mortalidade por Predação	$m_i^S$	Predação por Camarões	d <sup>-1</sup>	$m_i^S = \rho^S \{j_{X_m}^S\} \frac{N_i}{N_t^S} \frac{1}{w_i} A_{Ci}^S$
	$m_i^C$	Predação por Caranguejos	d <sup>-1</sup>	$m_i^C = \rho^C m_t^C \frac{N_i}{N_t^C} A_{Ci}^C$
	$m_i^B$	Predação por Aves	d <sup>-1</sup>	$m_i^B = \rho^B j_X^B \frac{N_i}{N_t^B} \frac{1}{AFDW_i} A_{Ci}^B$
	$\{j_{X_m}^S\}$	Taxa de Ingestão Máxima dos Camarões	mol C d <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	$\{j_{X_m}^S\} = \frac{\{p_{X_m}^S\}}{\mu_E} L_S^2$
	$N_t^*$	Presas disponíveis por Predador *	#	$N_t^* = \sum_{i=1}^{n_C} N_i A_{Ci}^*$
	$A_{Ci}^*$	Disponibilidade e de Predação por Cohort	—	$A_{Ci}^* = \begin{cases} 1, & \text{se } L_{mP}^* \leq L_i \leq L_{MP}^* \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
Mortalidade de Cohort	$D$	Nº de Cohorts para morrer	#	$D = \sum_{i=1}^{n_C} D_i$
	$D_i$	Estado do Cohort i	—	$D_i = \begin{cases} 1, & \text{se morto} \begin{cases} N_i < \text{Valor Mínimo, ou} \\ M_{Hi} < M_H^b \text{ e } M_{Vi} < M_V^b, \text{ ou} \\ M_{Vi} < M_V^b \text{ e } L_i < L_b, \text{ ou} \\ A_i > a^\dagger \end{cases} \\ 0, & \text{se vivo} \end{cases}$

O modelo individual é responsável por simular todas as mudanças nas variáveis de estado, que ocorrem para os indivíduos, e o modelo populacional simula as mudanças no número de indivíduos presentes num *cohort*, e também o número de *cohorts* que compõe a população, através de um balanço de nascimentos e mortes dos indivíduos.

Há nascimento de novos *cohorts*. B, se ocorrer desova, e este tipo de evento apenas pode ocorrer se o GSR (índice gonado-somático, que consiste na relação entre a massa das gónadas e a massa total do indivíduo) e a temperatura estiverem acima dos seus respectivos limites,  $GSR^{spawn}$  e  $T^{spawn}$ . O número de gâmetas,  $N^{spawn}$ , que resulta no nascimento dos indivíduos do novo *cohort*, é gerado a partir do *buffer* reprodutivo dos progenitores, e reduzido pelo efeito de mortalidade inicial,  $m^{egg}$ , aplicável a bivalves nas fases de ovo e larva. O modelo assume que o novo *cohort* é gerado com indivíduos juvenis, logo após o nascimento, ignorando o estado de embrião.

Em cada *cohort*, o número de indivíduos é também regulado por processos de mortalidade. A causa de morte de bivalves pode ser a ocorrência de eventos naturais extremos, ou a contração e transmissão de doenças, sendo por isso denominada de mortalidade natural,  $m^N$ , no entanto, estes organismos

podem também morrer à fome,  $m_i^f$ . É assumido no modelo que o alimento é partilhado pelos indivíduos da população, dependendo da sua abundância e capacidade de filtração, significando que, se a comida disponível não for suficiente para as necessidades metabólicas dos bivalves, é redistribuída por todos os *cohorts*, sendo os mais beneficiados aqueles com maior necessidade. Períodos de fome extrema podem levar ao consumo de estrutura ou redução do nível de maturidade, por parte dos bivalves, de forma a manter os custos de manutenção, sendo que a redução destas duas variáveis de estado só pode ser revertida enquanto forem superiores aos seus respetivos valores à nascença,  $M_V^b$  e  $M_H^b$ .

Relativamente à morte dos bivalves por predação, o modelo assume a existência de três predadores: camarões ( $m_i^S$ ), caranguejos ( $m_i^C$ ) e aves ( $m_i^B$ ). A abundância de cada um destes predadores ( $P^*$ ) é independente da população de bivalves, e, portanto, a predação é considerada um forçamento no modelo. Cada predador tem preferência por presas com comprimento dentro de determinado intervalo, e no modelo, esta preferência regula a disponibilidade de predação para cada *cohort*. O impacto da predação no número de indivíduos em cada *cohort*, está, portanto, dependente da dimensão física dos bivalves, e é descrito pela fração entre o número de bivalves disponível para predação num *cohort*, e o número total de bivalves disponíveis para predação na população ( $\frac{N_i}{N_t} A_{Ci}^*$ ). Isto significa que se, num conjunto de *cohorts*, apenas um apresentar indivíduos suscetíveis a predação por parte de um dos três predadores, toda ela será focada nesse *cohort*.

A morte de um *cohort*, ocorre caso os indivíduos que o constituem atinjam uma determinada idade limite ( $a^\dagger$ ), ou caso o seu número de indivíduos seja reduzido a um limite mínimo, por processos de mortalidade já descritos. Esta segunda condição é uma imposição no modelo, de forma a regular o crescimento contínuo de *cohorts*, em que aqueles com número muito reduzido de indivíduos podem ser negligenciáveis por não serem relevantes para a população.

Uma maior descrição do modelo populacional é feita por Saraiva et al. (2014), num estudo de populações de mexilhões no mar de *Wadden*.

### 3.3 – Aplicação do Modelo Numérico

Com o objetivo de analisar o potencial de crescimento de mexilhões em sistemas estuarinos, são estudados dois cenários através da realização de simulações numéricas com a aplicação do modelo computacional MOHID *Water*:

1. o primeiro cenário consiste num estuário esquemático, para o qual se pretende inicialmente, através de uma simulação preliminar, descrever a variabilidade das condições hidrodinâmicas e de qualidade da água ao longo do período de simulação, sem a presença de mexilhões. Em seguida, são selecionadas localizações para bancos de cultivo com base no dinamismo natural do estuário e realizadas simulações para o desenvolvimento de mexilhões:

- a 1ª simulação é feita com o modelo individual, de forma a analisar o crescimento de mexilhões em sistemas de produção em aquacultura, sem considerar qualquer tipo de variação populacional, tal como o crescimento em sistemas de cultivo.
  - a 2ª simulação inclui processos de variação populacional, como eventos de desova e mortalidade associada a diversas causas. Com esta simulação pretende-se interpretar os bancos de cultivo como zonas de crescimento natural ou áreas onde são implementados viveiros, onde são recolhidas sementes de mexilhão, essenciais para iniciar o processo de cultivo em aquacultura.
2. O segundo cenário de estudo consiste no estuário do Tejo. Para este estuário é realizada também uma simulação preliminar com o propósito de descrever as suas características hidrodinâmicas e de qualidade da água, sem a presença de mexilhões. Seleccionadas as localizações de implementação de bancos de cultivo, é simulado o crescimento de mexilhões para um período de dois anos, período no qual é expectável obter mexilhões com comprimento comerciável.

### 3.4 – Dados e Parametrização

Os parâmetros definidos para o mexilhão azul, incluídos no módulo *Bivalve* são apresentados nas tabelas 11 e 12. A reparametrização de algum parâmetro ou adição de parâmetros não incluídos nesta tabela, como parâmetros de processos de mortalidade, são descritos na análise e discussão de resultados. Nas simulações realizadas, o processo de filtração escolhido é o de filtração simples, e as partículas filtradas são fitoplâncton e sedimentos coesivos, que são respetivamente o alimento e partículas inorgânicas que interferem nos processos de ingestão, filtração e assimilação.

*Tabela 11 - Parâmetros relativos à espécie de mexilhão Mytilus edulis*

Parâmetro	Símbolo	Keyword	Valor	Fonte
Temperatura de Referência	$T_1$	Tref	293.15	Saraiva et. al (2012)
Temperatura de Arrhenius	$T_A$	TA	7022	Saraiva et. al (2012)
Coeficiente de Forma	$\delta_M$	DELTA_M	0.297	Saraiva et al. (2012)
Condutância de Energia	$\dot{v}$	V_COND	0.056	Saraiva et al. (2012)
Fração $\kappa$	$\kappa$	KAPPA	0.67	Saraiva et al. (2012)
Eficiência da Reprodução	$\dot{k}_J$	KAP_R	0.95	Kooijman (2010)
Taxa Ingestão Específica (Área)	$\{\dot{p}_{X_m}\}$	PXM_FIX	1027	Saraiva (2019)
Taxa Manutenção Somática Específica (Volume)	$[\dot{p}_M]$	pM	11.6	Saraiva et al. (2012)

Tabela 12 - Parâmetros relativos à espécie de mexilhão *Mytilus edulis* (continuação)

Parâmetro	Símbolo	Keyword	Valor	Fonte
Custos de Energia p/Volume de Estrutura	$[E_G]$	EG	5993	Saraiva et al. (2012)
Limite de Maturidade p/Nascimento	$E_H^B$	EH_B	$2.95 \times 10^{-5}$	Saraiva et al. (2012)
Limite de Maturidade p/Puberdade	$E_H^P$	EH_P	$1.58 \times 10^2$	Saraiva et al. (2012)
Constante de Meia Saturação para Alimento	$K$	K_FOOD	0.4	Saraiva (2019)
Constante de Meia Saturação para Sedimentos	$K_Y$	K_SED	40.4	Saraiva (2019)
Coefficiente de Reservas na Estrutura de Alimentos	$\gamma_{EX^V}$	YEX	0.75	Saraiva et al. (2012)
Índice Gonado-Somático Mínimo	$GSR^{min}$	GSR_MIN	0.1	Cardoso et al. (2007)
Índice Gonado-Somático p/Evento de Spawning	$GSR^{spawn}$	GSR_SPAWN	0.2	Pouvreau et al. (2006)
Temperatura Mínima para Spawning	$T^{spawn}$	T_SPAWN	9.6	Saraiva (2019)
Reservas numa Larva (Condições Ótimas)	—	ME_0	$1.49 \times 10^{-10}$	van der Veer et al. (2006)
Reservas Recém-Nascido (Condições Ótimas)	—	ME_B	$6.0 \times 10^{-11}$	Saraiva (2019)
Estrutura Recém-Nascido (Condições Ótimas)	—	MV_B	$7.92 \times 10^{-11}$	Saraiva et al. (2011a)
Maturidade Recém-Nascido (Condições Ótimas)	—	MH_B	$4.24 \times 10^{-11}$	Saraiva (2019)
Comprimento Recém-Nascido (Condições Ótimas)	—	L_B	$7.3 \times 10^{-3}$	Saraiva (2019)
Densidade Específica da Reserva e Estrutura	—	DV	0.2	Saraiva et al. (2012)
Potencial Químico das Reservas	$\mu_E$	MU_E	$6.97 \times 10^5$	Kooijman (2010)

## 4 – Análise e Discussão de Resultados

### 4.1 – Estuário Esquemático

#### 4.1.1 – Descrição do Estuário

A análise do crescimento de mexilhões azuis é feita inicialmente num estuário esquemático, onde todas as condições hidrodinâmicas e de qualidade da água são simuladas ao longo de um ano. O dinamismo deste estuário, sem a presença e influência de mexilhões, é inicialmente analisado através de uma simulação preliminar, sendo posteriormente, nas restantes simulações realizadas, incluída a presença de bivalves. A figura 8 representa a batimetria do estuário.

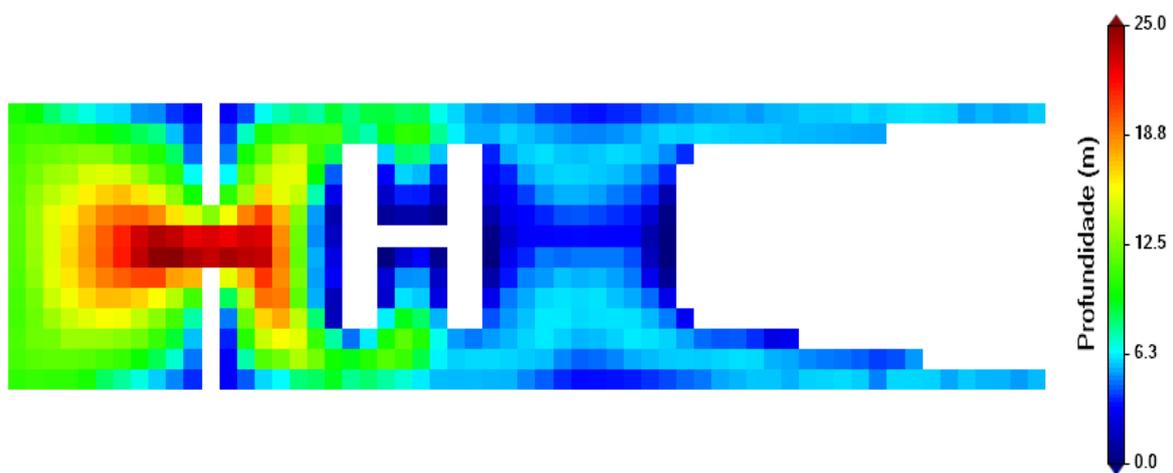


Figura 7 - Batimetria variável do estuário

Na região à direita do estuário afluem dois rios que convergem, e transportam nutrientes e outras propriedades para o sistema. A jusante encontra-se uma estrutura em forma de H. Desta estrutura para montante, as profundidades no estuário não excedem os 6,5 metros, e a jusante, há um estreito, onde as profundidades ultrapassam os 20 metros, a partir do qual se considera esta região como a última zona de transição para oceano aberto. Nesta região oceânica, no limite esquerdo do esquema, são definidas condições fronteira, para diversas propriedades, como temperatura da água, salinidade e concentrações de nutrientes, zooplâncton e fitoplâncton.

Para além da influência das descargas dos rios, a maré também condiciona a hidrodinâmica do estuário, assim como a evolução de temperatura e concentração de nutrientes e fitoplâncton ao longo do tempo de simulação, tornando possível analisar e comparar o crescimento de mexilhões em zonas vantajosas para o seu potencial cultivo. A influência da atmosfera nestas simulações ocorre ao nível da qualidade da água do estuário, através de radiação solar e fluxos gasosos, e não a nível hidrodinâmico, sendo definida velocidade nula para o vento.

## Temperatura

A temperatura da água no estuário é uma das propriedades diretamente afetadas pelas descargas dos rios e pela interação da água com a atmosfera (por convecção de calor), mas é também um fator que influencia os processos metabólicos dos mexilhões.

Inicialmente, a água encontra-se a uma temperatura de 15°C em todo o estuário, definida como condição inicial nas simulações, e como condição fronteira em oceano aberto, a temperatura é de 16°C.

As figuras 9 e 10 apresentam mapas de temperatura do estuário, a partir dos quais é possível verificar a sua evolução ao longo do ano, e o efeito de cada forçamento.

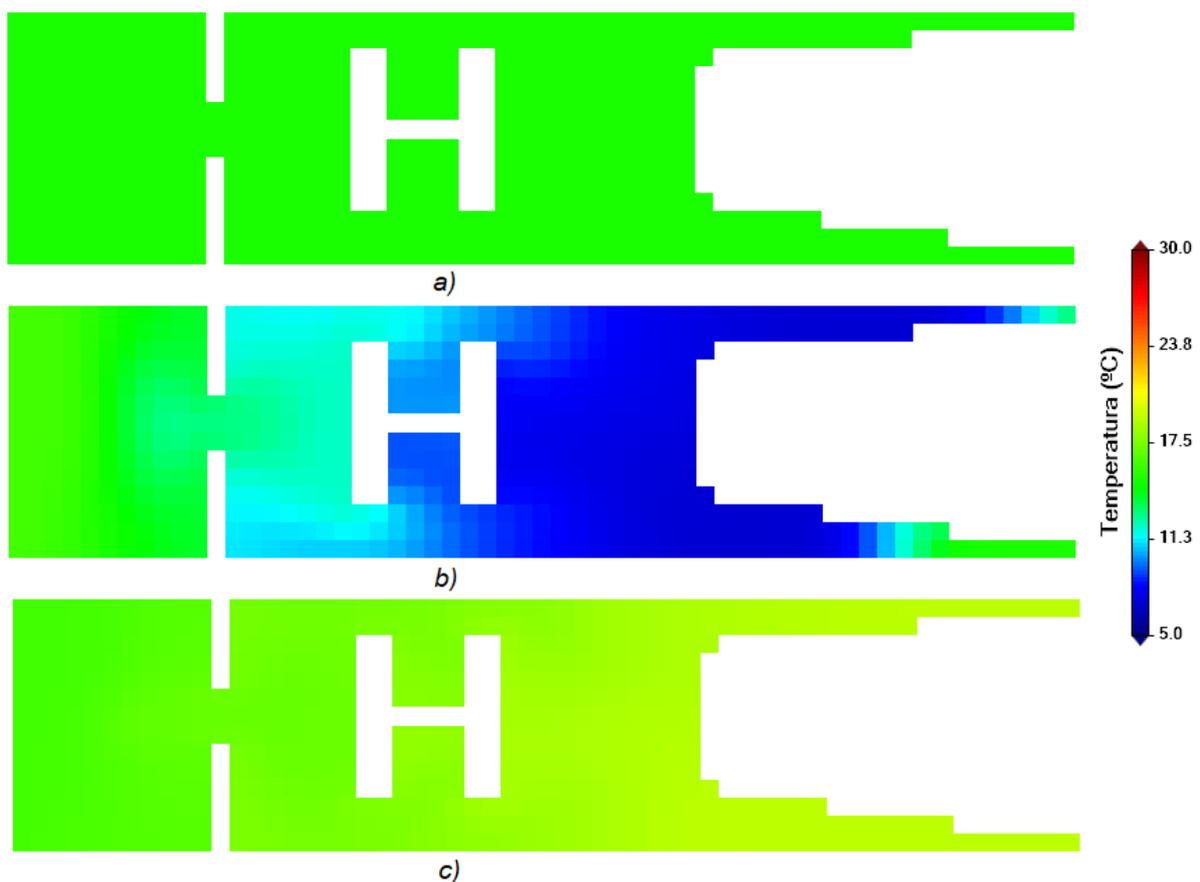


Figura 8 - Mapas de temperatura da água para os dias: a) 01 de Janeiro; b) 01 de Março; c) 01 de Junho

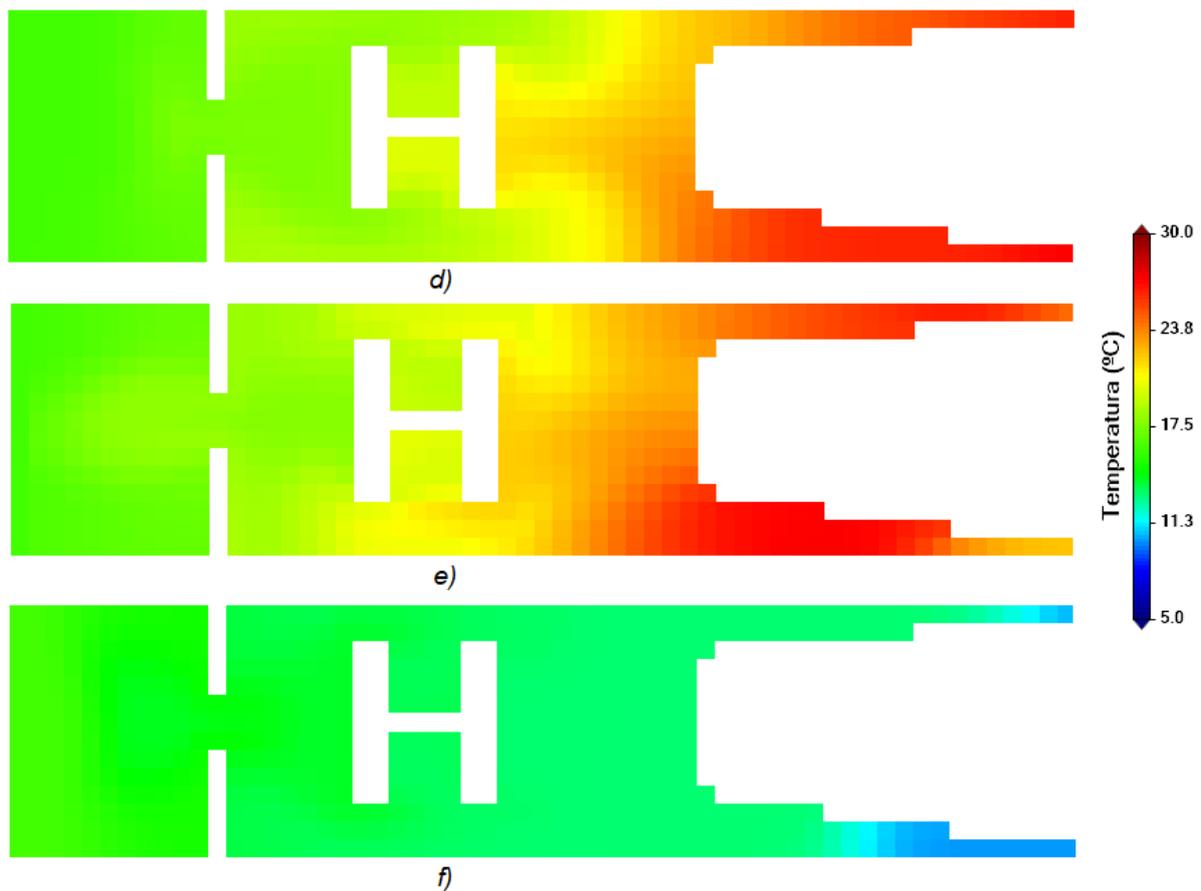


Figura 9 - Mapas de temperatura da água para os dias: d) 01 de Agosto; e) 01 de Setembro; f) 01 de Dezembro

No instante inicial da simulação, todo o estuário apresenta uma temperatura de 15°C, como já referido. No entanto, ao longo do ano verifica-se uma descida de temperaturas durante o primeiro trimestre, ilustrada no mês de Março, seguida de uma subida de temperaturas ao longo do Verão, até Setembro, voltando depois a descer nos restantes meses do ano.

Como esperado, as descargas têm um efeito determinante nas variações de temperatura do estuário, devido não apenas ao seu caudal, mas também à temperatura da água, estando os períodos de temperatura baixa e de temperatura alta, associados às estações frias e quentes, respetivamente.

O efeito da maré não é visível nas figuras 9 e 10, por não demonstrarem variações ao longo de um dia, no entanto, é possível perceber que na zona de oceano à esquerda do estuário, onde são definidas condições fronteira, o efeito de movimento ascendente e descendente provocado pelas marés, promove, naquela região, uma estabilização das temperaturas em torno do valor pré-definido na fronteira.

A temperatura e caudal das descargas, ao longo de cada mês do ano, são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Temperaturas e caudais das descargas dos rios, ao longo do ano

Mês	Sul	Norte	T (°C)
	Caudal (m³/s)	Caudal (m³/s)	
1	500.0	100.0	9
2	450.0	90.0	7
3	400.0	80.0	15
4	350.0	70.0	18
5	300.0	60.0	19
6	200.0	40.0	23
7	150.0	30.0	26
8	150.0	30.0	27
9	220.0	50.0	22
10	750.0	120.0	16
11	800.0	160.0	13
12	700.0	140.0	10

### Nutrientes

Quanto às concentrações de nutrientes e sedimentos no estuário, estas são influenciadas de forma semelhante à temperatura. A tabela 14 lista as concentrações iniciais de cada propriedade no sistema, e a sua respetiva condição fronteira, como também as concentrações transportadas nas descargas.

Tabela 14 - Propriedades no estuário (iniciais), descargas e condições fronteira.

Componente	Unidades	Estuário (iniciais)	Condição Fronteira	Rio Sul	Rio Norte
Salinidade	PSU	20.0	36.0	0.2	0.2
Sedimento Coesivo	mg/L	5.0	1.0	10.0	10.0
Oxigénio	mg/L	8.0	8.0	8.0	8.0
Nitrato	mg/L	0.05	0.01	0.5	0.5
Nitrito	mg/L	0.0005	0.0004	0.0005	0.0005
DONnr	mg/L	0.001	0.001	0.001	0.001
DOPnr	mg/L	0.001	0.001	0.001	0.001
DONr	mg/L	0.001	0.001	0.001	0.001
DOPr	mg/L	0.001	0.0001	0.001	0.001
Amónia	mg/L	0.02	0.1	0.1	0.1
Fósforo Inorgânico	mg/L	0.004	0.005	0.1	0.1
PON	mg/L	0.0005	0.0005	0.018	0.018
POP	mg/L	0.0005	0.0005	0.0025	0.0025

Contudo, para além dos *inputs* associados às descargas dos rios e os mecanismos de advecção e difusão no sistema, estão também presentes no estuário fitoplâncton e zooplâncton, que consomem

nutrientes e filtram sedimentos, exercendo também um efeito regulador relevante. Sedimentos coesivos e azoto e fósforo orgânicos, na forma particulada (PON e POP, respectivamente), sedimentam, com uma velocidade que se assume constante nas simulações realizadas e é igual a  $5 \times 10^{-5}$  m/s, e sofrem ainda processos de decaimento, consequentes da sua mineralização no fundo marinho do estuário, que os transforma em compostos orgânicos dissolvidos, como DON ou DOP, ou compostos inorgânicos dissolvidos, como a amônia, nitrato ou fósforo ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) (EPA, 1985).

Na figura 11, é apresentada a evolução da concentração de nitrato no estuário ao longo do ano, como exemplo de variação espacial e temporal da disponibilidade de nutrientes, essenciais para o crescimento de fitoplâncton no sistema.

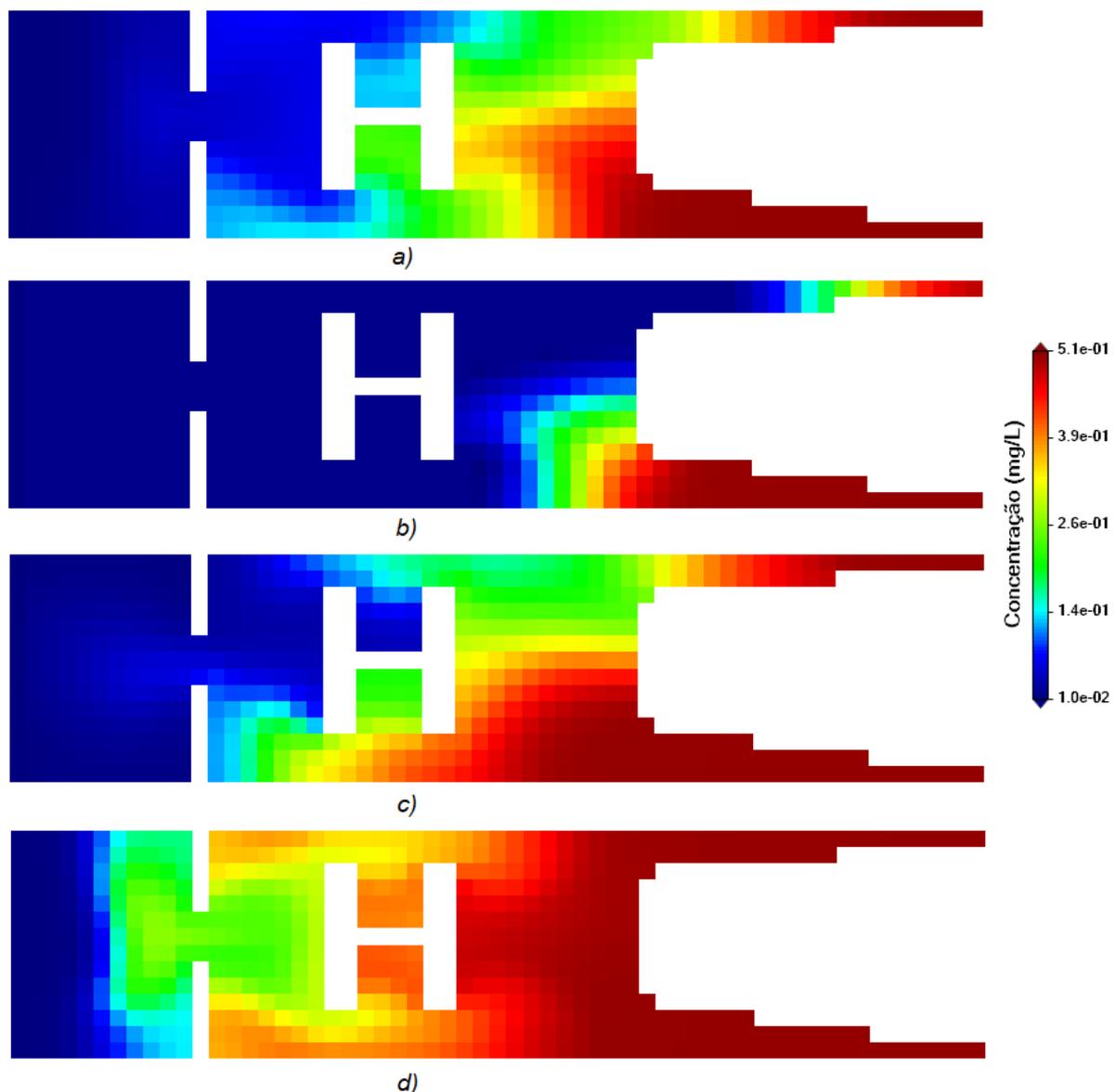


Figura 10 - Concentração de nitrato no estuário em: a) 8 de Janeiro; b) 24 de Maio; c) 8 de Outubro; d) 15 de Dezembro

No caso do nitrato, a concentração inicial no estuário é superior ao seu valor na fronteira oceânica, mas dez vezes inferior à concentração descarregada pelos rios. Verifica-se no início do ano um aumento na concentração deste nutriente no estuário, devido às descargas, e escassez durante os meses quentes de Verão. No final do ano, os níveis de nitrato voltam a aumentar. Apesar da entrada de nitrato através dos rios durante todo o ano, as baixas concentrações deste nutriente no estuário durante os meses quentes estão relacionadas com o consumo e crescimento de fitoplâncton.

Tal como no caso da temperatura, a condição fronteira definida na extremidade esquerda, juntamente com mecanismos de difusão e advecção, e efeitos de maré, estabilizam a concentração de nutrientes naquela região oceânica em valores próximos aos definidos na fronteira. Realisticamente, esta condição apresenta variabilidade, não só ao longo do tempo de simulação, como também espacial.

#### 4.1.2 – Fatores que Condicionam a Produção

Depois de descritas as condições de temperatura e nutrientes no estuário, são verificadas características físicas e biogeoquímicas, como disponibilidade de alimento e condições hidrodinâmicas, determinantes para o crescimento de mexilhões. Para se alimentarem, os mexilhões, tal como os restantes bivalves, filtram material em suspensão na coluna de água, como fitoplâncton, e para além disso, necessitam também de se fixar em substrato sólido, onde não podem estar expostos a velocidades de escoamento demasiado elevadas. Estes dois critérios são essenciais na análise e seleção de zonas do estuário onde há potencial de crescimento de mexilhões e é viável a implementação de sistemas de cultivo, mas também na exclusão de outras, que não são vantajosas para este propósito. Ao longo do ano, a disponibilidade de fitoplâncton, sem qualquer influência dos mexilhões, evolui conforme as figuras 12 e 13 ilustram.

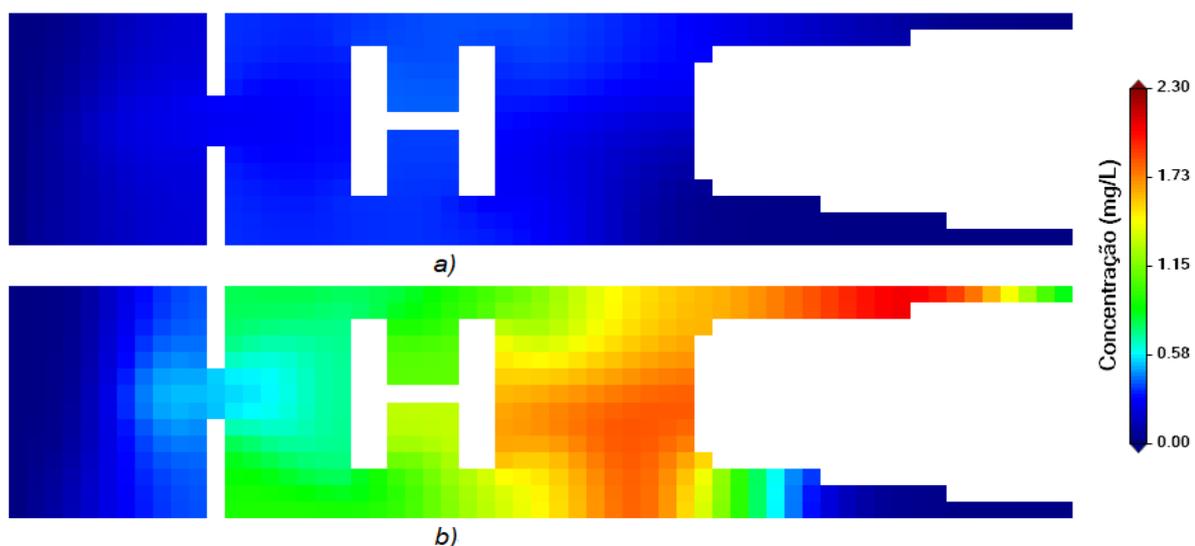


Figura 11 - Concentração de fitoplâncton no estuário em: a) 18 de Março; b) 17 de Junho

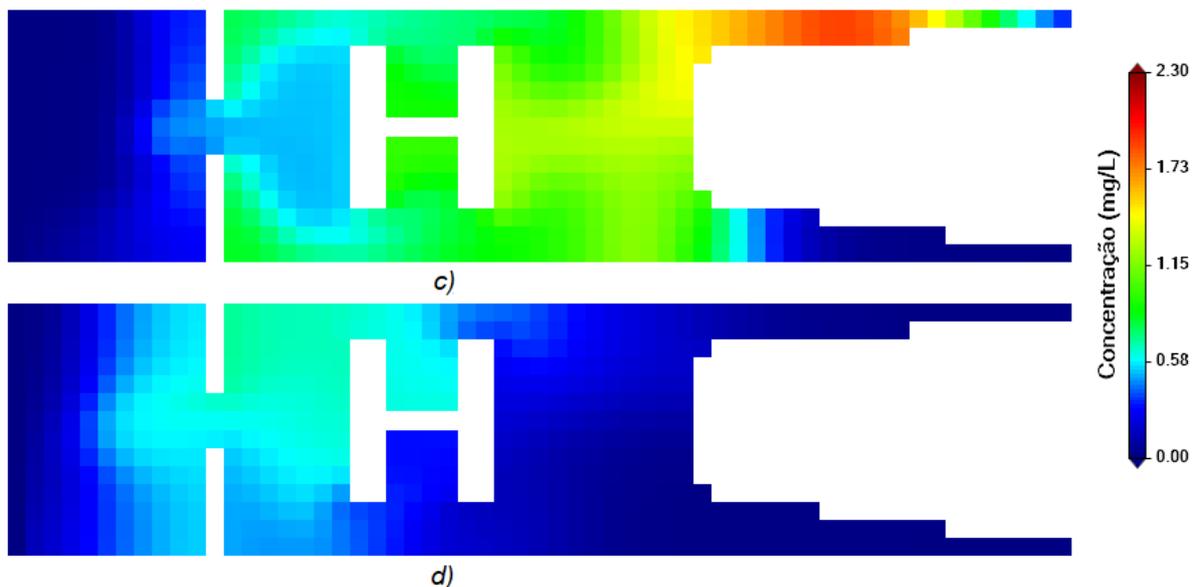


Figura 12 - Concentração de fitoplâncton no estuário em: c) 22 de Setembro; d) 10 de Novembro

A concentração inicial de fitoplâncton presente no estuário é, tal como para a condição fronteira e ambas as descargas, igual a 0.01 mg/L.

Ao longo do ano, a concentração de fitoplâncton aumenta até ao fim do Verão, diminuindo depois durante os últimos meses do ano. Esta evolução é oposta à evolução verificada anteriormente para o nitrato (na figura 11), confirmando uma relação de consumo por parte do fitoplâncton, que se intensifica durante os meses quentes e enfraquece durante os meses frios, devido à influência da temperatura nos processos de assimilação de nutrientes.

Em relação ao campo de velocidades no estuário, as figuras 14 e 15 apresentam uma descrição do seu módulo e direção.

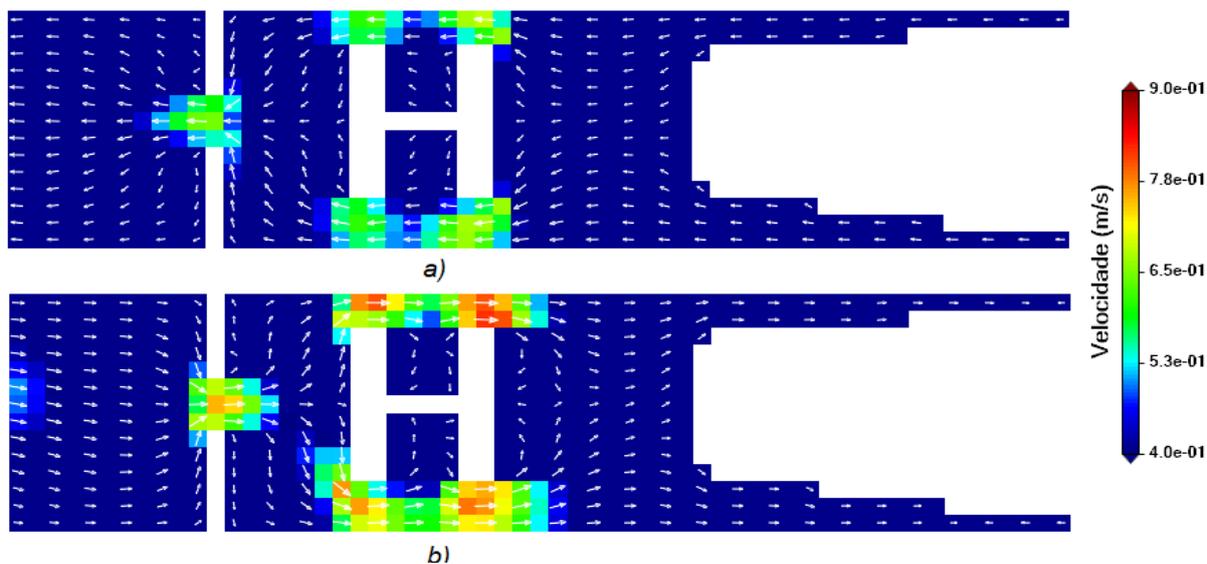


Figura 13 – Campo de velocidades no estuário em: a) 24 de Janeiro; b) 9 de Abril

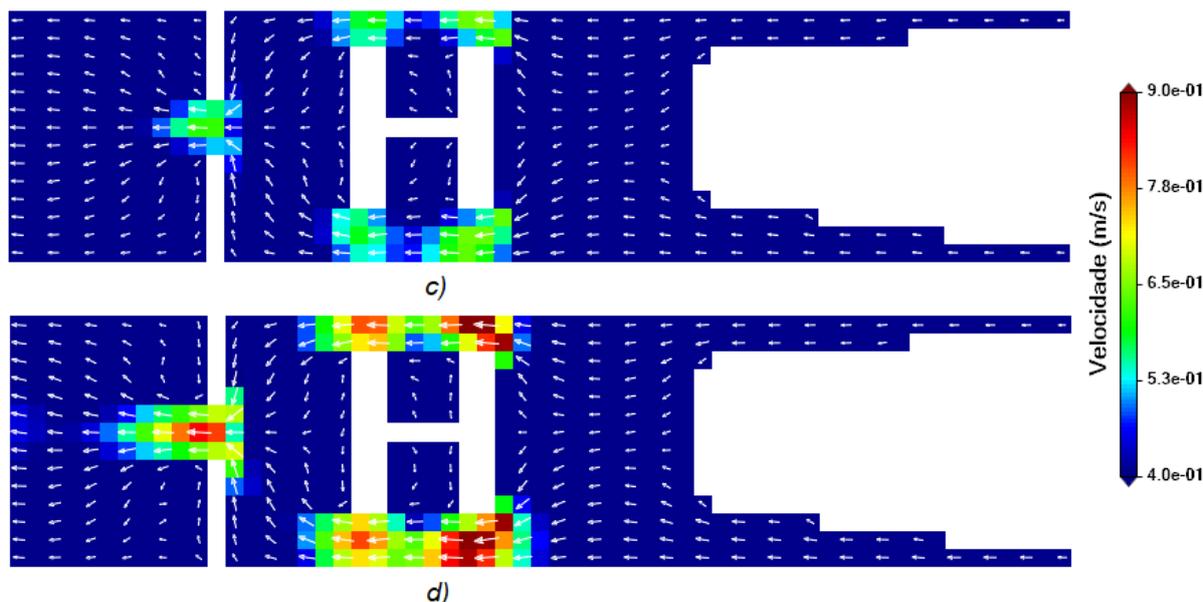


Figura 14 - Campo de velocidades no estuário em: c) 21 de Julho; d) 16 de Outubro

Está definida uma probabilidade de mortalidade de 50% para mexilhões expostos a uma velocidade de escoamento igual ou superior a 0.5 m/s, numa célula do estuário durante um passo temporal. As zonas a azul escuro representam velocidades inferiores a este limite, e nelas o crescimento de mexilhões não é colocado em risco ao longo do ano. Já nas zonas a norte e sul da estrutura em forma de H, e na saída do estuário, a oeste da mesma, as velocidades são superiores ao limite definido em diversos momentos do ano tais como os 4 ilustrados nas figuras, e, portanto, o crescimento e estabilidade de culturas nestes locais são inviabilizados.

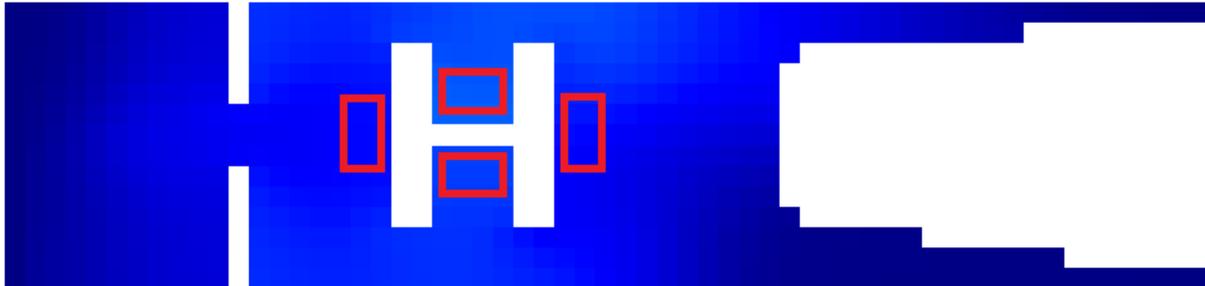
#### 4.1.3 – Identificação e Seleção de Locais para Cultivo

Analisados os dois fatores determinantes para o crescimento de mexilhões, procede-se à identificação de zonas onde o seu desenvolvimento é potenciado. Níveis altos de fitoplâncton impactam positivamente o crescimento dos mexilhões e durante os meses quentes, estes níveis são altos ao longo do troço na descarga a norte (devido ao baixo caudal comparativamente à descarga a sul), e na zona de convergência de ambas as descargas, atingindo concentrações superiores a 1.70 mg/L . Em torno da estrutura em forma de H, os níveis de fitoplâncton são também satisfatórios, com destaque para a zona a este, influenciada pela convergência das descargas. Durante os meses frios, a concentração de fitoplâncton é baixa em todo o estuário, sendo que, no início do ano, as zonas em torno da estrutura apresentam concentrações ligeiramente superiores, em comparação com as duas regiões a montante, associadas às descargas.

Devido às velocidades elevadas a norte e sul da estrutura em forma de H, apenas as regiões interiores, mais próximas à ponte horizontal desta estrutura, podem ser consideradas para estabelecimento de sistemas de cultivo. Na boca do estuário observam-se também velocidades acima do limite para os

mexilhões e como tal, esta zona é também inviabilizada para o crescimento destes organismos, ainda que neste local, se verifique uma concentração de fitoplâncton de cerca de 0.60 mg/L ao longo do ano.

Para a análise e comparação do crescimento de bivalves, estão identificadas regiões de interesse e na figura 16, são ilustrados os locais selecionados para estabelecimento de sistemas de cultivo.



*Figura 15 - Seleção de locais para sistemas de cultivo*

Os 4 locais selecionados localizam-se em torno da estrutura em forma de H, onde são instalados 4 bancos de cultivo, a oeste, sul, norte e oeste. A sua seleção tem como objetivo promover a comparação de características dos mexilhões nestes bancos, e verificar como os diferentes graus de exposição destes locais a alimento, quer ao nível de concentração como ao nível de duração de exposição a quantidades suficientes, afetam o seu crescimento e metabolismo.

#### **4.1.4 – Análise do Crescimento de Mexilhões**

Selecionadas as zonas para análise e comparação de características metabólicas dos mexilhões, é realizada uma nova simulação, para o mesmo período, na qual são introduzidos mexilhões nos 4 bancos de cultivo. Nesta simulação, não é considerado o crescimento dos mexilhões com o modelo populacional (é atribuído o valor 0 à *keyword* POPULATION no módulo *Bivalve*), e, portanto a população não varia, por processos de mortalidade ou eventos de desova.

Para além disso, os novos mexilhões em estado larval, com origem nos eventos de desova, não contribuem para o aumento do número de indivíduos, e são interpretados pelo modelo como nada mais que matéria orgânica na coluna de água.

A anulação de mecanismos de variação populacional nesta simulação permite uma melhor análise comparativa entre os bancos de cultivo, em relação a como diferentes níveis de exposição a nutrientes e alimento conduzem a diferenças nas características individuais dos mexilhões, como comprimento, estrutura ou reserva. A aplicação do modelo individual permite simular o crescimento de mexilhões num sistema de cultivo em aquacultura.

Por outro lado, caso se pretenda simular o crescimento em ambiente natural, não é tão realista desconsiderar a aplicação de um modelo populacional, pois, embora maior crescimento de mexilhões

de um banco de cultivo comparativamente aos outros seja um indicador de maior potencial de crescimento neste local, esta vantagem coloca estes mexilhões expostos a predadores antes dos mexilhões dos outros bancos. Os mexilhões que sobrevivem reproduzem-se, contribuindo para o aumento do número de *cohorts* e indivíduos. Através do balanço de reprodução e mortalidade nos bancos, a densidade populacional de cada um pode potencialmente aumentar ou diminuir, e ter mais ou menos mexilhões implica respetivamente maior ou menor divisão de alimento disponível por cada organismo, algo que afeta diretamente o seu desenvolvimento e metabolismo. O modelo populacional é considerado posteriormente, numa simulação que pretende considerar os efeitos mencionados.

Nesta secção estão incluídos não apenas mapas do estuário, com os bancos identificados, onde se pode analisar variabilidade espacial de determinada característica, mas também gráficos com a evolução temporal de parâmetros desejados, em 4 localizações fixas integradas em cada um dos bancos. Cada um dos bancos de cultivo apresenta uma densidade de mexilhões no valor de 400 indivíduos/m<sup>2</sup>, e deve ser interpretado, nesta simulação, como zonas de implementação de sistemas de produção de mexilhões.

### 1ª Simulação – Modelo Individual

Nos 4 locais de estudo, são analisadas e comparadas as 4 principais variáveis de estado definidas pelo modelo *DEB*: estrutura (através do comprimento), reserva, maturidade e *buffer* reprodutivo.

Começando pelo comprimento, as figuras 17 e 18 apresentam a sua evolução ao longo do ano.

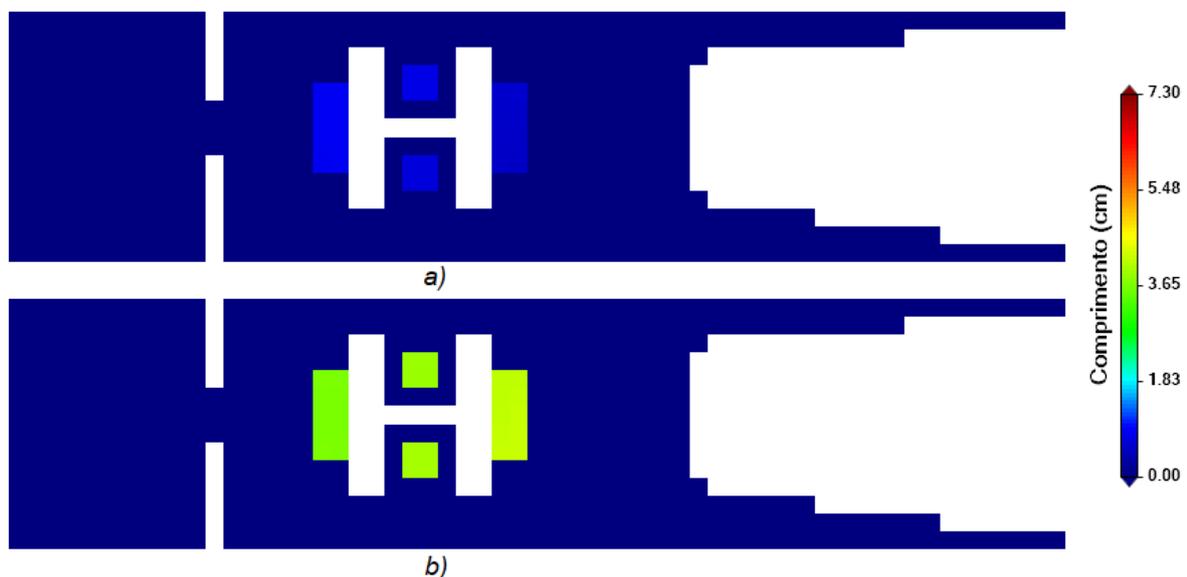


Figura 16 - Comprimento dos mexilhões nos bancos de cultivo do estuário, em: a) 1 de Abril; b) 1 de Agosto

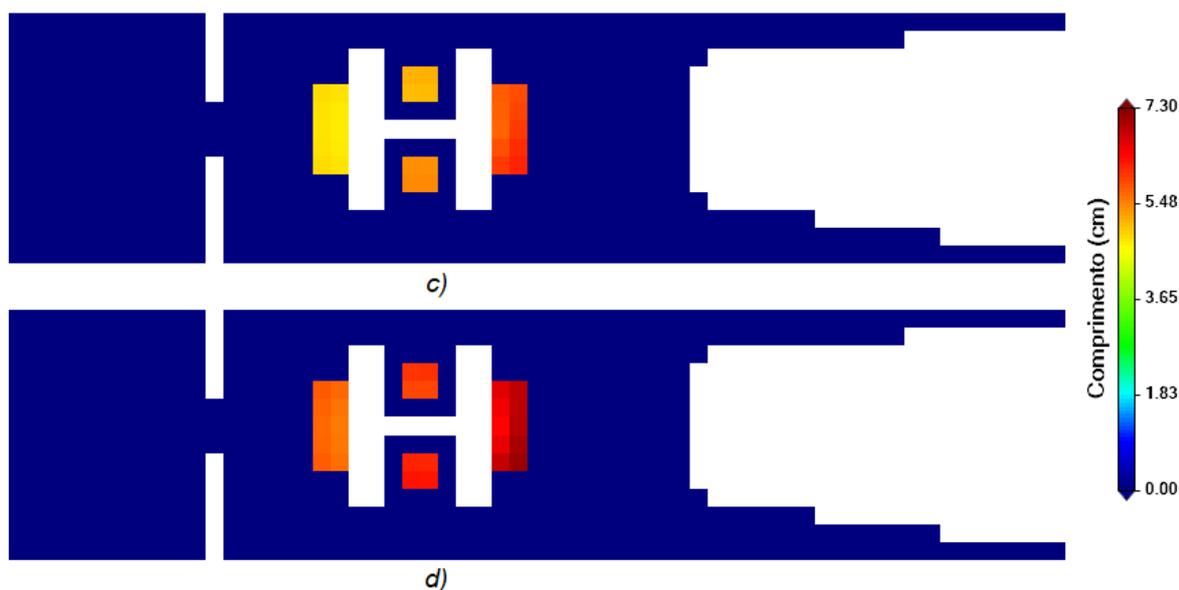


Figura 17 - Comprimento dos mexilhões nos bancos de cultivo do estuário, em: c) 1 de Outubro; d) 1 de Dezembro

Ao longo do ano, os mexilhões nos 4 bancos crescem gradualmente, chegando quase a 1 cm de comprimento no início de Abril, e cerca de 4 cm no dia 1 do mês de Agosto, sendo perceptível uma ligeira superioridade nos comprimentos dos mexilhões do banco Este em comparação com os outros três (a cor nos bancos Norte, Sul e Oeste é ligeiramente mais esverdeada, o que corresponde a valores inferiores de acordo com a legenda da figura). Os restantes mapas, c) e d), apresentam diferenças mais vincadas entre os 4 bancos de cultivo. A 1 de Outubro, o banco Oeste apresenta mexilhões com comprimentos de cerca de 4,5 cm, o menor entre os 4, e no banco Este registam-se comprimentos superiores a 5,5 cm. A 1 de Dezembro todos os bancos de cultivo têm mexilhões com comprimentos superiores a 5 cm, continuando o banco Este a liderar neste critério.

Através das figuras, verificam-se, a partir de Outubro, cores mais escuras nas zonas exteriores de cada banco, significando maior comprimento relativamente às zonas interiores. Isto deve-se ao facto da concentração de alimento transportado para as zonas interiores de cada banco ser reduzida pelo consumo por parte dos mexilhões nas zonas exteriores. Menor disponibilidade de fitoplâncton implica crescimento mais lento.

A figura 19 permite ainda uma comparação mais direta entre as 4 localizações para cultivo, através de séries temporais em pontos fixos nas zonas externas de cada banco.

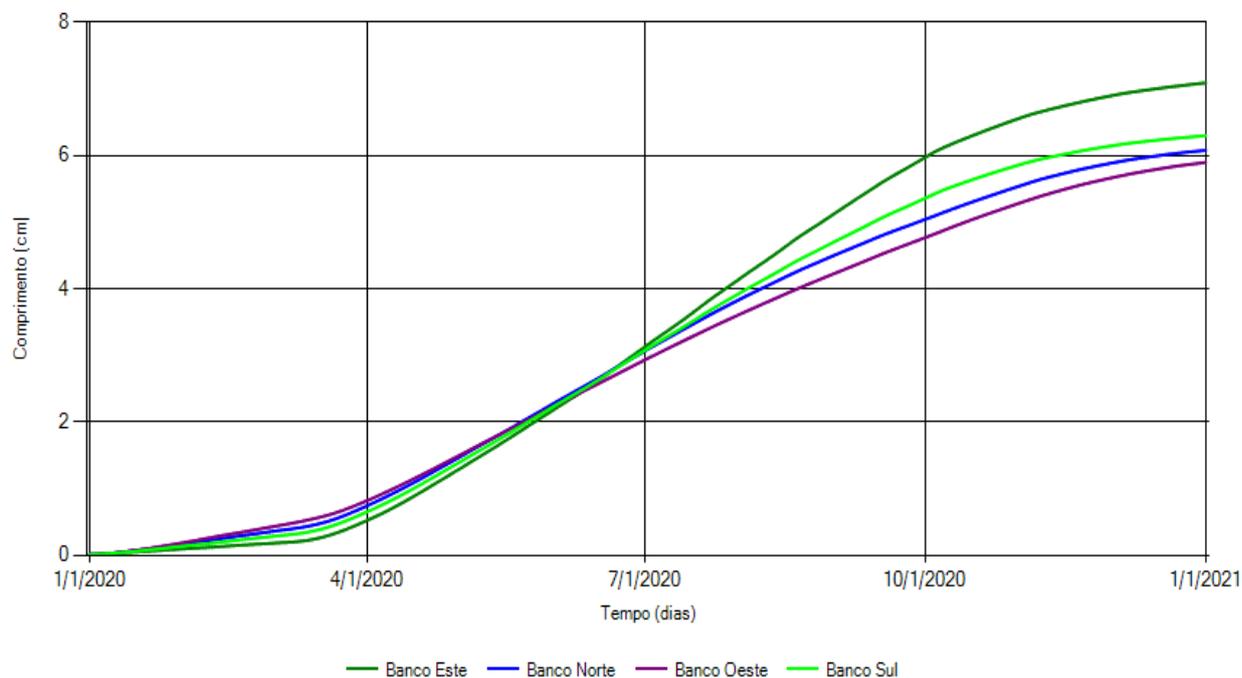


Figura 18 - Séries temporais para o comprimento de mexilhões nos bancos de cultivo

Durante o primeiro semestre, os comprimentos são aproximadamente iguais, tendo o banco Oeste o maior comprimento e o banco Este o menor. No segundo semestre, os bancos diferenciam-se e o banco Este atinge, no final do ano, o maior comprimento de mexilhão, com cerca de 7 cm, seguido dos bancos Sul, Norte e Oeste, com comprimentos em torno dos 6 cm.

O crescimento dos mexilhões depende da concentração de fitoplâncton, da dinâmica da reserva dos organismos e dos custos energéticos de manutenção estrutural (prioritários na alocação de energia), e na figura, verificam-se taxas de crescimento (declive das curvas) elevadas entre Abril e Outubro, que indicam crescimento mais rápido dos mexilhões. Através das figuras 12 e 13 observa-se que, durante este período, há maior concentração de fitoplâncton nas zonas do estuário onde os bancos estão localizados, o que implica maior taxa de assimilação e conseqüentemente, crescimento mais rápido (maior declive nas curvas de comprimento).

Ligado ao nível de alimento, a concentração de sedimentos na coluna de água também influencia o crescimento dos bivalves. Os sedimentos são filtrados juntamente com o alimento, e a sua concentração tem efeito negativo na taxa de filtração, pois quanto maior a quantidade de sedimentos o organismo filtra por unidade de tempo, menor é a sua capacidade para filtrar fitoplâncton.

As figuras 20 e 21 descrevem respectivamente, a evolução da concentração de fitoplâncton e sedimentos coesivos nos bancos de cultivo.

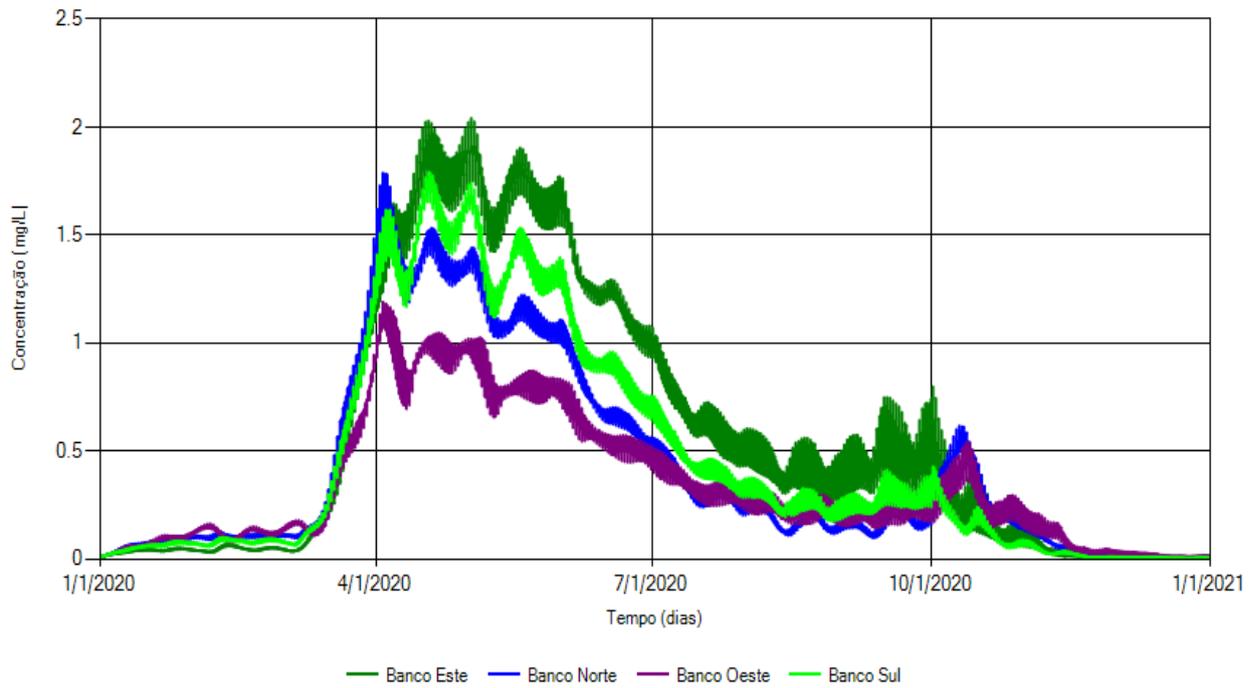


Figura 19 - Concentração de fitoplâncton nos bancos de cultivo

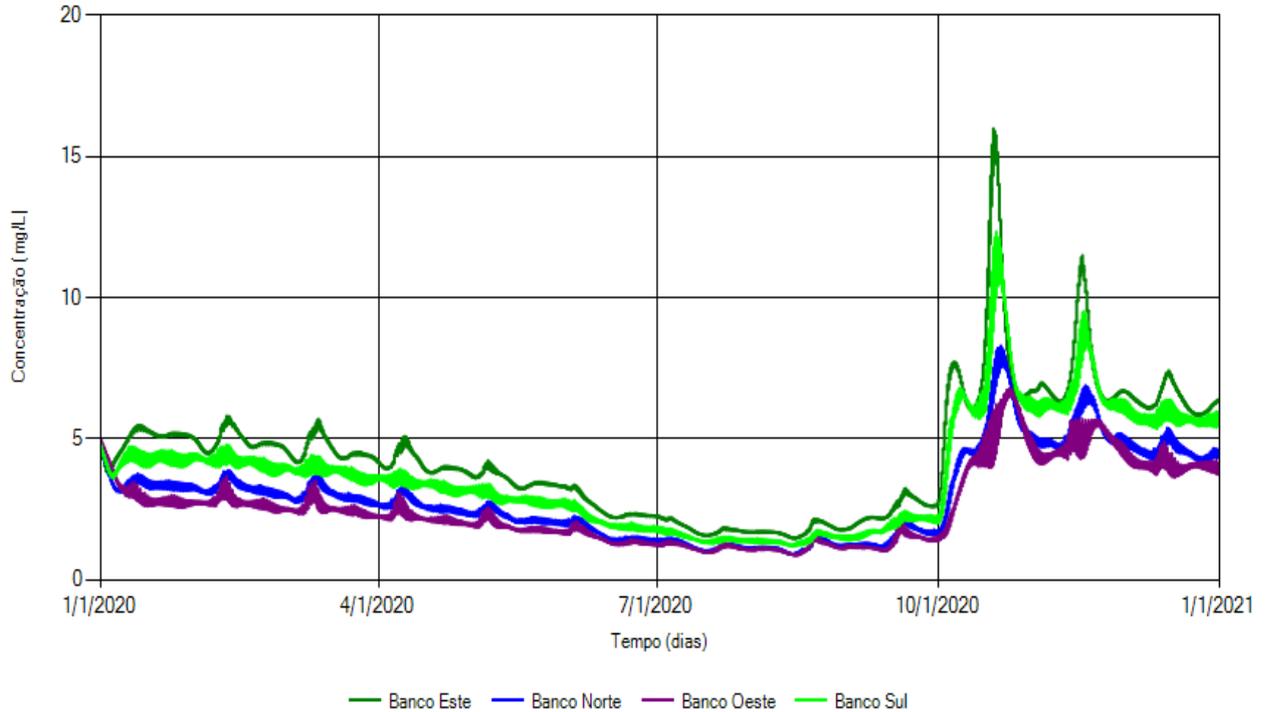


Figura 20 - Concentração de sedimentos coesivos nos bancos de cultivo

Tal como indicado anteriormente, a taxa de crescimento dos mexilhões é maior durante o período entre início de Abril e início de Outubro, e a figura 20 confirma que a justificação para tal é de facto a elevada concentração de fitoplâncton que se verifica durante este período nos bancos de cultivo.

Até Abril, a disponibilidade de alimento é baixa, sendo por isso o crescimento dos mexilhões lento, e associado a este dado, o banco Este é aquele que apresenta maior concentração de sedimentos, seguido do banco Sul, banco Norte e banco Oeste, ordem oposta à que se observa para os comprimentos dos mexilhões durante quase todo o primeiro semestre de simulação. Tal acontece, pois para baixos níveis de fitoplâncton, os bancos com maior concentração de sedimentos têm o seu crescimento limitado relativamente aos restantes.

Como a partir de Abril as concentrações de alimento aumentam consideravelmente, e os bancos Este e Sul são os mais beneficiados, inicia-se uma inversão de ordem no gráfico da evolução de comprimento, que ocorre em Junho e o banco Este passa a ser aquele com mexilhões de maior comprimento. Maior concentração de alimento implica maior taxa de assimilação, e mais energia disponível para investir no crescimento, que se torna mais rápido.

A partir de Outubro, até ao final do ano, as concentrações de sedimentos aumentam, e a concentração de fitoplâncton volta a baixar para níveis semelhantes aos do início do ano, baixando também a taxa de crescimento dos mexilhões. Os comprimentos finais dos 4 bancos apresentam relação direta com os níveis de fitoplâncton em cada banco durante o período de maior disponibilidade, entre Abril e Outubro, sendo o banco Este aquele com maior comprimento final e maior concentração de fitoplâncton durante quase todo este período, seguindo-se os restantes na ordem já conhecida.

As concentrações de fitoplâncton e sedimentos são fatores responsáveis pela limitação ou estímulo do crescimento. No entanto, durante o segundo período de escassez de alimento, no último trimestre, é importante que a evolução da reserva dos mexilhões nos bancos de cultivo seja analisada, pois afeta as suas taxas de mobilização e crescimento.

O alimento filtrado, ingerido e assimilado, é alocado na reserva do organismo, e a partir desta, 67% da energia é transportada para o crescimento e a manutenção somática (de acordo com a regra da fração  $\kappa$ ), enquanto os restantes 33% são alocados para maturidade e a sua manutenção, e *buffer* reprodutivo (dependendo do estado de maturidade do mexilhão).

Relativamente à fração de energia dedicada à estrutura do mexilhão, a manutenção é um processo prioritário, proporcional à estrutura do organismo, e a energia restante é investida no seu crescimento. No primeiro período de escassez de alimento, até início de Abril, o mexilhão está a crescer, tendo um comprimento ainda curto, e, portanto, a taxa de manutenção somática é praticamente negligenciável. Isto implica que praticamente toda a energia alocada neste setor metabólico do organismo é investida no seu crescimento, mas como a concentração de fitoplâncton é muito reduzida, este processo é limitado por baixas taxas de assimilação.

No segundo período de escassez de alimento, de início de Outubro até ao final do ano, os mexilhões apresentam uma estrutura já muito superior e nesta fase a taxa de manutenção somática é significativa,

deixando o fluxo mobilizado para o crescimento menor. Esta limitação é possivelmente determinante para que, durante este período, o crescimento dos mexilhões seja mais lento.

Outro fator determinante para a limitação do crescimento dos mexilhões está diretamente ligado ao nível de reserva. Com a redução da concentração de alimento, do qual a taxa de assimilação depende diretamente, o balanço entre esta taxa e a de mobilização, que depende da densidade de reserva, conduz a uma redução da reserva do mexilhão. Esta redução de reserva implica redução na sua densidade, e por efeito, diminuição da taxa de mobilização, o que afeta negativamente a taxa de crescimento.

Durante o período intermédio, onde há disponibilidade de alimento em abundância, a taxa de crescimento dos mexilhões é mais alta, e é expectável a acumulação de reserva por parte dos mexilhões, e conseqüentemente uma maior mobilização tanto para a estrutura dos indivíduos, como para os restantes processos metabólicos.

Na figura 22, apresentada é ilustrada a evolução das reservas dos mexilhões nos bancos de cultivo.

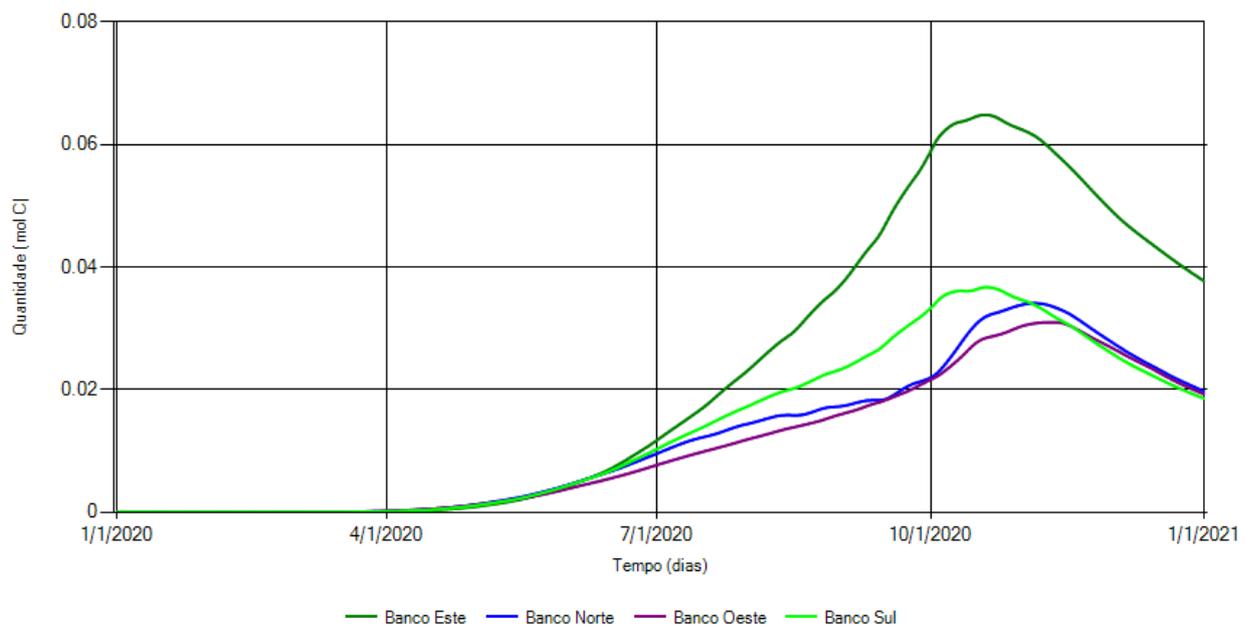


Figura 21 - Evolução da reserva nos mexilhões nos bancos de cultivo

Tal como expectável, a figura mostra acumulação de reserva para os 4 bancos de cultivo durante o período de maior disponibilidade de alimento, e o banco Este é aquele que acumula mais reserva, seguindo-se o banco Sul e os bancos Norte e Oeste, devido aos perfis de concentração de fitoplâncton. Maior acumulação de reserva resulta de maiores períodos de exposição a concentrações de alimento superiores.

Na figura observam-se, para o primeiro período de escassez de alimento, níveis de reserva nulos ou quase nulos, comprovando que durante este período inicial da simulação, baixas concentrações de

fitoplâncton levam a baixas taxas de assimilação e pouca acumulação de reserva, sendo este o fator determinante para a limitação do crescimento dos mexilhões.

Depois de ser acumulada durante o período de maior abundância de alimento, verifica-se redução na reserva dos mexilhões dos 4 bancos de cultivo, durante o segundo período de escassez de alimento, devido a uma taxa de mobilização que não é compensada por assimilação de alimento. Apesar da escassez de fitoplâncton, os mexilhões estão aptos a cumprir os custos metabólicos, mas, para comprimentos (e níveis de estrutura) altos e crescentes, os custos de manutenção somática representam uma porção considerável da fração  $\kappa$  da energia mobilizada, sobrando progressivamente menos energia destinada ao crescimento, o que o torna mais lento. A redução da reserva (e da densidade de reserva) leva também a uma redução na taxa de mobilização e energia investida no crescimento. Os custos de manutenção somática e o impacto da redução da concentração de alimento no nível de reserva dos mexilhões são fatores determinantes na limitação do crescimento dos mexilhões durante este período.

Os 4 bancos de cultivo apresentam evoluções semelhantes na concentração de fitoplâncton, e conseqüentemente, evoluções semelhantes no nível de reserva e perfis de crescimento idênticos. Neste cenário, maior disponibilidade de alimento implica maior comprimento final, como se verifica para o banco Este.

Para além da disponibilidade de alimento e dos crescentes custos de manutenção somática, a temperatura da água também condiciona os processos metabólicos dos mexilhões, como a taxa de crescimento ou a de assimilação por exemplo. A simulação é realizada com o fator corretivo de Arrhenius formulado na tabela 3, tal como os restantes parâmetros necessários para a formulação.

A figura 23 apresenta a evolução da temperatura para os bancos de cultivo.

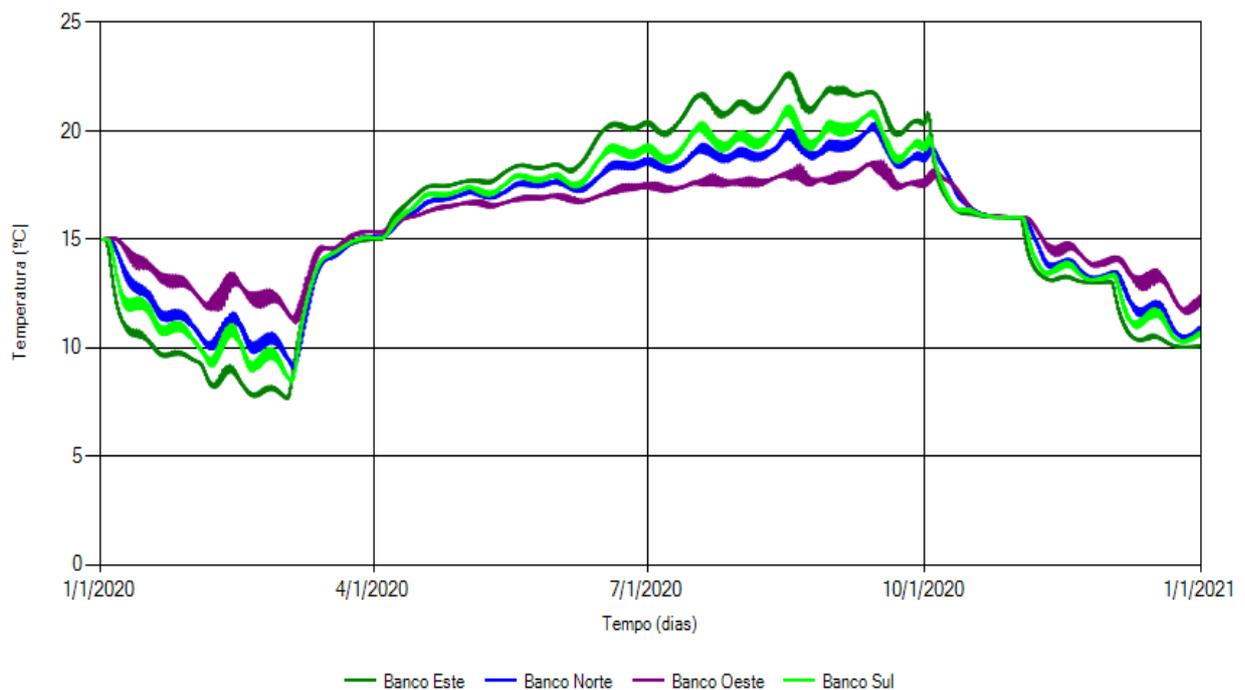


Figura 22 - Evolução da Temperatura nos bancos de cultivo

Durante os períodos de escassez de alimento, os bancos apresentam temperaturas na ordem inversa à do período de abundância. No primeiro trimestre, onde a baixa concentração de alimento e a presença de sedimentos condicionam a taxa de crescimento, a ordem dos bancos de cultivo é a mesma ao nível da temperatura e taxa de crescimento, sendo também a temperatura um fator limitante. No segundo período de escassez de fitoplâncton, o comprimento dos mexilhões cresce lentamente e a diferença de temperaturas entre os bancos de cultivo não é significativa.

Ao longo do período de abundância de fitoplâncton, o banco Este é aquele que apresenta maior temperatura, e em seguida os bancos Sul, Norte e Oeste. Os bancos seguem esta mesma ordem decrescente para os comprimentos finais dos seus mexilhões e para as taxas de assimilação e crescimento durante este período.

A fração  $1-\kappa$  de energia mobilizada para a produção de gâmetas, maturidade e a sua manutenção, em cada banco de cultivo, é condicionada pelos mesmos fatores que influenciam o crescimento dos mexilhões. A figura 24 mostra a evolução do nível de maturidade nos 4 bancos.

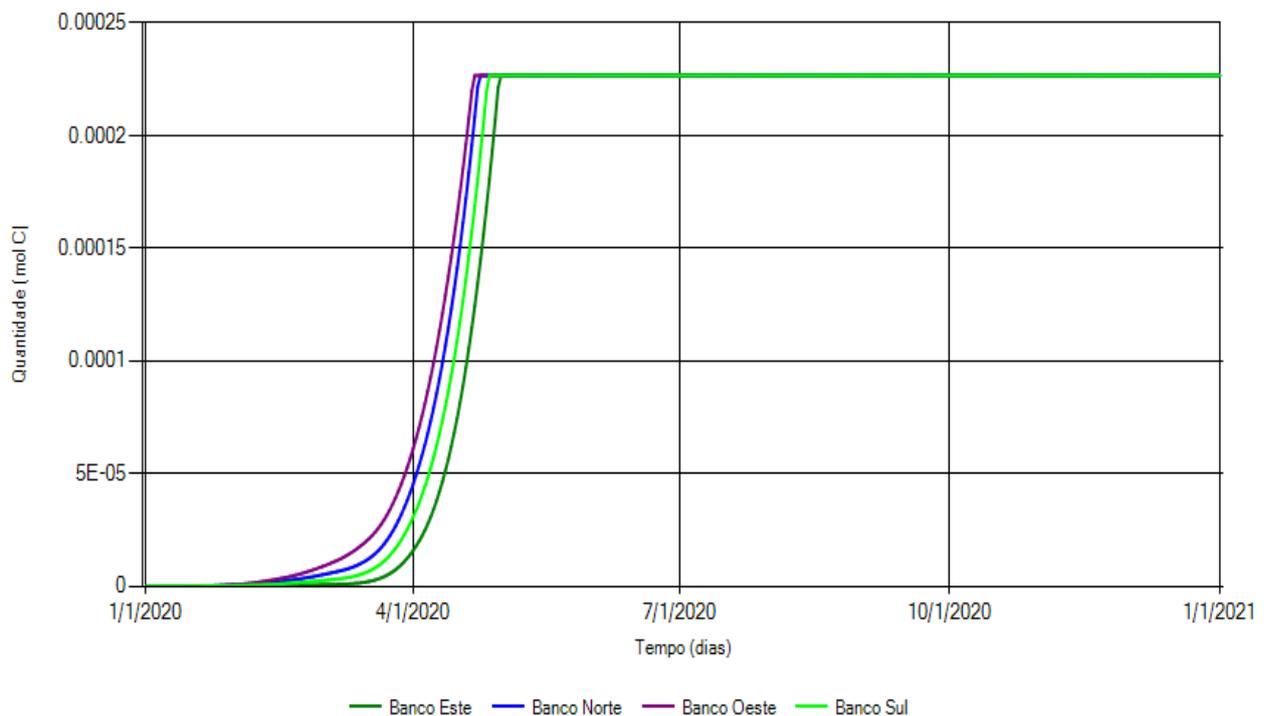


Figura 23 - Evolução de maturidade nos bancos de cultivo

A evolução da maturidade é muito semelhante à evolução do comprimento durante o primeiro trimestre da simulação, pois tratando-se de um período de escassez de alimento para os 4 bancos, a rapidez com que os mexilhões de cada banco maturam é, tal como o seu crescimento, influenciada pela concentração de sedimentos coesivos, que interfere na assimilação de alimento.

O banco Este, com maior concentração de sedimentos, é aquele com taxa de maturação mais lenta, seguindo-se os restantes, bancos Sul, Norte e Oeste, com taxas de maturação progressivamente superiores e concentrações de sedimentos progressivamente menores.

Ao longo do mês de Abril, os mexilhões de todos os bancos de cultivo tornam-se adultos, o que significa que a mobilização de energia, previamente alocada em maturidade, passa a ser investida na produção de gâmetas.

A partir desse momento, podem ocorrer eventos de desova, dependendo do índice gonado-somático (GSR) do indivíduo, e da temperatura da água, e nas tabelas 11 e 12, onde se encontram os parâmetros do módulo *Bivalve*, os valores mínimos definidos para que ocorra desova, são 9.6°C e 0.2 para a temperatura e o GSR respectivamente. Estes eventos conduzem ao nascimento de novos mexilhões.

A figura 25 descreve a evolução do *buffer* reprodutivo nos bancos de cultivo.

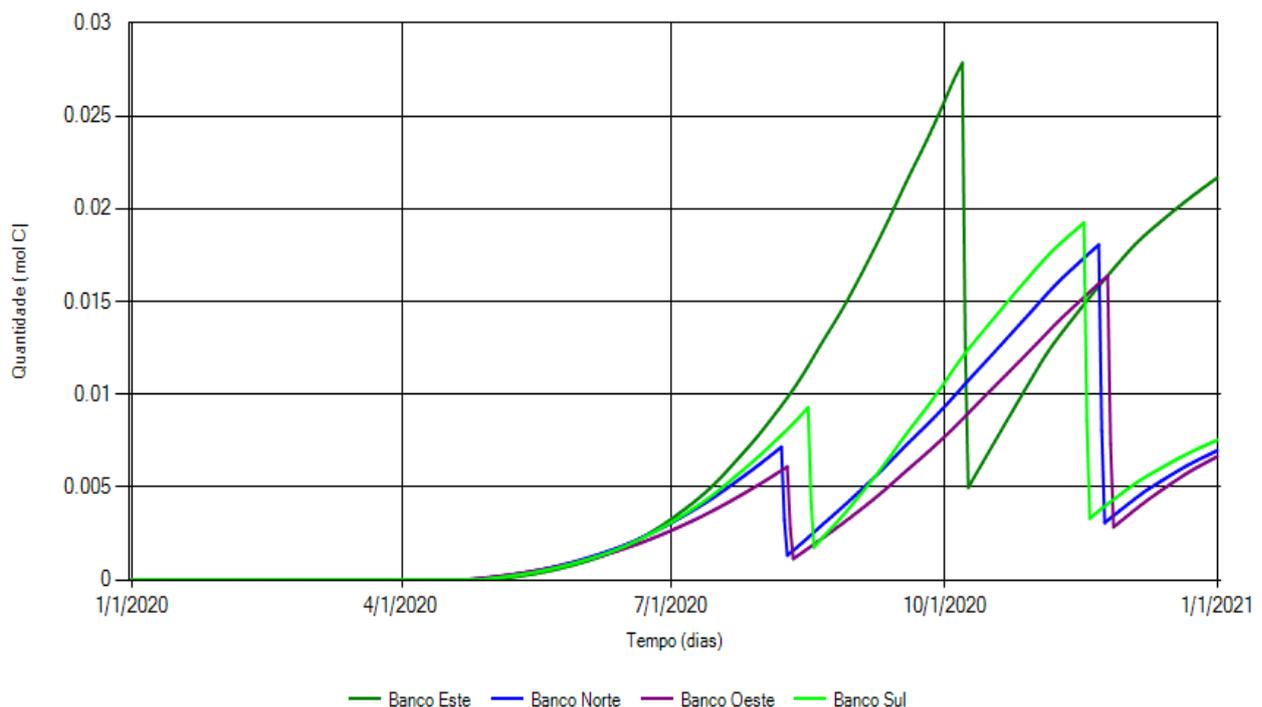


Figura 24 - Evolução do *buffer* reprodutivo nos bancos de cultivo

Em Agosto ocorrem 3 eventos de desova consecutivos, envolvendo os bancos Norte, Oeste e Sul, e mais tarde, em Novembro, ocorrem novamente 3 eventos de desova nestes mesmos bancos de cultivo. No banco Este, o único evento de desova ocorre no início de Outubro.

O número de ovos libertados por cada mexilhão, em cada um destes eventos, é descrito na figura 26. No gráfico exposto na figura, a produção de ovos em cada evento de desova é descrita por taxas, que relacionam o número de ovos produzidos por cada mexilhão, por unidade de tempo. A unidade de tempo definida é o dia. O modelo interpreta o tempo de ocorrência de um evento de desova (definido por  $R^{spawn}$  na tabela 9) com duração de um passo temporal, que neste caso é de 60 segundos, e converte esse curto período em dias, devolvendo então as taxas apresentadas para esta unidade temporal.

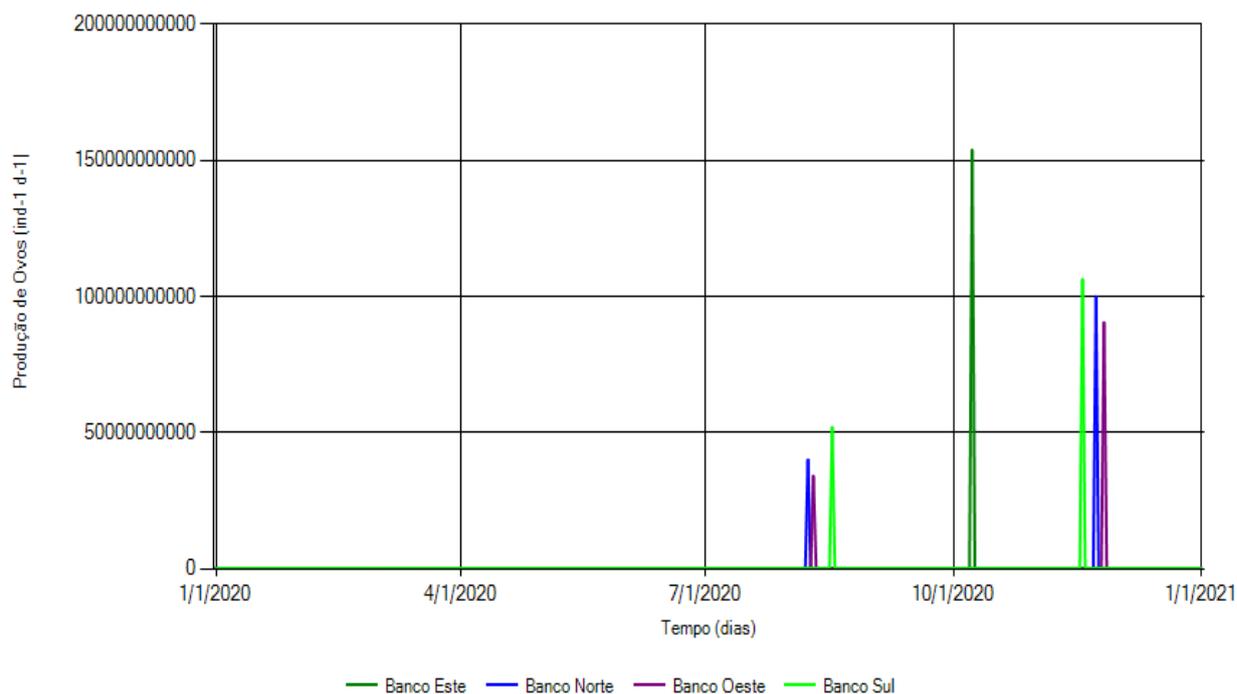


Figura 25 - Número de ovos libertados nos eventos de desova

De acordo com Zabata et al. (2008) e Saurel et al. (2022), o número de ovos produzidos por mexilhão num evento de desova varia normalmente entre 5 e 8 milhões, podendo este número, no caso de mexilhões de grande dimensão, chegar aos 40 milhões de ovos produzidos. Nesta simulação, verificam-se para todos os eventos de desova, números de ovos produzidos em ordens de grandeza bastante superiores, na ordem dos  $10^{11}$  ovos produzidos por indivíduo, à escala diária, o que equivale a uma produção por mexilhão na ordem dos  $10^8$  ovos.

Como é possível consultar na tabela 10, com as formulações do modelo populacional, o número de gâmetas libertado por indivíduo num evento de desova, é dependente do *buffer* reprodutivo, mas também da eficiência de reprodução e das quantidades de reserva e estrutura de um mexilhão recém nascido. De forma a corrigir o número de ovos produzidos para valores enquadrados com aqueles indicados no parágrafo anterior, é necessário reconfigurar, no mínimo, um destes parâmetros.

Alterar o valor da fração  $\kappa$  condicionaria o momento de ocorrência de desova, que depende da proporção de gâmetas no mexilhão ( $GSR \geq 0.2$ ). Aumentá-la conduziria a um maior investimento no crescimento, e a condição mínima relacionada com o índice gonado-somático seria verificada mais tarde, resultando num evento de desova atrasado (relativamente ao que acontece com a fração  $\kappa$  inicial), mas com número de ovos produzidos na mesma ordem de grandeza. O mesmo aconteceria caso a fração  $\kappa$  fosse reduzida e uma maior porção de energia fosse alocada em maturidade e reprodução, com eventos de desova a ocorrer mais cedo. Para além disso, para a fração  $\kappa$  definida, são obtidos comprimentos de mexilhão enquadrados com os valores expectáveis, e este valor deve por base, ser considerado fixo na descrição do metabolismo do organismo.

Também não é realista reduzir a eficiência de reprodução, que é inicialmente igual a 95%. Seria necessário que esta eficiência fosse muito próxima de zero, para contrabalançar a elevada ordem de grandeza do número de ovos produzidos.

As quantidades de estrutura e reserva num mexilhão recém-nascido são os parâmetros suscetíveis de alteração, pois não intervêm com nenhum processo metabólico, e neste estudo é escolhida a segunda opção – a estrutura. Na tabela 15, são apresentados o valor definido inicialmente para esta simulação, e um novo valor, adotado de forma a cumprir com um cenário de produção de ovos mais realista.

*Tabela 15 - Parâmetros de quantidade de reserva para um mexilhão recém-nascido*

Estrutura de Recém-nascido	Fonte
$7.92 \times 10^{-11}$	Saraiva et al. (2011a)
$3.33 \times 10^{-9}$	Van de Meer et al. (2006)

A escolha do novo valor do parâmetro de estrutura é testada tomando o evento de desova no banco Este como referência. Aplicado o novo valor à fórmula da tabela 9 relativa ao número de ovos produzidos diariamente por indivíduo, é verificado se o enquadramento do resultado na gama pretendida.

Começa-se por calcular a taxa diária de produção de ovos por indivíduo, neste evento de desova, para o valor de estrutura num mexilhão recém-nascido indicado por Saraiva et al. (2011a), tal como se encontra ilustrado no gráfico da figura 26.

$$N_i^{spawn} (\# ind^{-1}) = \frac{k_R(M_R - M_{RE})}{M_E^b + M_V^b} = \frac{0.95 \times (0.02785 - 0.01241)}{6 \times 10^{-11} + 7.92 \times 10^{-11}} \approx 1.05 \times 10^8 \quad (1)$$

$$N_i^{spawn} (\# ind^{-1} d^{-1}) = \frac{N_i^{spawn} (\# ind^{-1})}{R^{spawn}} = \frac{1.05 \times 10^8}{\left(\frac{60}{86400}\right)} \approx 1,51 \times 10^{11} \quad (2)$$

O valor obtido para a produção diária de ovos por indivíduo corresponde ao valor observado para o evento de desova do banco Este. O valor equivalente, de produção de ovos por indivíduo é bastante superior ao valor indicado para esta espécie de mexilhão.

Substituindo o valor de estrutura pelo valor indicado por van de Meer et al. (2006), obtém-se menor produção de ovos por mexilhão.

$$N_i^{spawn} (\# ind^{-1}) = \frac{k_R(M_R - M_{RE})}{M_E^b + M_V^b} = \frac{0.95 \times (0.02785 - 0.01241)}{6 \times 10^{-11} + 3.33 \times 10^{-9}} \approx 4.33 \times 10^6 \quad (3)$$

Este valor encontra-se enquadrado com os valores de produção indicados, de 5 milhões de ovos produzidos por mexilhão.

$$N_i^{spawn} (\# ind^{-1} d^{-1}) = \frac{N_i^{spawn} (\# ind^{-1})}{R^{spawn}} = \frac{4.33 \times 10^6}{\left(\frac{60}{86400}\right)} \approx 6.11 \times 10^9 \quad (4)$$

A taxa diária de produção de ovos por mexilhão é igual ao valor calculado acima, com uma magnitude menor que o valor previamente simulado para este evento de desova no banco Este. Na figura 27, são apresentados os eventos de reprodução atualizados para o novo valor adotado para a estrutura de mexilhão recém-nascido.

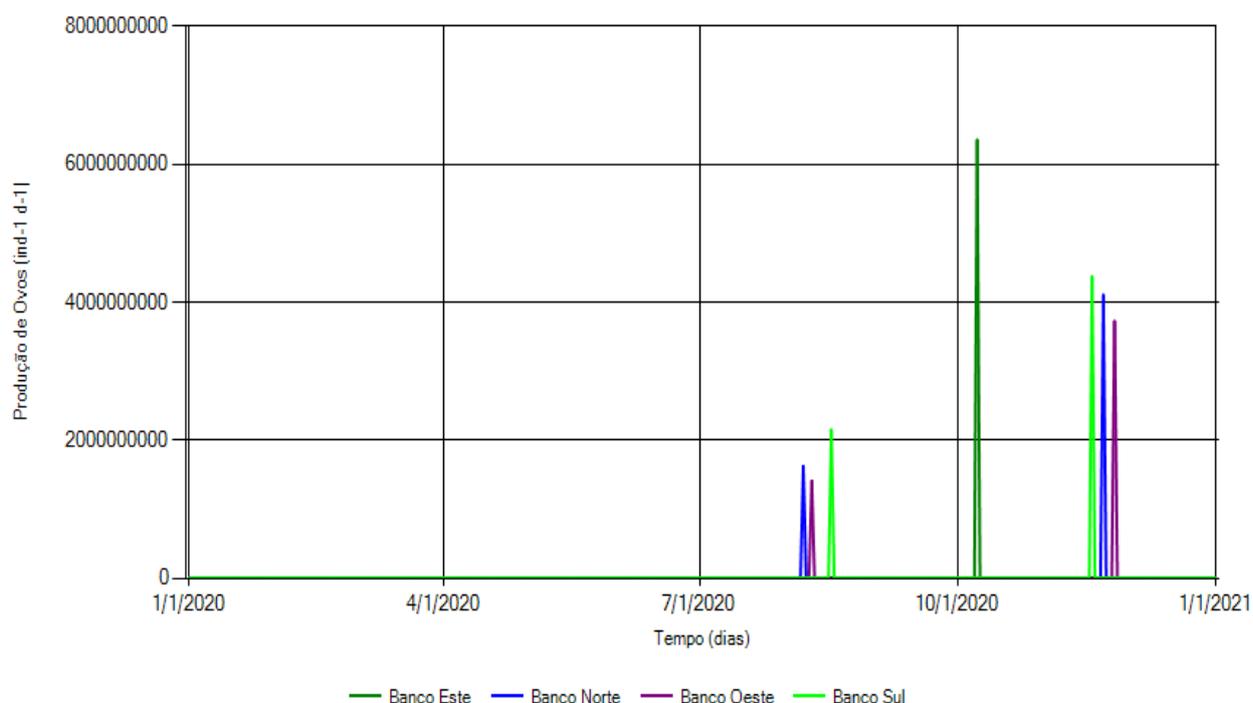


Figura 26 - Número de ovos libertados nos eventos de spawning para nova estrutura de mexilhão recém-nascido.

Para além da produção de ovos, nenhuma outra variável do modelo, como o comprimento ou a reserva, sofre alterações na sua evolução ao longo da simulação, mantendo válidos todos os comentários feitos anteriormente sobre qualquer uma dessas mesmas variáveis.

Nesta simulação o modelo populacional não está ativado, e por isso, os gametas produzidos são interpretados pelo modelo como matéria orgânica particulada em suspensão na coluna de água, promovendo o aumento das concentrações de PON e POP.

Em suspensão, PON e POP são mineralizadas no fundo do estuário, com produção de amónia e fósforo inorgânico. Na figura 28 observa-se a evolução das concentrações desta espécie inorgânica de azoto nos bancos de cultivo.

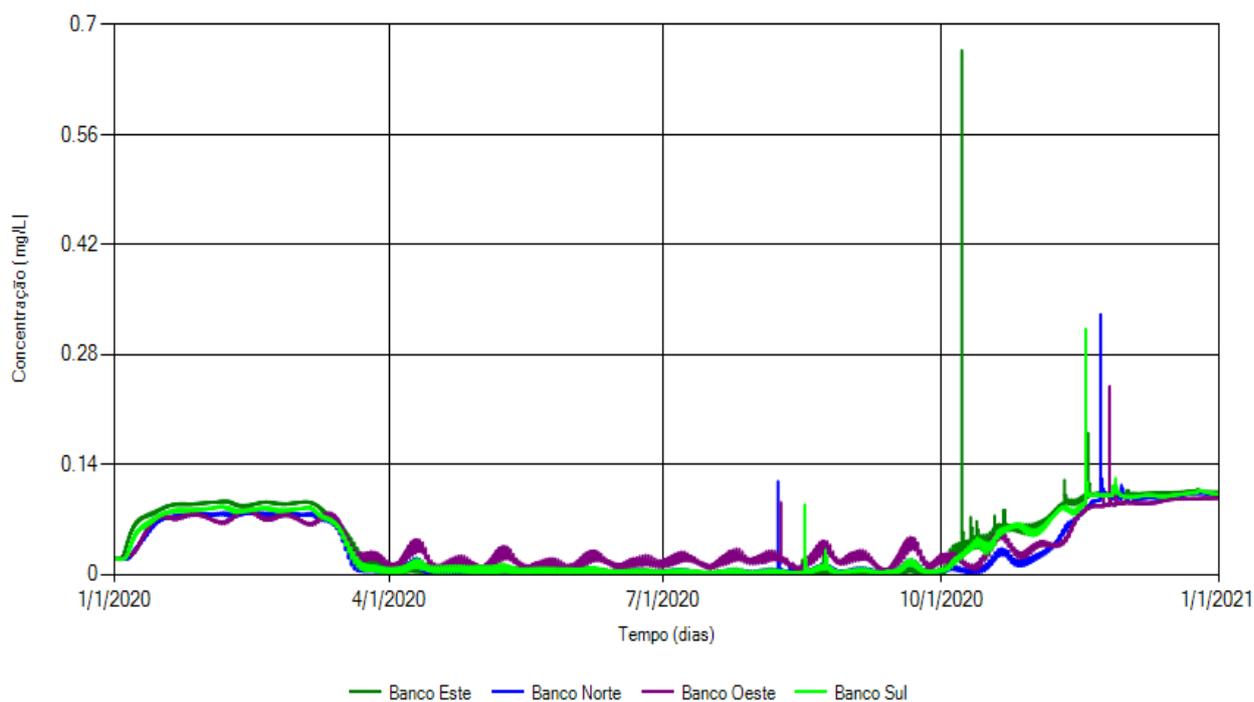


Figura 27 - Evolução da concentração de amónia nos bancos de cultivo

A concentração de amónia é regulada pelo fitoplâncton, que durante o período em que apresenta concentrações elevadas no estuário, esgota praticamente este nutriente nos 4 bancos de cultivo. Os picos de concentração ao longo do ano, devem-se à mineralização de PON, e a sua transformação em amónia.

Este gráfico é muito similar ao da evolução do fósforo inorgânico, com picos de concentração nos eventos de desova, e a justificação é, tal como no caso da amónia, a mineralização de POP.

## 2ª Simulação – Modelo Populacional

A simulação anterior permite testar e comparar a variabilidade das características individuais dos mexilhões entre bancos de cultivo, relativamente a diferentes condições ambientais em cada um, como disponibilidade de alimento, concentração de nutrientes, sedimentos na coluna de água ou temperatura.

Na 2ª segunda simulação é introduzido o modelo populacional nos bancos de cultivo, e processos de reprodução e mortalidade forçam alterações no número de indivíduos em cada um e maior ou menor distribuição de alimento, levando a maior ou menor assimilação de energia por indivíduo, o que afeta o desenvolvimento dos mexilhões.

No contexto de produção em aquacultura, os eventos de desova constituem uma fonte de sementes de mexilhão, extremamente úteis no ciclo de produção em aquacultura. Os bancos de cultivo devem neste cenário ser interpretados como zonas de crescimento natural, ou de implementação de viveiros,

onde são recolhidas sementes, que são posteriormente transportadas para sistemas de crescimento e produção. Produção de sementes em viveiros pode ser uma solução viável para expandir produção de mexilhões em aquacultura para áreas com pouca ou nenhuma ocorrência de sementes selvagens (Saurel et al., 2022).

No estudo de Saraiva et al. (2014), foram testados processos populacionais como predação, competição por alimento, mortalidade natural e mortalidade de ovos. Determinou-se que a mortalidade por fome é bastante relevante, em comparação com as restantes, apesar de apenas ocorrer em momentos de muito baixa disponibilidade de alimento, e que os restantes parâmetros associados aos tipos de mortalidade possíveis são difíceis de estimar. Neste estudo, estimam-se gamas estreitas de valores para a mortalidade natural e de ovos que conduzem a cenários onde a população de mexilhões persiste ao longo do período de simulação no local de estudo. A mortalidade de ovos deve ser superior a 95% de acordo com os resultados do estudo, e superior a 99% de acordo com Sprung (1984), enquanto a mortalidade natural deve estar entre os 0,001 e os 0,0015 d<sup>-1</sup>.

Nesta simulação, são considerados apenas 3 tipos de mortalidade: por fome, mortalidade dos ovos e mortalidade natural. Mortalidade por predação não é considerada por se tratar de um cenário onde mexilhões crescem em zonas destinadas à recolha de sementes para aquacultura, e pretende-se minimizar, ou mesmo anular, a presença de predadores durante o crescimento destes mexilhões, principalmente se considerarmos que o crescimento ocorre em viveiros. A mortalidade por fome pode ocorrer devido ao aumento de densidade de mexilhões no local da cultura, reduzindo a assimilação de alimento por indivíduo a um nível crítico para a sua sobrevivência.

Os valores para os parâmetros de densidade populacional e mortalidades consideradas são apresentados na tabela 16, e selecionados de acordo com o estudo realizado por Saraiva et al. (2014).

*Tabela 16 - Parâmetros de mortalidade e predação*

Parâmetro	Descrição	Keyword	Valor	Fonte
$N_0$	Densidade inicial de mexilhões (# m <sup>-2</sup> )	NUMBER	10	Este estudo
$m^N$	Mortalidade natural (d <sup>-1</sup> )	M_NATURAL	0.0015	Saraiva et al. (2014)
$m_i^F$	Mortalidade por fome (0/1 para desativar/ativar)	M_STARVATION	1	Saraiva et al. (2014)
$m^{egg}$	Mortalidade de ovos	M_SPAT	0.99	Saraiva et al. (2014)

Parametrizar processos de mortalidade tem muitas incertezas associadas, e recolha de dados num local de estudo ajuda no ajustamento do modelo e seleção de valores, ou intervalos de valores, adequados aos dados recolhidos. Com esta simulação, é analisado o desenvolvimento populacional de mexilhões, sem dados empíricos como base, sendo por isso a evolução das suas propriedades o mais relevante, e não particularmente a exatidão dos resultados obtidos.

A figura 29 apresenta a evolução populacional nos 4 bancos de cultivo à escala logarítmica, permitindo uma melhor visualização da variação populacional para cada um deles.

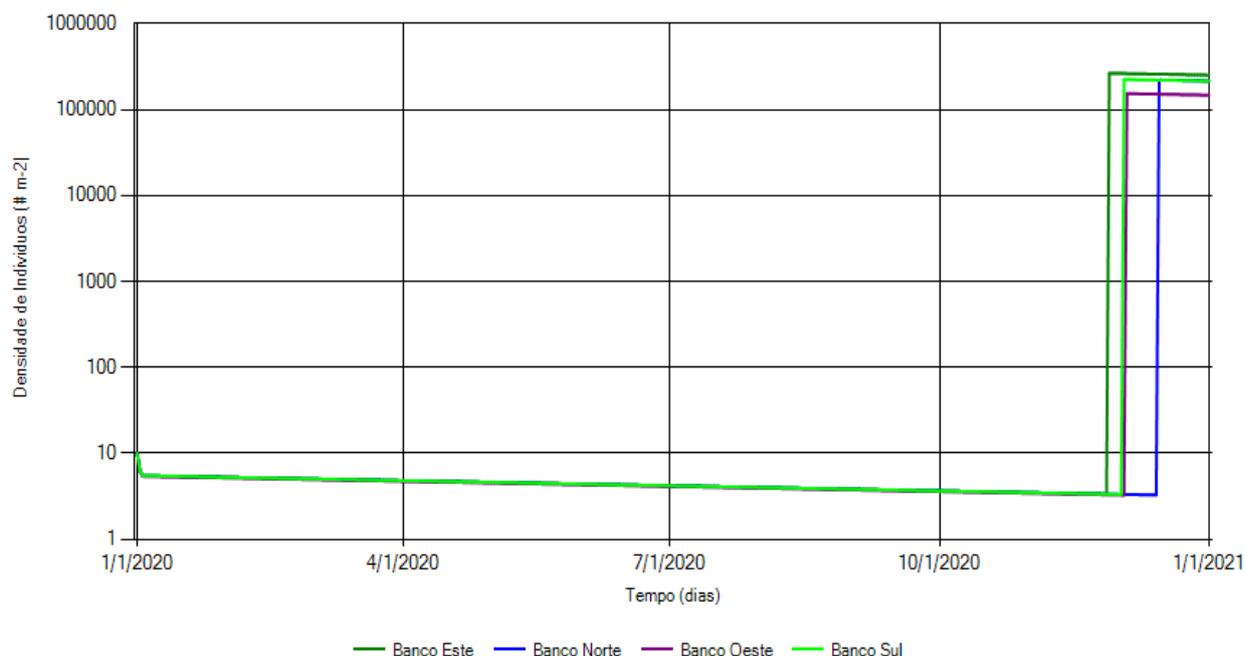


Figura 28 - Evolução populacional nos bancos de cultivo

Os eventos de desova nesta simulação ocorrem mais tarde relativamente à simulação anterior, como é possível verificar comparando esta figura com a figura 25, pois a densidade inicial de mexilhões é igual a 10 indivíduos/m<sup>2</sup>, ao contrário de 400 como no cenário anterior. Menor densidade de mexilhões tem menor impacto na concentração de fitoplâncton local, resultando em maior disponibilidade de alimento durante o período de abundância (entre Abril e Outubro), relativamente ao caso analisado previamente. Na figura 30, encontram-se ilustradas as curvas de concentração de fitoplâncton, no banco Este, para esta simulação e a anterior.

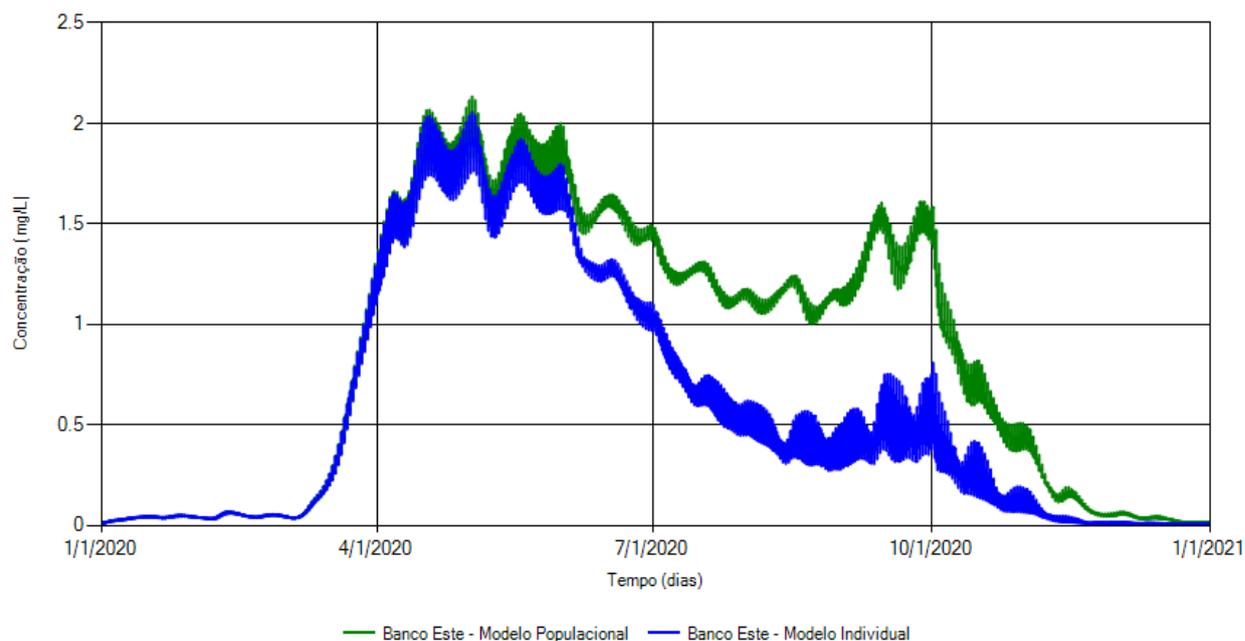


Figura 29 - Comparação de nível de fitoplâncton entre simulações no banco de cultivo Este

Com maior concentração de fitoplâncton sensivelmente a partir de Junho (comparativamente ao cenário anterior), os mexilhões assimilam mais alimento durante o período restante de simulação, acumulam reserva, e mais energia é mobilizada para a estrutura do que para a produção de gâmetas, devido ao facto da fração  $\kappa$  ser igual a 67%, e o GSR atinge mais tarde o valor mínimo requerido para desova, igual a 0.2. Na figura 31, observa-se a evolução do crescimento dos mexilhões no banco Este, para ambas as simulações, sendo que no caso da simulação com o modelo populacional, são escolhidos os mexilhões do *cohort* inicial.

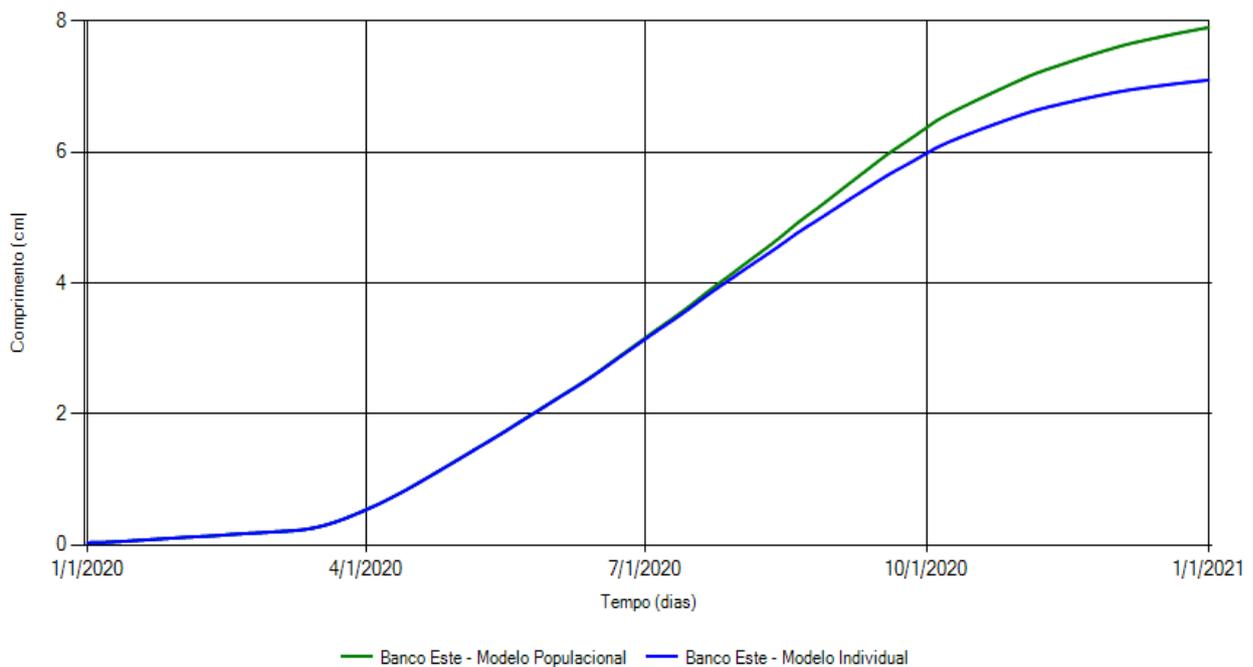


Figura 30 - Comparação de comprimento de mexilhões entre simulações no banco de cultivo Este

A partir de Julho, os mexilhões do banco Este da simulação em análise crescem mais em relação aos mexilhões deste banco na simulação anterior. Menor densidade de organismos tem menor impacto na concentração de fitoplâncton na coluna de água, aumentando a disponibilidade de alimento para cada mexilhão, permitindo que cada um assimile mais energia e possa crescer mais rápido.

Voltando à figura 29, conclui-se que o banco Este é aquele com maior produção de mexilhões durante o ano de simulação, seguido dos bancos Sul e Norte, sensivelmente com o mesmo número final de mexilhões, e por fim o banco Oeste com menor produção. Relativamente aos eventos de desova, o primeiro ocorre no banco Este, o segundo e o terceiro ocorrem nos bancos Sul e Oeste, e o último no banco Norte.

Em qualquer um dos bancos é possível proceder à recolha de sementes de mexilhão, embora o banco Este seja aquele com maior produção de mexilhões nos eventos de desova. A recolha depende, no entanto, de fatores não simulados pelo modelo, como a eficiência de captura das cordas. Esta eficiência está relacionada com o tipo de material coletor e da sua complexidade estrutural, segundo Protopopescu e Beal (2015), que sugerem que mexilhões em estado larval demonstram preferência

por estruturas filamentosas no processo de adesão, mas que a sua complexidade estrutural contribui também, de forma passiva, como meio de aprisionamento.

Até ao fim do estado larval dos mexilhões, o processo de recolha de sementes é praticável, portanto, conhecendo a evolução do comprimento dos mexilhões provenientes dos eventos de desova, até atingirem o comprimento máximo larval, definido no modelo como 0.26 cm, é possível saber durante quanto tempo se pode proceder à recolha de sementes em cada banco.

A figura 32 ilustra o crescimento dos mexilhões em estado larval em cada um dos bancos de cultivo, desde o momento em que ocorre o respetivo evento de desova.

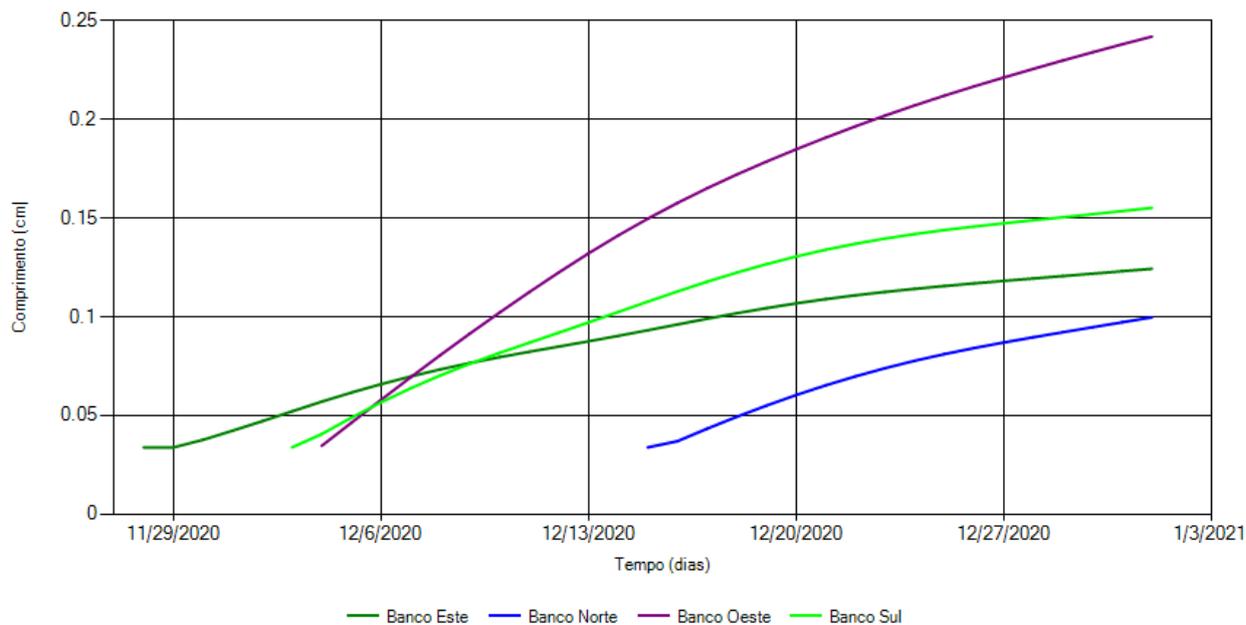


Figura 31 - Evolução do comprimento dos mexilhões em estado larval para cada banco de cultivo

Até ao fim do período de simulação é possível recolher sementes de todos os bancos de cultivo. Seria necessário simular o seu crescimento durante mais tempo para determinar ao certo durante quanto tempo os mexilhões em estado larval são capturáveis antes de passarem ao estágio de vida seguinte.

## 4.2 – Estuário do Tejo

### 4.2.1 – Descrição do Estuário

O estuário do Tejo tem alto valor económico e ecológico, caracterizado pelo transporte de materiais ao longo do rio, que fornecem valor biológico e o transformam numa zona rica em biodiversidade (ICNF, 2022). A principal descarga neste estuário é do rio principal, o Tejo, no entanto, existem também descargas dos rios Sorraia e Trancão, e de algumas ETARs como as de Alcântara, Beiroas, Chelas, Lagoinha, Pegões, Barreiro/Moita, ou Seixal, que contribuem para o transporte de nutrientes orgânicos e inorgânicos para o meio estuarino.

Este é o último cenário de análise de crescimento de mexilhões, e pretende-se através das simulações realizadas, estudar o seu potencial de desenvolvimento, com base nas características deste sistema estuarino.

A batimetria do estuário é apresentada na figura 33, e tal como para o estuário esquemático, é realizada uma simulação preliminar para descrever as características hidrodinâmicas e condições biogeoquímicas do estuário do Tejo sem a presença e influência de mexilhões.

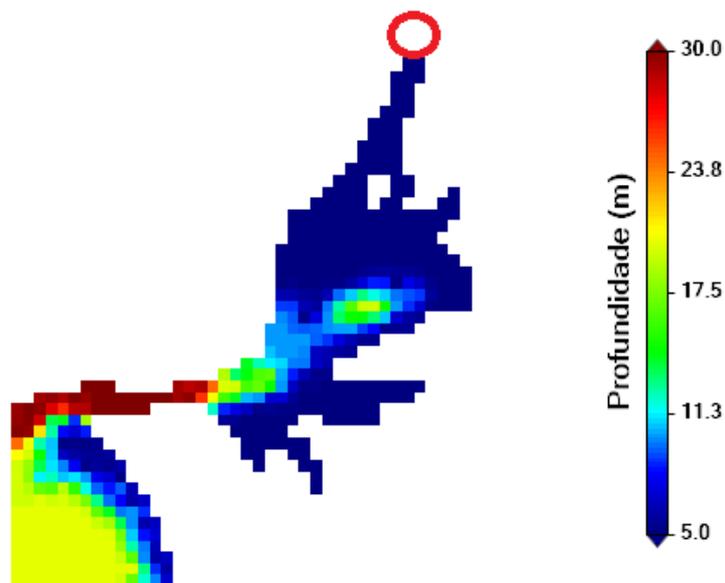


Figura 32 - Batimetria do estuário do Tejo. O círculo de contorno a vermelho indica a única descarga considerada nesta análise, proveniente do rio Tejo. A batimetria foi determinada a partir de dados do Instituto Hidrográfico (<https://www.hidrografico.pt/op/33>)

O único afluente considerado na análise ao estuário é o rio Tejo, na zona superior à direita da imagem, por ser considerada a descarga com maior relevância no transporte de água, nutrientes e outras propriedades, para o estuário. As descargas das estações de tratamento de água residual (ETAR) e dos rios Sorraia e Trancão são negligenciadas. A jusante, na zona mais inferior e à esquerda da imagem, encontra-se a boca do estuário e a saída para o oceano. A profundidade do estuário vai

progressivamente aumentando, desde os 5 metros a norte, no início do estuário, até aos 30 metros na boca.

Sendo uma zona de transição e interação entre rio e oceano, a hidrodinâmica e a qualidade da água deste estuário dependem da influência da descarga do rio Tejo, mas também do efeito da maré e do efeito *Coriolis*, gerado pela rotação da Terra. A atmosfera tem novamente influência no transporte de calor e fluxos gasosos na interface água-atmosfera, mas não na hidrodinâmica do estuário, por não estar definida velocidade para o vento.

## Temperatura

A temperatura no estuário do Tejo é influenciada principalmente pelo oceano e pela descarga do rio, como referido anteriormente. A descarga é caracterizada por valores de temperatura e caudal mensais, obtidos a partir de dados de estações de monitorização, situadas em Ómnias, Santarém. No caso do caudal mensal, foram recolhidos dados do escoamento mensal de uma estação hidrométrica, para o período entre os anos 1973 e 1991 e, para cada mês, foi calculado o escoamento médio considerando os dados registados durante este período. No caso da temperatura, o procedimento foi semelhante, mas os dados são recolhidos de uma estação de qualidade da água, para o período entre o ano 2004 e o ano 2021, e novamente são calculadas as médias mensais com base nos valores registados durante este período. Os dados das estações de monitorização são retirados da base de dados do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH).

A tabela 17 apresenta os valores médios de temperatura e caudal na descarga, ao longo do ano de simulação.

*Tabela 17 - Valores médios mensais de caudal e temperatura na descarga do rio Tejo*

Mês	Descarga Tejo	T (°C)
	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	
1	663.0	10.9
2	847.0	11.2
3	485.0	13.1
4	318.0	14.8
5	243.0	17.3
6	188.0	19.6
7	191.0	21.4
8	145.0	21.5
9	151.0	20.6
10	202.0	18.0
11	357.0	14.3
12	669.0	12.6

No estuário, os valores de temperatura inicial e de condição fronteira, com o oceano Atlântico, são ambos iguais a 16°C. Estes valores estão enquadrados com os valores médios, obtidos a partir de dados registados em estudos anteriores para a temperatura no estuário (Portela, 1996; Pina, 2001).

Na figura 34 é ilustrada a evolução da temperatura no estuário, através de mapas de temperatura, ao longo do período de simulação.

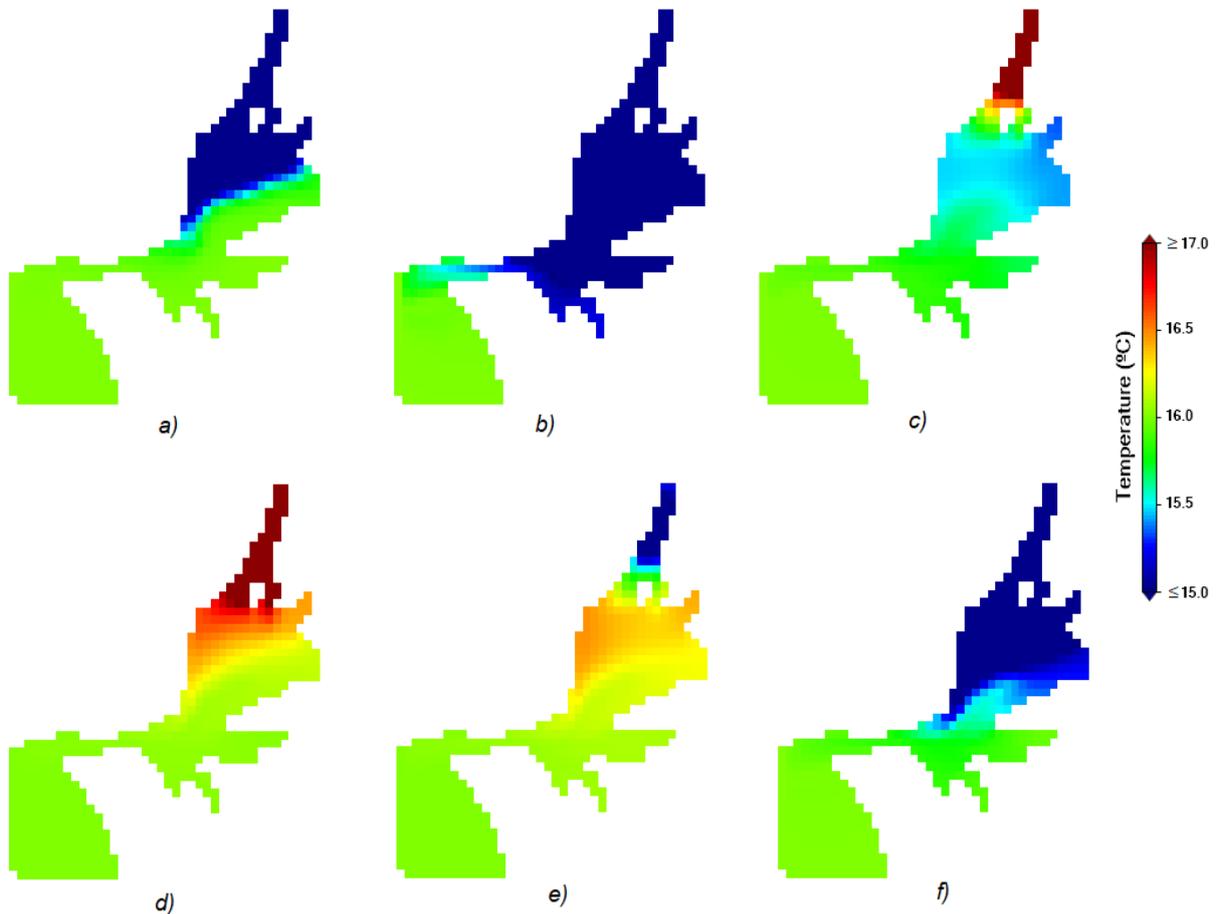


Figura 33 - Mapas de temperatura no estuário do Tejo, para as datas: a) 15 de Janeiro; b) 25 de Março; c) 5 de Junho; d) 20 de Agosto; e) 10 de Novembro; f) 26 de Dezembro.

A temperatura no estuário começa com o valor inicial definido, igual a 16°C, e durante os primeiros meses do ano a descarga do rio Tejo tem efeito predominante na evolução da temperatura do estuário, com caudal elevado e temperaturas baixas, que implicam uma redução progressiva da temperatura da água do estuário até à boca do estuário (observado nos mapas a) e b)).

Durante o período quente, a temperatura da descarga sobe, mas o seu caudal diminui, e a influência relativa do oceano é maior. A temperatura do estuário sobe para valores próximos aos da condição fronteira, na boca e na zona centro do estuário, e para temperaturas iguais ou superiores a 17°C na zona de descarga (mapas c) e d)).

No último trimestre do ano, a descarga volta a assumir um papel mais forte na regulação da temperatura do estuário, com caudais mais elevados e temperaturas mais baixas, tal como nos primeiros meses, reduzindo novamente a temperatura do estuário para valores inferiores a 15°C.

## Nutrientes

As concentrações de nutrientes e nível de salinidade no estuário variam ao longo do tempo devido aos fatores já mencionados, como os *inputs* transportados na descarga e o efeito da maré, mas também atividade biológica, como o crescimento de fitoplâncton.

A tabela 18 lista as propriedades de qualidade da água simuladas e os valores atribuídos para condição inicial no estuário e condição fronteira com o oceano Atlântico e para a descarga do rio. Os valores para o nível de salinidade e concentrações de propriedades como sedimentos coesivos, oxigénio dissolvido, amónia, nitrato, nitrito e fósforo inorgânico, associados à descarga do Tejo, foram obtidos tal como os valores de temperatura, calculando valores médios para cada mês do ano, através de dados recolhidos da estação de monitorização de qualidade da água em Ómnias, Santarém, registados para o período entre 2004 e 2021, encontrados na base de dados do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). Os valores para as concentrações de DON, DOP, PON, POP e fitoplâncton foram mantidos iguais aos valores adotados no cenário do estuário esquemático.

Quanto às condições iniciais e de fronteira, são também aplicados os valores utilizados no estuário esquemático, que estão enquadrados com os valores médios obtidos a partir de dados registados para o estuário do Tejo em estudos prévios (Portela, 1996; Pina, 2001). A concentração de sedimentos e matéria orgânica particulada (PON e POP) em suspensão na coluna de água é também afetada por processos de sedimentação, definidos no modelo com uma velocidade constante de  $5 \times 10^{-5}$  m/s, e processos de decaimento no fundo marinho, como mineralização.

Tabela 18 - Propriedades do estuário do Tejo

Componente	Unidades	Estuário (iniciais)	Condição Fronteira	Rio Tejo
Salinidade	PSU	20.0	36.0	0.2
Sedimento Coesivo	mg/L	5.0	1.0	8.95
Oxigénio	mg/L	8.0	8.0	9.06
Nitrato	mg/L	0.05	0.01	3.97
Nitrito	mg/L	0.0005	0.0004	0.06
DON <sub>nr</sub>	mg/L	0.001	0.001	0.001
DOP <sub>nr</sub>	mg/L	0.001	0.001	0.001
DON <sub>r</sub>	mg/L	0.001	0.001	0.001
DOP <sub>r</sub>	mg/L	0.001	0.0001	0.001
Amónia	mg/L	0.02	0.1	0.14
Fósforo Inorgânico	mg/L	0.004	0.005	0.08
PON	mg/L	0.0005	0.0005	0.018
POP	mg/L	0.0005	0.0005	0.0025
Fitoplâncton	mg/L	0.01	0.01	0.01

### 4.2.2 – Fatores que Condicionam a Produção

Antes de analisar o crescimento de mexilhões, os dois principais fatores a descrever são a disponibilidade de fitoplâncton e a velocidade de escoamento no estuário. Fitoplâncton representa a

fonte de alimento dos bivalves, e a seleção da zona de cultivo deve ser focada em regiões com maior disponibilidade de fitoplâncton ao longo do período de simulação. A velocidade de escoamento condiciona a fixação dos mexilhões em substrato sólido, e para velocidades altas, superiores a 0.5 m/s neste caso, este processo é inviabilizado, impedindo o seu desenvolvimento e crescimento.

A figura 35 ilustra mapas de concentração de fitoplâncton no estuário do Tejo, em diferentes instantes ao longo do ano de simulação.

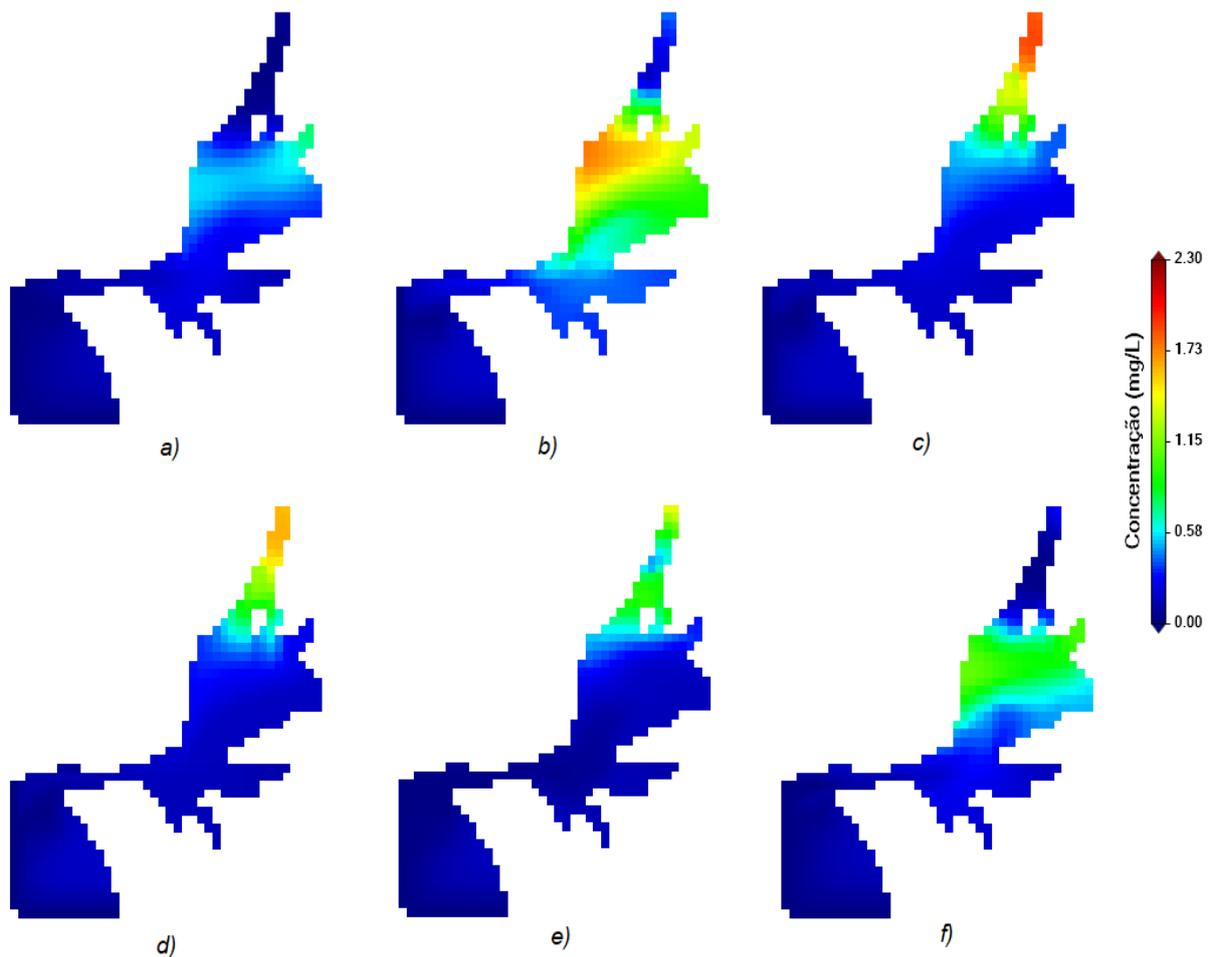


Figura 34 - Mapas de concentração de fitoplâncton no estuário do Tejo, para as datas: a) 22 de Janeiro; b) 20 de Março; c) 14 de Junho; d) 12 de Agosto; e) 8 de Novembro; f) 19 de Dezembro.

No primeiro trimestre do ano, a concentração de fitoplâncton cresce no estuário, desde a zona de descarga até à zona central. Embora, a temperatura da água da descarga seja baixa (limitando atividade biológica e crescimento de fitoplâncton), o caudal é elevado contribuindo para um maior transporte de nutrientes para o estuário.

Durante os meses quentes, a concentração de fitoplâncton é elevada na zona de descarga, mas diminui no resto do estuário, comparativamente aos meses anteriores. A descarga do rio Tejo apresenta durante este período temperaturas altas, mas caudal baixo, promovendo produção alta na zona superior do estuário, onde a descarga ocorre, e alto consumo de nutrientes, que não são transportados

para jusante, afetando negativamente a concentração de fitoplâncton nas zonas central e inferior do estuário.

No último trimestre do ano, o cenário do primeiro trimestre retorna, com descargas de caudal mais elevado e temperaturas mais baixas, contribuindo novamente para um crescimento de fitoplâncton na zona central do estuário.

Relativamente à velocidade de escoamento no estuário, a figura 36 apresenta mapas que descrevem o campo de velocidades ao longo do período de simulação.

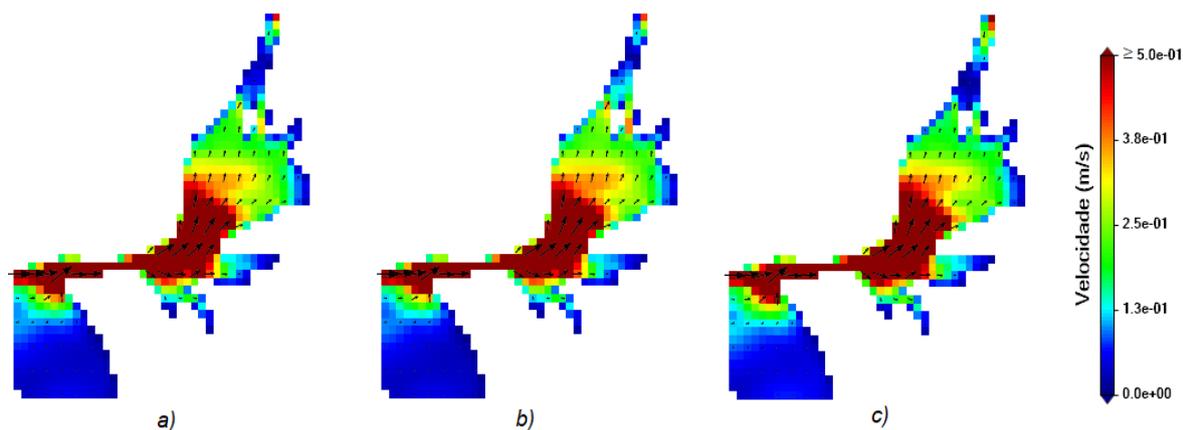


Figura 35 - Mapas de velocidade de escoamento no estuário do Tejo, para as datas: a) 29 de Janeiro; b) 28 de Junho; c) 4 de Dezembro.

Periodicamente verificam-se velocidades superiores ao limite tolerável para os mexilhões fixados em substrato, igual a 0.5 m/s, na zona inferior do estuário, na boca e na zona central. Expostos a velocidades iguais ou superiores a este limite, os mexilhões têm probabilidade de morte igual a 50%.

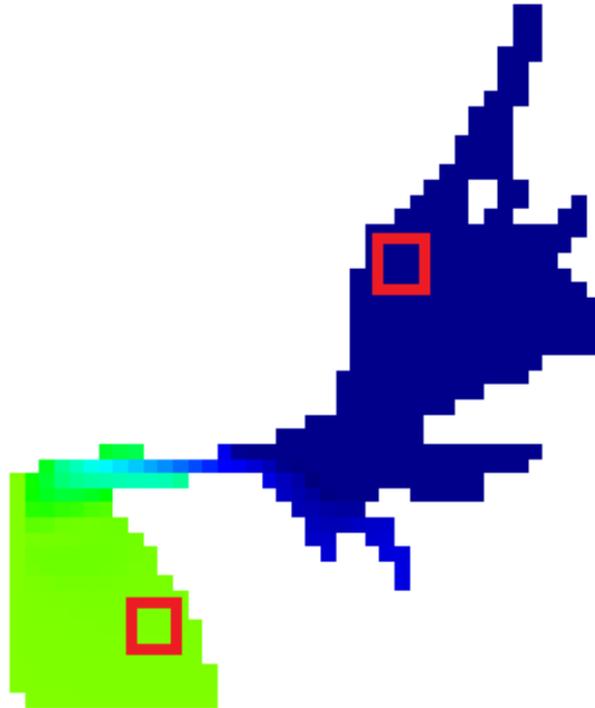
#### 4.2.3 – Seleção de Locais para Cultivo

A escolha do local para implementação do sistema de cultivo é feita com base nos critérios avaliados na secção anterior do trabalho. Garantia de disponibilidade de alimento e baixas velocidades de escoamento são os fatores considerados neste processo de seleção, que é feito de acordo com condições naturais do estuário para o crescimento de mexilhões.

No estuário, a área selecionada para cultivo de mexilhões encontra-se na região superior, um pouco abaixo da zona de descarga. Nesta área, as velocidades da água não ameaçam a fixação dos mexilhões e a disponibilidade de alimento é significativa durante o período de simulação. Para além desta área de cultivo, é selecionada uma segunda localização para implementação de sistema de cultivo fora do estuário, em ambiente oceânico, onde a concentração de fitoplâncton é claramente mais baixa, mas com menos variabilidade, podendo ser interpretada como constante ao contrário do que acontece em ambiente estuarino.

Pretende-se comparar o crescimento e desenvolvimento dos mexilhões nestes dois locais de cultivo, com regimes de concentração de fitoplâncton distintos, ao contrário do cenário estudado no estuário esquemático.

Na figura 37, encontram-se identificadas as zonas de implementação de bancos de cultivo no estuário do Tejo.



*Figura 36 - Localização dos bancos de cultivo. Banco a norte é identificado como banco do estuário e o banco a sul é identificado como banco oceânico.*

#### **4.2.4 – Análise do Crescimento de Mexilhões**

Depois de seleccionados os locais de cultivo, é simulado o crescimento de mexilhões com o modelo individual, tal como na primeira simulação do cenário do estuário esquemático, com o objetivo de analisar o crescimento em sistemas de cultivo em aquacultura. Cada banco de cultivo apresenta uma densidade de mexilhões igual a 400 indivíduos/m<sup>2</sup>, tal como no caso de estudo anterior.

O crescimento dos mexilhões, nos dois bancos de cultivo, é o parâmetro de monitorização utilizado para identificar o melhor momento para proceder à colheita para comercialização.

A evolução da concentração de fitoplâncton no estuário, descrita na figura 35, indica que no banco de cultivo do estuário, é expectável que os mexilhões apresentem períodos de crescimento mais rápido quando os níveis de fitoplâncton aumentam, comparativamente aos mexilhões do banco oceânico. No fim da simulação, os mexilhões estuarinos podem apresentar comprimento superior aos do oceano devido a esses períodos de maior disponibilidade de alimento.

Na figura 38 é apresentado o gráfico de evolução do comprimento dos mexilhões nos dois bancos.

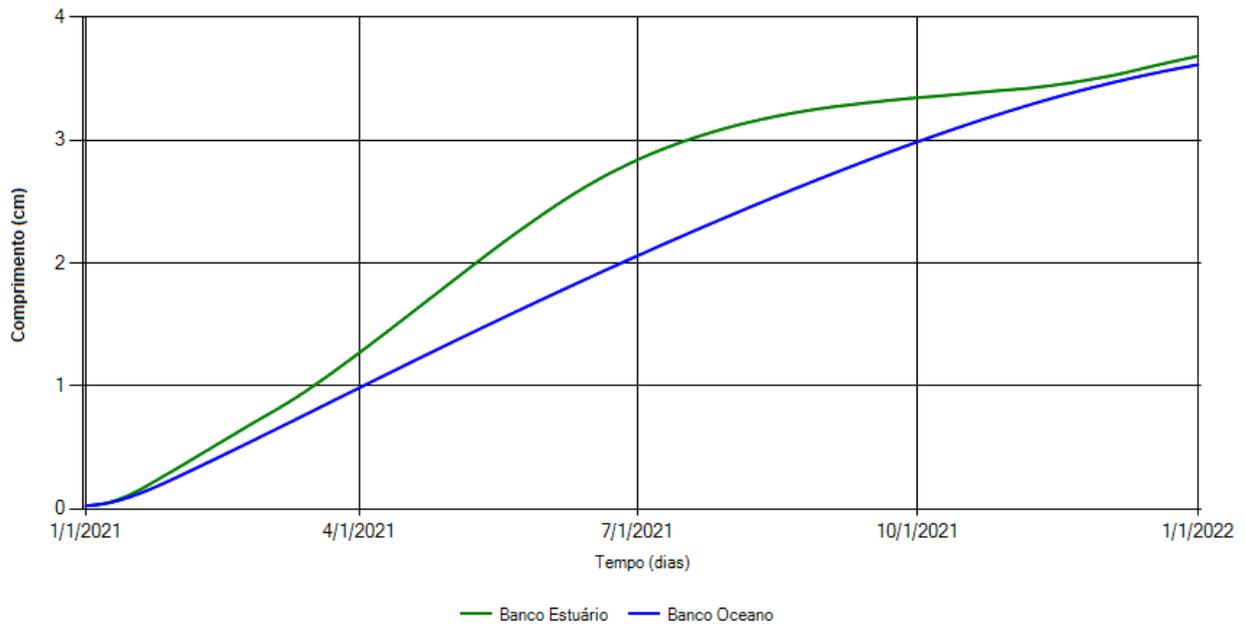


Figura 37 - Evolução do comprimento dos mexilhões nos bancos de cultivo

Ao contrário do esperado, os mexilhões de ambos os bancos de cultivo apresentam comprimentos finais muito semelhantes, em torno dos 3,5 cm. As taxas de crescimento dos bancos de cultivo começam por ser muito semelhantes durante quase todo o mês de Janeiro, com os mexilhões de ambos os bancos a apresentar comprimentos iguais, mas a partir do final deste mês, a taxa de crescimento dos mexilhões do banco estuarino aumenta, enquanto no banco oceânico se mantém aproximadamente constante. Até início de Julho, os mexilhões do estuário crescem mais rápido do que os do oceano, que crescem de forma praticamente linear durante todo o período de simulação. A partir dessa altura os bancos voltam a ter taxas de crescimento semelhantes, durante quase um mês, e desde Agosto até Novembro, os mexilhões do estuário crescem mais lentamente do que os mexilhões do oceano. No final da simulação, os mexilhões das duas zonas de cultivo assumem taxas de crescimento novamente similares, e os seus comprimentos finais são muito próximos.

Os principais fatores responsáveis pela evolução de comprimento nos bancos de cultivo são a disponibilidade de alimento, a dinâmica da reserva dos mexilhões e os custos de manutenção somática. Na figura 35, observa-se na zona do banco de cultivo oceânico, baixa concentração de fitoplâncton, com variabilidade praticamente negligenciável ao longo do ano, o que, pela hipótese de homeostase fraca, implica densidade de reserva constante nos seus mexilhões. A mobilização de energia passa a depender apenas da estrutura dos mexilhões, sendo investida progressivamente menos energia no crescimento devido aos custos de manutenção somática, que aumentam com a dimensão do mexilhão.

Quanto ao banco de cultivo no estuário, o aumento da taxa de crescimento, relativamente ao banco do oceano, está diretamente ligado a um aumento na concentração de fitoplâncton, que ocorre durante os primeiros meses do ano. Há, entretanto, uma redução acentuada na concentração de fitoplâncton, e

na taxa de assimilação, em comparação com a taxa de mobilização, e a reserva (acumulada durante os meses anteriores, caracterizados por maior disponibilidade de alimento) decresce. Com a redução da reserva, e da sua densidade, a taxa de mobilização acaba por também baixar, diminuindo a quantidade de energia alocada nos setores metabólicos do organismo. Esta cadeia de processos leva à redução da taxa de crescimento dos mexilhões até ao mês de Novembro (tornando-a inferior à dos mexilhões de oceano). No final do ano, a taxa de crescimento volta a aumentar devido a um aumento na concentração de fitoplâncton neste banco de cultivo, como é possível observar no mapa f) da figura 35.

A figura 39 descreve a evolução de fitoplâncton para os bancos de cultivo.

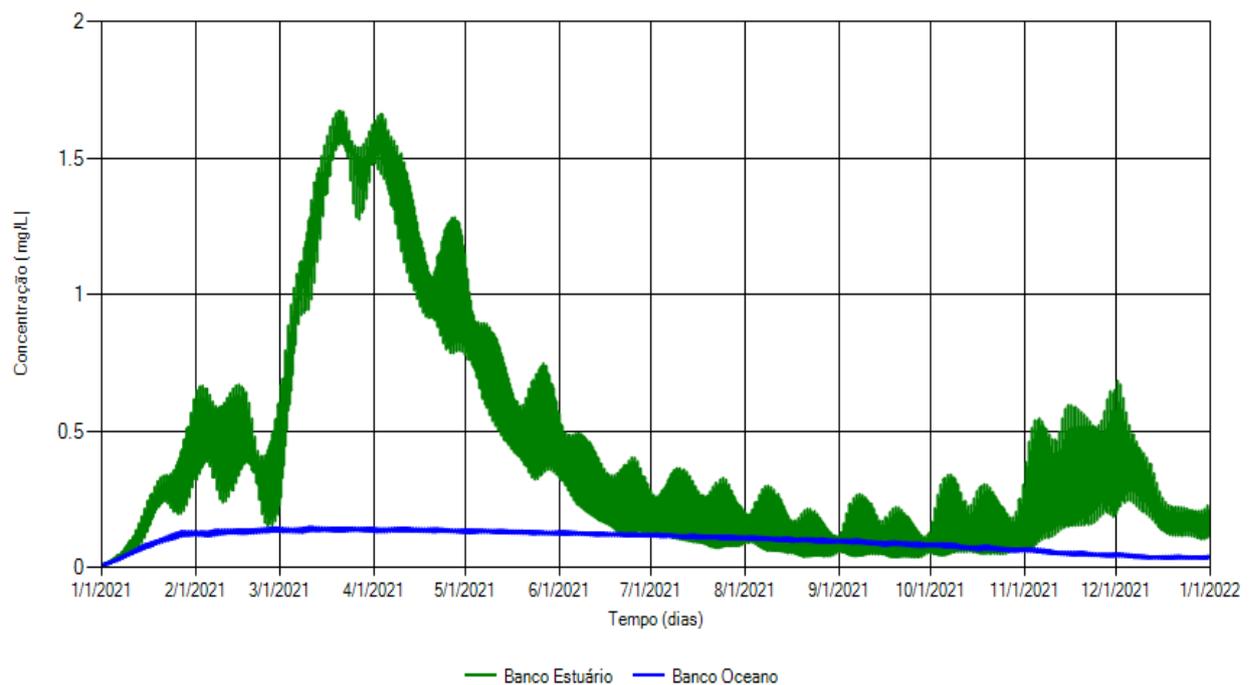


Figura 38 - Evolução da disponibilidade de fitoplâncton para os bancos de cultivo

O gráfico confirma as expectativas sobre o dinamismo do fitoplâncton nos dois bancos de cultivo ao longo do período de simulação. No banco oceânico, a concentração de fitoplâncton é praticamente constante, baixando ao longo do período de simulação de forma negligenciável.

No caso do banco do estuário, a concentração de fitoplâncton é muito superior à do banco de cultivo do oceano durante praticamente todo o 1º semestre de simulação, atingindo valores máximos em Março e Abril, e bastante mais variável também. De início de Julho a início de Novembro, os níveis de alimento diminuem bastante, e é durante este período que a taxa de crescimento dos mexilhões estuarinos baixa. Nos últimos dois meses do ano a concentração de fitoplâncton volta a subir, tal como a taxa de crescimento dos mexilhões.

Durante o período desta simulação, os mexilhões não atingem comprimentos dentro da gama típica para comercialização, e, para continuar a avaliar o seu desenvolvimento, é realizada uma segunda simulação para o período de um ano, iniciada após o fim da primeira simulação. As características

hidrodinâmicas e de qualidade da água das descargas, tal como as condições de fronteira do sistema, mantém-se iguais. Todas as condições iniciais no estuário nesta nova simulação, incluindo as características dos mexilhões, assumem os valores simulados no final da simulação anterior.

O crescimento dos mexilhões e a disponibilidade de alimento para os dois bancos de cultivo são descritos nas figuras 40 e 41.

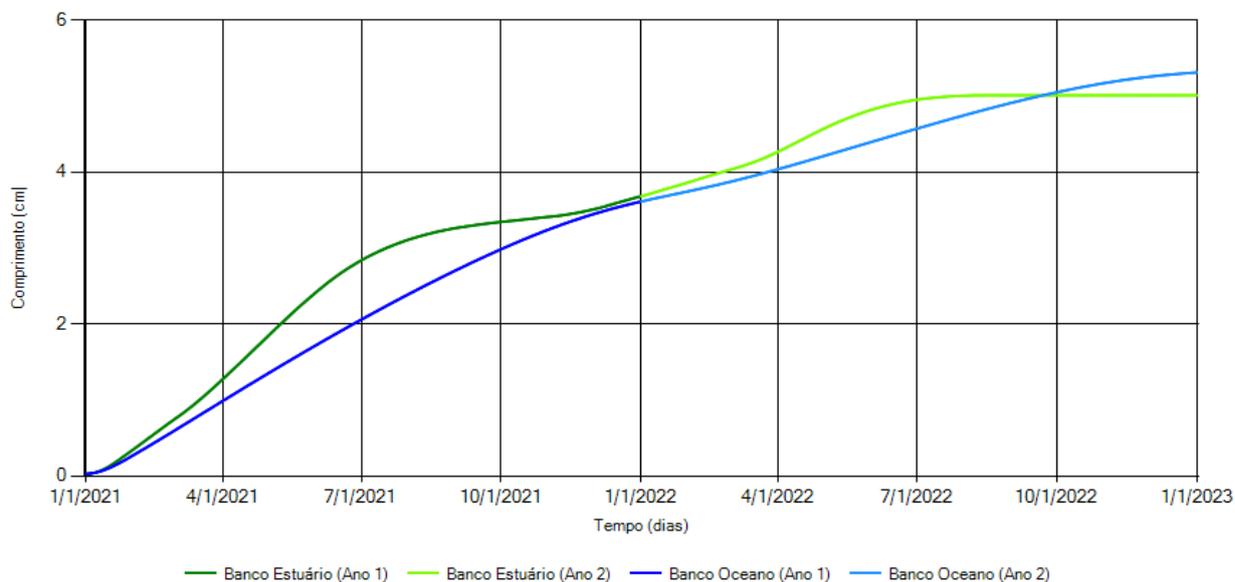


Figura 39 - Evolução do comprimento dos mexilhões dos bancos de cultivo para os dois anos de simulação.

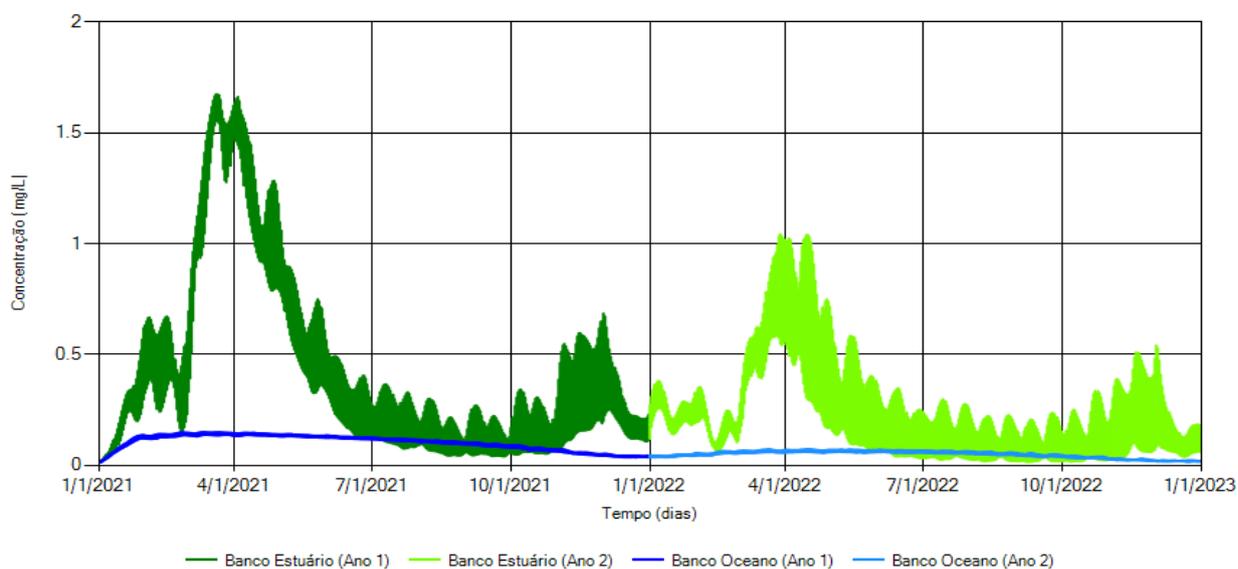


Figura 40 - Evolução da disponibilidade de fitoplâncton nos bancos de cultivo para os dois anos de simulação

Durante o segundo ano de simulação, os mexilhões crescem de forma bastante similar ao primeiro ano. Verifica-se, no entanto, menor crescimento ao longo do ano para os mexilhões dos 2 bancos de cultivo.

A já mencionada hipótese de homeostase fraca, indica que, para concentrações de alimento contantes, a densidade de reserva permanece também constante durante o desenvolvimento do organismo.

Durante os dois anos de simulação, este é o caso do banco oceânico, mas não o do banco do estuário, onde os níveis de fitoplâncton são muito variáveis. É evidente que se os mexilhões não assimilarem alimento, não acumulam reserva, que é alocada para o seu crescimento, contudo, o processo de mobilização não depende diretamente da concentração de fitoplâncton, mas sim da densidade de reserva do organismo como indica a fórmula da taxa de mobilização, da tabela 2, expressa na equação (5) ( $J_{ES}$  corresponde à taxa de manutenção somática, equação (6)).

$$j_{EC} = \frac{[E]}{\frac{[E_G]}{\mu_E} + \kappa[E]} \cdot \left( \frac{[E_G]}{\mu_E} \dot{V}V^{\frac{2}{3}} + j_{ES} \right) \quad (5)$$

$$j_{ES} = \frac{[\dot{p}_M]}{\mu_E} V \quad (6)$$

No banco do estuário, a diminuição acentuada na concentração de fitoplâncton, que ocorre uma vez em cada ano depois do pico de concentração no final de Março e início de Abril, implica menor taxa de assimilação e conseqüente redução de reserva. O nível de reserva, e densidade de reserva, progressivamente menores durante estes períodos de escassez de alimento, conduzem a uma decrescente mobilização de energia. Esta cadeia de processos iniciada pela redução de fitoplâncton e os custos de manutenção somática crescentes (devido ao crescimento dos mexilhões), limitam a quantidade de energia investida no crescimento dos mexilhões, reduzindo bastante as suas taxas de crescimento.

Alta variabilidade de alimento tem como desvantagem, durante os períodos de escassez, uma mobilização de reserva superior à assimilação de alimento. Durante os períodos de abundância de fitoplâncton, a reserva dos mexilhões cresce demasiado para a sua sustentabilidade, e a acentuada diminuição da disponibilidade de alimento tem como efeito a redução progressiva da taxa de mobilização, até ao equilíbrio com a taxa de assimilação. Neste processo de equilíbrio de taxas de assimilação e mobilização, a fração de energia mobilizada para a estrutura dos mexilhões, no final do segundo ano de simulação, é investida, praticamente na sua totalidade, em custos de manutenção somática, levando à estagnação do comprimento dos mexilhões do estuário.

No caso dos mexilhões do banco oceânico, considera-se constante a concentração de alimento (a variabilidade observada na figura 41 é desprezável, quando comparada com a variabilidade da concentração de fitoplâncton do banco estuarino), o que implica densidade de reserva constante e um aumento de reserva com o crescimento dos mexilhões, como assumido pela hipótese da homeostase fraca. A taxa de mobilização, neste caso, depende apenas da estrutura dos mexilhões e não da densidade de reserva. O crescimento dos mexilhões pára, quando a fração  $\kappa$  da energia mobilizada é totalmente investida em manutenção somática, o que não chega a acontecer durante o período de simulação. Caso acontecesse, a estrutura e reserva do mexilhão estagnariam e a taxa de mobilização igualaria a de assimilação, tal como demonstrado matematicamente pela seguinte derivação:

$$\frac{d[E]}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{E}{V} \right) = \frac{1}{V^2} \left( \frac{dE}{dt} V - E \frac{dV}{dt} \right) = \frac{j_{EA} - j_{EC}}{V} - \frac{[E]}{V} \frac{dV}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$j_{EA} - j_{EC} = [E] \frac{dV}{dt} \quad (8)$$

Para mexilhões no oceano com crescimento estagnado,  $\frac{dV}{dt} = 0$ , e:

$$j_{EA} = j_{EC} \quad (9)$$

A evolução da reserva para os dois bancos de cultivo é observada na figura 42.

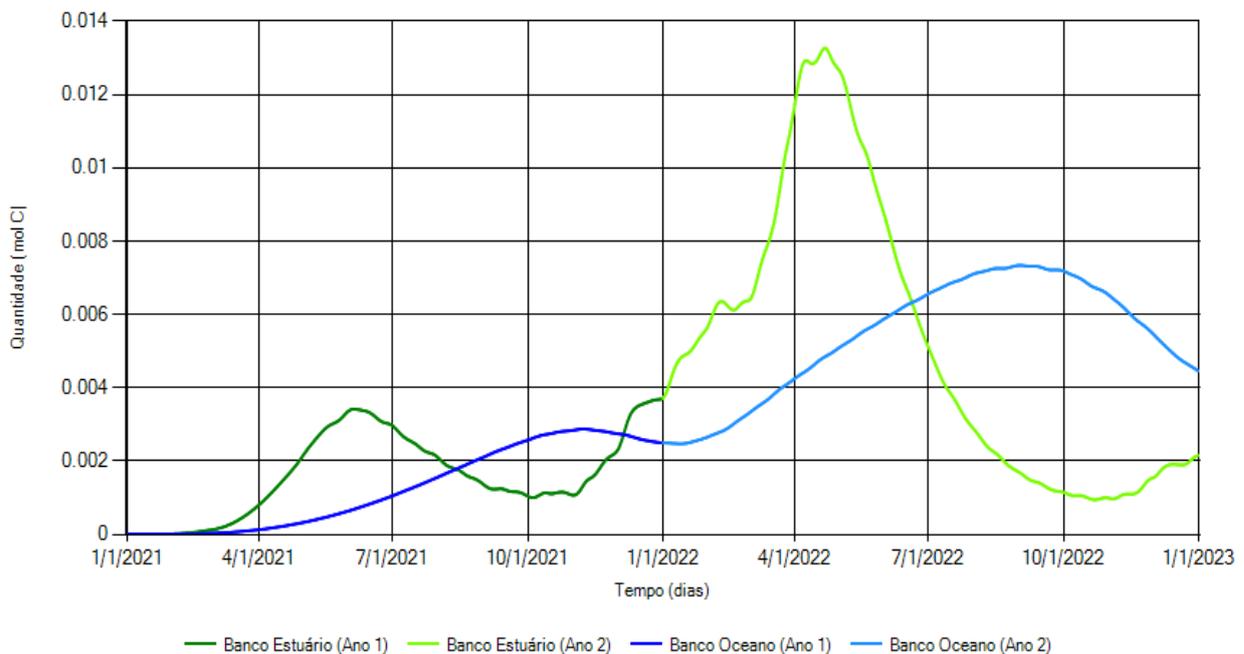


Figura 41 - Evolução da concentração de fitoplâncton nos bancos de cultivo ao longo dos dois anos de simulação.

A reserva dos mexilhões evolui da forma esperada. Para o banco do estuário, a reserva e a densidade de reserva diminuem durante os períodos de escassez de alimento para valores inferiores aos do banco oceânico, sendo por isso menor a taxa de crescimento destes mexilhões, durante estes períodos, em relação aos mexilhões cultivados no oceano. No banco oceânico, a reserva é crescente durante quase todo o período de simulação, apresentando descidas no final de cada ano, negligenciadas por se considerar em contexto de análise, que neste banco, a concentração de fitoplâncton é quase constante.

Independentemente do perfil de crescimento dos mexilhões de cada um dos bancos de cultivo, é importante referir que, em ambos, os mexilhões atingem comprimentos satisfatórios para comercialização, em menos de 2 anos de cultivo. Segundo Towers (2010), a colheita é realizada quando os mexilhões atingem um comprimento mínimo comercializável, de cerca de 4 cm, o que pode

levar entre 12 e 15 meses. Os mexilhões dos dois bancos de cultivo cumprem com este critério de dimensão dentro do prazo estabelecido.

## 5 – Conclusão

Conclui-se que no estuário do Tejo e na região costeira, o cenário de produção de mexilhões azuis, descrito pelas simulações realizadas, indica crescimento satisfatório a nível comercial num período de 2 anos, para os dois sistemas de produção. Embora com perfis de crescimento diferentes, os mexilhões atingem os 4 cm de comprimento no primeiro trimestre do segundo ano de simulação, e chegam ao fim desse ano a rondar os 5 cm.

O crescimento dos mexilhões é principalmente dependente da disponibilidade de alimento, do dinamismo das suas reservas e dos custos de manutenção somática. A concentração de fitoplâncton regula diretamente a quantidade de energia assimilada para as reservas do organismo, e os custos de manutenção somática aumentam com o seu comprimento, fazendo com que progressivamente menos energia seja investida no crescimento. A acumulação de reserva depende da variabilidade de concentração de alimento, que é ingerido, filtrado e assimilado, mas também da mobilização de energia para os diferentes setores metabólicos do mexilhão, e este processo de mobilização depende da densidade de reserva. No banco de cultivo dentro do estuário do Tejo, a variabilidade do nível de fitoplâncton é elevada, o que implica também alta variabilidade na reserva dos seus mexilhões, afetando a sua taxa de crescimento. No banco de cultivo à saída do estuário, em zona oceânica, a concentração de fitoplâncton é praticamente constante durante todo o ano, sendo também considerada constante a densidade de reserva destes mexilhões, e, portanto, o seu crescimento é apenas limitado por custos de manutenção. Para o estuário esquemático, os perfis de crescimento nos 4 bancos de cultivo são similares pois a evolução da concentração de fitoplâncton é semelhante em todos os bancos, sendo por isso também a evolução das suas reservas.

Conclui-se que períodos de maior disponibilidade de alimento conduzem a períodos de crescimento dos mexilhões mais rápido, mas não necessariamente a um comprimento final superior relativamente a mexilhões expostos a níveis de alimento mais baixos, mas com menor variabilidade. Para o nível de alimento ser determinante na diferenciação de comprimento final entre bancos de cultivo distintos, os perfis de concentração de fitoplâncton em cada banco têm de ser semelhantes ao longo do tempo.

Embora este estudo providencie cenários realistas, é importante que, em estudos futuros sejam incluídos mais detalhes e complexidade no modelo computacional, como as descargas de água dos rios Sorraia e Trancão e ETARs, ou seja feita uma seleção de localizações alternativas para implementação de sistemas de cultivo, com base nos potenciais impactes no ecossistema, ou o enquadramento legal do projeto, em vez de considerar apenas as condições hidrodinâmicas e biogeoquímicas do local como fator decisivo, como no caso do banco de cultivo estuarino, selecionado tendo em conta o potencial de crescimento dos mexilhões, sem considerar a sua integração na reserva natural do estuário do Tejo.

Os resultados obtidos são úteis como ferramentas no apoio à decisão e planeamento por parte do poder governativo, visando a implementação sustentável, ao nível ambiental, social e económico, de

sistemas de produção em aquacultura de mexilhões azuis, no estuário do Tejo ou na região costeira adjacente.

## 6 – Bibliografia

- Arapov, J., Ezgeta–Balić, D., & Ninčević Gladan, Ž. (2010). BIVALVE FEEDING — HOW AND WHAT THEY EAT? *Croatian Journal of Fisheries*, 68(3), 105–116.
- Arnosti, C. (2011). Microbial Extracellular Enzymes and the Marine Carbon Cycle. *Annual Review of Marine Science*, 3(1), 401–425.
- Atkinson, M. J., & Smith, S. V. (1983). C:N:P ratios of benthic marine plants1. *Limnology and Oceanography*, 28(3), 568–574.
- Avdelas, L., Avdic-Mravljje, E., Borges Marques, A. C., Cano, S., Capelle, J. J., Carvalho, N., Cozzolino, M., Dennis, J., Ellis, T., Fernández Polanco, J. M., Guillen, J., Lasner, T., Le Bihan, V., Llorente, I., Mol, A., Nicheva, S., Nielsen, R., Oostenbrugge, H., Villasante, S., . . . Asche, F. (2020). The decline of mussel aquaculture in the European Union: causes, economic impacts and opportunities. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 91–118.
- Bechmann, R. K., Taban, I. C., Westerlund, S., Godal, B. F., Arnberg, M., Vingen, S., Ingvarsdottir, A., & Baussant, T. (2011). Effects of Ocean Acidification on Early Life Stages of Shrimp (*Pandalus borealis*) and Mussel (*Mytilus edulis*). *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 74(7–9), 424–438.
- Brandes, J. A., Devol, A. H., & Deutsch, C. (2007). New Developments in the Marine Nitrogen Cycle. *Chemical Reviews*, 107(2), 577–589.
- Bristow, L. A., Mohr, W., Ahmerkamp, S., & Kuypers, M. M. (2017). Nutrients that limit growth in the ocean. *Current Biology*, 27(11), R474–R478.
- Cameron, W. M., & Pritchard, D. W. (1963). Estuaries. In *The Seas, Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas. Interscience Publ.*, 2.
- Cardoso, J. F. M. F., Dekker, R., Witte, J. I., & van der Veer, H. W. (2007). Is reproductive failure responsible for reduced recruitment of intertidal *Mytilus edulis* L. in the western Dutch Wadden Sea? *Senckenbergiana Maritima*, 37(2), 83–92.
- Christensen, H. T., Dolmer, P., Petersen, J. K., & Tørring, D. (2011). Comparative study of predatory responses in blue mussels (*Mytilus edulis* L.) produced in suspended long line cultures or collected from natural bottom mussel beds. *Helgoland Marine Research*, 66(1), 1–9.
- Cloern, J. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 223–253.
- Cranford, P., Strain, P., Dowd, M., Hargrave, B., Grant, J., & Archambault, M. (2007). Influence of mussel aquaculture on nitrogen dynamics in a nutrient enriched coastal embayment. *Marine Ecology Progress Series*, 347, 61–78
- Dame, R. (1996). Ecology of Marine Bivalves. *Marine Science*.

- De La Rocha, C. L., & Passow, U. (2014). The Biological Pump. In *Treatise on Geochemistry* (pp. 93–122). Elsevier.
- Devlin, A. T., & Pan, J. (2018). Dynamical Estuaries. *Comprehensive Remote Sensing*, 121–144.
- DeVries, T., Primeau, F., & Deutsch, C. (2012). The sequestration efficiency of the biological pump. *Geophysical Research Letters*, 39(13).
- Dolmer, P., Christensen, H., Hansen, B., & Vismann, B. (2012). Area-intensive bottom culture of blue mussels *Mytilus edulis* in a micro-tidal estuary. *Aquaculture Environment Interactions*, 3(1), 81–91.
- EPA. (1985). *Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modelling* (2nd ed.). United States Environmental Protection Agency.
- FAO. (2008). Current status of world bivalve aquaculture and trade. In *Estado Actual Del Cultivo y Manejo de Moluscos Bivalvos y Su Proyección Futura: Factores Que Afectan Su Sustentabilidad en América Latina. Taller . . . de Pesca y Acuicultura* (Spanish Edition) (pp. 45–60). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2012). *The state of world fisheries and Aquaculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Farrington, J. W., Tripp, B. W., Tanabe, S., Subramanian, A., Sericano, J. L., Wade, T. L., & Knap, A. H. (2016). Edward D. Goldberg's proposal of "the Mussel Watch": Reflections after 40 years. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 501–510.
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., Sheppard, L. J., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J. N., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A. F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M., & Voss, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130164.
- Gallardi, D. (2014). Effects of Bivalve Aquaculture on the Environment and Their Possible Mitigation: A Review. *Fisheries and Aquaculture Journal*, 05(03).
- Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., Asner, G. P., Cleveland, C. C., Green, P. A., Holland, E. A., Karl, D. M., Michaels, A. F., Porter, J. H., Townsend, A. R., & Vöosmarty, C. J. (2004). Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, 70(2), 153–226.
- Garcia, H. E., Locarnini, R. A., Boyer, T. P., Antonov, J. I., Baranova, O. K., Zweng, M., Reagan, J. R., Johnson, D. R., Mishonov, A. V., & Levitus, S. (2013). *World ocean atlas 2013. Volume 4, Dissolved inorganic nutrients (phosphate, nitrate, silicate)* (Vol. 4). National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Gibbs, M. T. (2007). Sustainability performance indicators for suspended bivalve aquaculture activities. *Ecological Indicators*, 7(1), 94–107.
- Goldberg, E. (1980). *The International Mussel Watch*. Amsterdam University Press.
- Goldberg, E. D. (1975). The mussel watch — A first step in global marine monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 6(7), 111.

- Goldman, J. C., McCarthy, J. J., & Peavey, D. G. (1979). Growth rate influence on the chemical composition of phytoplankton in oceanic waters. *Nature*, 279(5710), 210–215.
- Hansen, D. V., & Rattray, M. (1966). NEW DIMENSIONS IN ESTUARY CLASSIFICATION1. *Limnology and Oceanography*, 11(3), 319–326.
- Harley, C. D. G., Randall Hughes, A., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., Rodriguez, L. F., Tomanek, L., & Williams, S. L. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9(2), 228–241.
- ICNF. (2022). *Reserva Natural do Estuário do Tejo*. ICNF - Instituto Da Conservação Da Natureza E Das Florestas. <https://icnf.pt/conservacao/reservasnaturais/rnestuariodotejo>
- IPMA - *Zonas de Produção Moluscos Bivalves*. Instituto Português Do Mar E Da Atmosfera. Consultado em 29 de Outubro de 2022, de <https://www.ipma.pt/pt/bivalves/zonas/index.jsp>
- Kamermans, P., Galley, T., Boudry, P., Fuentes, J., McCombie, H., Batista, F., Blanco, A., Dominguez, L., Cornette, F., Pincot, L., & Beaumont, A. (2013). Blue mussel hatchery technology in Europe. *Advances in Aquaculture Hatchery Technology*, 339–373.
- Kooijman, S. (1998). The Synthesizing Unit as model for the stoichiometric fusion and branching of metabolic fluxes. *Biophysical Chemistry*, 73(1–2), 179–188.
- Kooijman, S. (2000). *Dynamic Energy and Mass Budgets in Biological Systems (2nd Edition)*. Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Kooijman, S. (2001). Quantitative aspects of metabolic organization: a discussion of concepts. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 356(1407), 331–349.
- Kooijman, S. (2006). Pseudo-faeces production in bivalves. *Journal of Sea Research*, 56(2), 103–106.
- Kooijman, S. (2010). *Dynamic Energy and Mass Budgets in Biological Systems (3rd Edition)*. Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Landmann, J., Ongsiek, T., Goseberg, N., Heasman, K., Buck, B., Paffenholz, J. A., & Hildebrandt, A. (2019). Physical Modelling of Blue Mussel Dropper Lines for the Development of Surrogates and Hydrodynamic Coefficients. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3), 65.
- Letscher, R. T., Primeau, F., & Moore, J. K. (2016). Nutrient budgets in the subtropical ocean gyres dominated by lateral transport. *Nature Geoscience*, 9(11), 815–819.
- Levinton, J. (1972). Stability and Trophic Structure in Deposit-Feeding and Suspension-Feeding Communities. *The American Naturalist*, 106(950), 472–486.
- Newell, R. (2004). Ecosystem influences of natural and cultivated populations of suspension-feeding bivalve molluscs: A review. *Journal of Shellfish Research*, 23(1), 51–61.
- Nisbet, R. M., Muller, E. B., Lika, K., & Kooijman, S. A. L. M. (2000). From molecules to ecosystems through dynamic energy budget models. *Journal of Animal Ecology*, 69(6), 913–926.
- Paytan, A., & McLaughlin, K. (2007). The Oceanic Phosphorus Cycle. *Chemical Reviews*, 107(2), 563–576.
- Perillo, G. M. (1995). Chapter 2 Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries. *Developments in Sedimentology*, 17–47.

- Pina, P. (2001). *An Integrated Approach to Study The Tagus Estuary Water Quality* [Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos]. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Portela, L. (1996). *Modelação matemática de processos hidrodinâmicos e de qualidade da água no Estuário do Tejo* [Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia do Ambiente]. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Pouvreau, S., Bourles, Y., Lefebvre, S., Gangnery, A., & Alunno-Bruscia, M. (2006). Application of a dynamic energy budget model to the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, reared under various environmental conditions. *Journal of Sea Research*, 56(2), 156–167.
- Protopopescu, G. C., & Beal, B. F. (2015). Settlement Response to Various Rope Substrates in Blue Mussels (*Mytilus edulis* Linnaeus) in a Hatchery Setting. *Journal of Shellfish Research*, 34(2), 383–391.
- Redfield, A. C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46(3), 230A – 221.
- Ruckelshaus, M., Doney, S., Galindo, H., Barry, J., Chan, F., Duffy, J., English, C., Gaines, S., Grebmeier, J., Hollowed, A., Knowlton, N., Polovina, J., Rabalais, N., Sydeman, W., & Talley, L. (2013). Securing ocean benefits for society in the face of climate change. *Marine Policy*, 40, 154–159.
- Ruttenberg, K. C. (2001). PHOSPHORUS CYCLE. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (1st ed., Vol. 4, pp. 2149–2162). Elsevier Ltd.
- Saraiva, S. (2019). *Module bivalve manual*. Instituto Superior Técnico, Maretec. [http://wiki.mohid.com/index.php?title=Module\\_Bivalve](http://wiki.mohid.com/index.php?title=Module_Bivalve)
- Saraiva, S., der Meer, J. V., Kooijman, S., & Sousa, T. (2011a). DEB parameters estimation for *Mytilus edulis*. *Journal of Sea Research*, 66(4), 289–296.
- Saraiva, S., van der M, M., Kooijman, S., Witbaard, R., Philippart, C., Hippler, D., & Parker, R. (2012). Validation of a Dynamic Energy Budget (DEB) model for the blue mussel *Mytilus edulis*. *Marine Ecology Progress Series*, 463, 141–158.
- Saraiva, S., van der Meer, J., Kooijman, S., & Ruardij, P. (2014). Bivalves: From individual to population modelling. *Journal of Sea Research*, 94, 71–83.
- Saraiva, S., van der Meer, J., Kooijman, S., & Sousa, T. (2011b). Modelling feeding processes in bivalves: A mechanistic approach. *Ecological Modelling*, 222(3), 514–523.
- Saurel, C., Ng, C., Barreau, P., Connellan, I., Hannon, C., Hughes, A., & Nielsen, P. (2022). Hatchery protocols for production of blue mussel seeds. *AquaVitae Consortium*.
- Scavia, D., Field, J. C., Boesch, D. F., Buddemeier, R. W., Burkett, V., Cayan, D. R., Fogarty, M., Harwell, M. A., Howarth, R. W., Mason, C., Reed, D. J., Royer, T. C., Sallenger, A. H., & Titus, J. G. (2002). Climate change impacts on U.S. Coastal and Marine Ecosystems. *Estuaries*, 25(2), 149–164.
- Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos*. SNIRH. Consultado em 13 de Setembro de 2022, de <https://snirh.apambiente.pt/>

- Smaal, A. (2002). European mussel cultivation along the Atlantic coast: production status, problems and perspectives. *Hydrobiologia*, 484, 89–98.
- Smaal, A. (2009). Shellfish innovations in the Netherlands: Mussel seed collectors. *Global Seafood Alliance*. <https://www.globalseafood.org/advocate/shellfish-innovations-in-the-netherlands-mussel-seed-collectors/>
- Sprung, M. (1984). Physiological energetics of mussel larvae (*Mytilus edulis*). I. Shell growth and biomass. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 17, 283–293.
- Sunda, W. G. (2012). Feedback Interactions between Trace Metal Nutrients and Phytoplankton in the Ocean. *Frontiers in Microbiology*, 3.
- Towers, L. (2010). *How to farm blue mussels*. The Fish Site. <https://thefishsite.com/articles/cultured-aquaculture-species-blue-mussels>
- Tyler-Walters, H. (2008). *Mytilus edulis* Common mussel. *Marine Life Information Network: Biology and Sensitivity Key Information Reviews*.
- Valle-Levinson, A. (2010). *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press.
- van der Meer, J. (2006). An introduction to Dynamic Energy Budget (DEB) models with special emphasis on parameter estimation. *Journal of Sea Research*, 56(2), 85–102.
- van der Veer, H. W., Cardoso, J. F., & van der Meer, J. (2006). The estimation of DEB parameters for various Northeast Atlantic bivalve species. *Journal of Sea Research*, 56(2), 107–124.
- Vaughn, C. C., & Hoellein, T. J. (2018). Bivalve Impacts in Freshwater and Marine Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 49(1), 183–208.
- Vichi, M., Pinardi, N., & Masina, S. (2007). A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part I: Theory. *Journal of Marine Systems*, 64(1–4), 89–109.
- Widdows, J. (1991). Physiological ecology of mussel larvae. *Aquaculture*, 94(2–3), 147–163.
- Zabata, C., Young, C., Sountis, J., & Kuehl, M. (2008). *Mytilus edulis* (On-line). Animal Diversity Web. [https://animaldiversity.org/accounts/Mytilus\\_edulis/](https://animaldiversity.org/accounts/Mytilus_edulis/)