

Modelação Matemática da Produção Primária em Zonas Costeiras

José L. S. Pinho^{1†}, José M. P. Vieira²

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

José S. A. Carmo³

*Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Departamento de Engenharia Civil
Pinhal de Marrocos P – 3030 Coimbra, Portugal*

RESUMO

O estudo da dinâmica de produção primária apresenta um interesse especial quando realizado em zonas costeiras utilizadas de forma intensiva para a aquicultura, como é o caso da Ria de Arosa. Nesta ria, a cadeia alimentar é dominada pelas elevadas taxas de produção primária sustentadas pelo afloramento de águas oceânicas ricas em nutrientes, resultando em elevadas quantidades de fitoplâncton que, por sua vez, servem de sustento às culturas de mexilhão em *bateas*. Neste artigo apresenta-se um modelo da cadeia alimentar proposto para a Ria de Arosa. Procedeu-se à apresentação das principais variáveis de estado seleccionadas e à caracterização das cinéticas que lhes estão associadas, evidenciando-se ainda as principais potencialidades de um modelo deste tipo na avaliação e previsão de cenários de funcionamento da cadeia alimentar.

1. INTRODUÇÃO

As regiões litorais adquirem uma relevância muito especial para a vida humana, uma vez que aqui vive cerca de 70% da população mundial e é nestas zonas que se produzem e exploram a maior parte dos recursos marinhos utilizados pelo homem.

Na gestão das zonas costeiras é fundamental o conhecimento dos processos físicos, químicos e biológicos que nelas ocorrem, sobretudo naquelas em que da pressão das actividades humanas resulta a sobre-exploração dos recursos disponibilizados, causando problemas ambientais relacionados com o equilíbrio dos ecossistemas naturais.

A hidroinformática constitui um domínio científico recente, conjugando ferramentas informáticas com conceitos e modelos ambientais, proporcionando não só informação operacional mas também previsão de tendências a longo prazo. O crescimento exponencial

¹ Professor Auxiliar

[†] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (jpinho@civil.uminho.pt)

² Professor Catedrático

³ Professor Auxiliar

das capacidades de meios computacionais, bem como os desenvolvimentos em processamento de informação espacial e representação gráfica, permitem o desenvolvimento de novas e mais poderosas ferramentas de suporte ao planeamento e à gestão de zonas costeiras. A hidroinformática explora a interação entre a modelação matemática e as tecnologias de informação e comunicação, no sentido de proporcionar a sua aplicação na resolução de problemas relacionados com os sistemas hídricos, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentado das sociedades contemporâneas (Abbott, 1996).

O programa *PROCESSOS* (Pinho, 2001) permite efectuar a integração de sistemas de equações diferenciais, sendo uma ferramenta de grande utilidade para o estudo dos processos de maior complexidade a aplicar num determinado modelo de qualidade da água. De facto, a modelação de processos traduz-se, de uma forma geral, no estabelecimento de equações de conservação de um conjunto de variáveis de estado, constituindo um sistema de equações diferenciais. A integração temporal destes sistemas de equações permite realizar uma avaliação prévia do desempenho das cinéticas adoptadas na modelação das reacções biogeoquímicas, a que cada uma das variáveis de estado se encontra sujeita, e proceder a análises de sensibilidade dos resultados aos valores dos parâmetros considerados no modelo, apresentando-se assim como uma ferramenta crucial na simplificação dos processos de forma a que a sua inclusão num modelo de circulação geral (*2DH* ou *3D*) não se torne demasiado onerosa.

A produção primária nos oceanos representa cerca de 40% da produção primária total anual na Terra, constituindo uma das componentes fundamentais do ciclo do carbono. A formulação de modelos dinâmicos do ecossistema planctónico tem sido uma das vertentes mais abordadas no estudo do ciclo do carbono (Yool, 1997). O estudo da dinâmica de produção primária apresenta ainda um interesse especial quando realizado em zonas costeiras utilizadas de forma intensiva para a aquicultura, como é o caso da Ria de Arosa. Nesta ria, a cadeia alimentar é dominada pelas elevadas taxas de produção primária sustentadas pelo afloramento de águas oceânicas ricas em nutrientes, resultando em elevadas quantidades de fitoplâncton que, por sua vez, servem de sustento às culturas de mexilhão em *bateas* (Tenore e González, 1975).

2. MODELO DA CADEIA ALIMENTAR

O conhecimento das relações tróficas nos meios hídricos da zona costeira revela-se de importância crucial para o sucesso das políticas de gestão ambiental destes sistemas. O estudo das variações sazonais de produção primária, a influência dos factores ambientais nos ciclos produtivos, a introdução de substâncias tóxicas na cadeia alimentar e a influência dos regimes hidrodinâmicos nos ciclos produtivos são assuntos que têm vindo a ser investigados e onde a modelação matemática começa a tornar-se uma ferramenta muito valiosa.

Na Figura 1 apresentam-se as variáveis de um modelo de cadeia alimentar e as correspondentes relações tróficas (representadas pelas linhas de ligação) que serão caracterizadas de seguida.

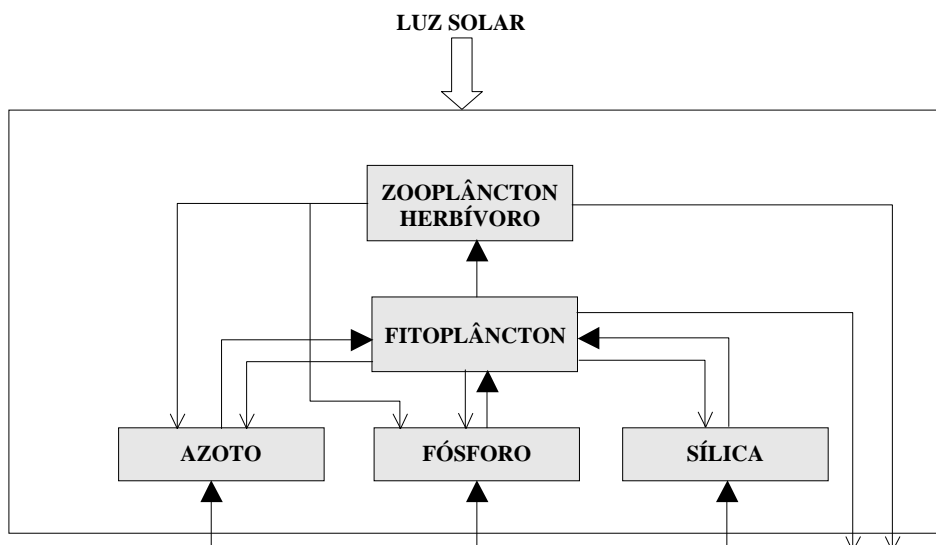


Figura 1 – Cadeia alimentar – Cinética processual.

No Quadro 1 apresentam-se as variáveis consideradas no presente modelo, assim como os símbolos e as respectivas unidades utilizadas para a sua representação.

Quadro 1 – Cadeia alimentar: variáveis de estado.

Variável	Símbolo	Unidades
Cadeia alimentar:		
1. Algas	a	$mg\ m^{-3}$
2. Zooplâncton herbívoro	z_h	$gC\ m^{-3}$
Nutrientes:		
3. Azoto	n	$mgN\ m^{-3}$
4. Fósforo	p	$mgP\ m^{-3}$
5. Sílica	s	$mgSi\ m^{-3}$

As algas e os nutrientes poderão ser descritos pelas seguintes equações:

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = -u \frac{\partial B_i}{\partial x} - v \frac{\partial B_i}{\partial y} - (w - w_{sB_i}) \frac{\partial B_i}{\partial z} + A_h \left(\frac{\partial^2 B_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_i}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 B_i}{\partial z^2} + R_i \quad (1)$$

$i = 1,3,4,5$

em que B_i e w_{sB_i} representam a concentração e a velocidade de sedimentação da espécie química/biológica i , respectivamente. Salienta-se que esta velocidade poderá ser considerada nula, com exceção das velocidades de sedimentação relativas às algas. As parcelas R_i , dizem respeito às reacções (transformação de constituintes). Utiliza-se o índice i para identificação de cada uma das variáveis utilizadas.

As algas apresentam um crescimento que é função da temperatura, da concentração de nutrientes no meio hídrico e da radiação solar. O seu decaimento deve-se a perdas por respiração e excreção, predação e sedimentação. Pode-se então estabelecer a seguinte equação:

$$R_a = k_g(T, n, p, s, I)a - k_{ra}(T)a - C_{gh}(T, a, z_h)a \quad (2)$$

onde,

- $k_g(T, n, p, s, I)$ é a taxa de crescimento das algas [dia^{-1}];
 $k_{ra}(T)$ é a taxa de respiração e excreção das algas [dia^{-1}];
 $C_{gh}(T, a, z_h)$ é a taxa de predação das algas, [dia^{-1}].

As taxas de crescimento e de predação dependem de diversos factores ambientais. Estas dependências poderão ser estabelecidas por relações funcionais. A dependência da taxa de crescimento de algas em relação à temperatura, intensidade de luz e disponibilidade de nutrientes é dada pela relação:

$$k_g(T, n, p, s, I) = k_{g,20} \theta_a^{T-20} F(I) \min\left(\frac{n}{k_{sn} + n}, \frac{p}{k_{sp} + p}, \frac{s}{k_{ss} + s}\right) \quad (3)$$

em que,

- $k_{g,20}$ é a taxa máxima de crescimento de algas [dia^{-1}];
 θ_a é o factor de temperatura – algas;
 $F(I)$ é a função de dependência da intensidade de luz;
 k_{sn} é a constante de semi-saturação – azoto [$mgN m^{-3}$];
 k_{sp} é a constante de semi-saturação – fósforo [$mgP m^{-3}$];
 k_{ss} é a constante de semi-saturação – sílica [$mgSi m^{-3}$];
 I é a intensidade da luz [$w m^{-2}$].

A quantificação do efeito da luz no crescimento de algas apresenta-se bastante complexa devido à necessidade de se integrar o efeito de diferentes factores, como sejam: a variação diurna da intensidade da luz, a atenuação da luz à medida que penetra na coluna de água e a dependência da taxa de crescimento em relação à intensidade da luz. Embora possa ser utilizada uma função do tipo *Michaelis-Menten*, a expressão de *Steele* é a mais utilizada, uma vez que permite traduzir a diminuição da taxa de crescimento quando a intensidade da luz ultrapassa o valor óptimo. Esta expressão é definida por:

$$F(I) = \frac{I}{I_s} e^{-\frac{I}{I_s} + 1} \quad (4)$$

em que I é a intensidade de luz e I_s é a intensidade de luz óptima (intensidade de luz que permite uma taxa máxima de crescimento de algas, normalmente determinada experimentalmente). A intensidade média da luz durante o dia (I_a) pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$I_a = I_m \left(\frac{2}{\pi}\right) \quad (5)$$

onde I_m é a intensidade máxima da luz. A variação da intensidade de luz com a profundidade pode ser modelada pela lei de *Beer-Lambert*:

$$I(z) = I_0 e^{-k_e z} \quad (6)$$

em que I_0 é a intensidade de luz à superfície e k_e é um coeficiente de extinção da luz. Este último coeficiente pode ser relacionado com outras grandezas, como por exemplo a concentração de algas, a , na coluna de água (Chapra, 1997):

$$k_e = k'_e + 0.0088 a + 0.054 a^{2/3} \quad (7)$$

A constante k'_e pode ser determinada directamente ou relacionada com outras variáveis. Finalmente, poderemos definir a função $F(I)$ substituindo a Eq. 6 na expressão de Steele (Eq. 4):

$$F(I) = \frac{I_a e^{-k_e z}}{I_s} e^{-\frac{I_a e^{-k_e z}}{I_s} + 1} \quad (8)$$

Voltando novamente à Eq. 2, a taxa correspondente à respiração poderá sofrer uma correcção de temperatura, de acordo com uma expressão do tipo:

$$k_{ra}(T) = k_{ra,20} \theta_{ra}^{T-20} \quad (9)$$

sendo θ_{ra} o factor de temperatura para a respiração de algas. A taxa de predação das algas apresenta uma dependência em relação à temperatura e relativamente à concentração de algas (relação funcional do tipo Michaelis-Menten, o que corresponde a considerar que a taxa de predação se mantém em patamar para valores elevados da concentração de algas):

$$C_{gh}(T, a, z_h) = \frac{a}{k_{sa} + a} C_g \theta_{gh}^{T-20} z_h \quad (10)$$

em que k_{sa} é a constante de semi-saturação para algas ($mgChla\ m^{-3}$), θ_{gh} é o factor de temperatura do zooplâncton herbívoro e C_g é a taxa de ingestão de algas pelo zooplâncton herbívoro ($L\ mgC^{-1}\ dia^{-1}$). Parte das algas ingeridas é transformada em zooplâncton herbívoro. Por sua vez, o zooplâncton herbívoro diminui devido à actividade dos seus predadores (zooplâncton carnívoro) e por perdas por respiração e excreção. A equação de reacção é dada por:

$$R_{z_h} = a_{ca} \epsilon_h C_{gh}(T, a, z_h) a - C_{gc}(T, z_c) z_h - k_{rh}(T) z_h \quad (11)$$

onde,

- a_{ca} é a razão de conversão da clorofila-a das algas em carbono do zooplâncton [$gC\ mgChla^{-1}$];
- ϵ_h é a eficiência de predação de algas;
- $C_{gc}(T, z_c)$ é a taxa de predação de zooplâncton carnívoro [dia^{-1}].

A taxa de predação de zooplâncton carnívoro será dada por:

$$C_{gc}(T, z_c) = C_{gc} \theta_{gc}^{T-20} z_c \quad (12)$$

em que θ_{gc} é o factor de temperatura do zooplâncton carnívoro. Os nutrientes considerados na cadeia alimentar são o azoto e fósforo inorgânicos e os silicatos. A equação de reacção para a amónia vem:

$$R_{n_a} = a_{na}k_{ra}(T)a + a_{nc}k_{rh}(T)z_h + a_{nc}k_{rc}(T)z_c - F_{am}a_{na}k_g(T, n, p, I)a - k_n(T)n_a \quad (13)$$

em que k_n é uma taxa de nitrificação e F_{am} é a fracção de azoto na quantidade de amónia existente (n_a) que é consumida pelas algas, sendo dada por:

$$F_{am} = \frac{n_a}{k_{am} + n_a} \quad (14)$$

A constante de semi-saturação de preferência da amónia é representada por k_{am} ; a_{nc} e a_{na} são coeficientes de conversão de azoto para carbono e clorofila, respectivamente. As equações de reacção de nitrato, fósforo e silicatos são as seguintes:

$$R_{n_i} = k_n(T)n_a - (1 - F_{am})a_{na}k_g(T, n, p, I)a \quad (15)$$

$$R_p = a_{pa}k_{ra}(T)a + a_{pc}k_{rh}(T)z_h + a_{pc}k_{rc}(T)z_c - a_{pa}k_g(T, n, p, I)a \quad (16)$$

$$R_s = a_{si}k_{ra}(T)a - a_{si}k_g(T, n, p, I)a \quad (17)$$

em que a_{si} e a_{pa} são coeficientes de conversão de sílica e fósforo para clorofila-a, respectivamente e a_{pc} é a razão estequiométrica de conversão do fósforo em carbono. Utilizando as cinéticas definidas pelas Eq.s 2 a 17, a produção primária em zonas costeiras poderá ser modelada desde que se disponha de ferramentas que permitam efectuar a integração do sistema definido pelas referidas equações.

3. DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA NA RIA DE AROSA

A base de dados de qualidade da água constituída a partir da informação recolhida na amostragem semanal efectuada em vários pontos da Ria de Arosa constitui a principal componente do sistema de informação geral utilizado no estudo, objecto do presente trabalho. A principal base de dados utilizada é constituída por parte da informação recolhida semanalmente desde Março de 1992, em dez pontos (A0 a A9) assinalados na Figura 2 (CCCMM, 1997). As variáveis temperatura, salinidade, pH, % de transmissão de luz, fluorescência e oxigénio dissolvido são medidas continuamente na coluna de água nas dez estações. Simultaneamente são recolhidas amostras compostas, correspondentes a três camadas (de 0 a 5 m de profundidade, de 5 a 10 m e de 10 a 15 m), que são caracterizadas em termos de concentrações de pigmentos fitoplanctónicos (clorofilas-a, -b e -c) e nutrientes (nitratos, nitritos, amónia, fosfatos e silicatos). Para a realização deste trabalho foram disponibilizados pelo *Centro de Control del Medio Mariño da Xunta de Galicia* uma série de dados correspondente ao período de Março de 1992 a Dezembro de 1993 (temperatura, salinidade, pH, % de transmissão de luz, fluorescência, oxigénio dissolvido e pigmentos fitoplanctónicos). Foram ainda utilizados os dados de concentrações de nutrientes no período de Março de 1992 a Dezembro de 1997 compilados a partir do relatório CCCMM (1997).

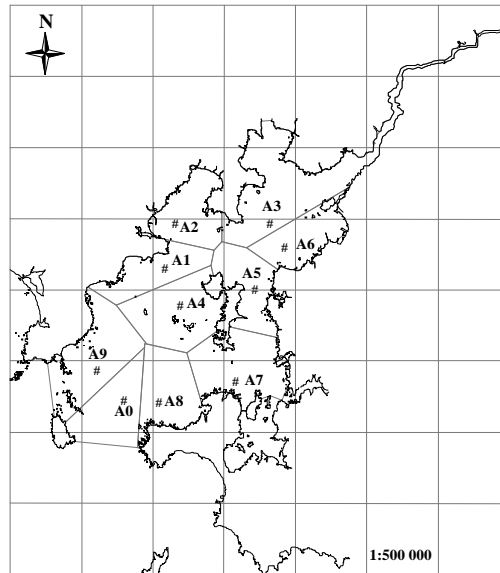


Figura 2 - Localização dos pontos de amostragem semanal (A0 a A9).

Na Figura 3 apresentam-se os mapeamentos dos valores médios, para o período considerado, de algumas das variáveis medidas, realizados com uma ferramenta de Sistemas de Informação Geográfica. A análise mais detalhada das condições oceanográficas verificadas no período considerado é apresentada em Pinho (2001).

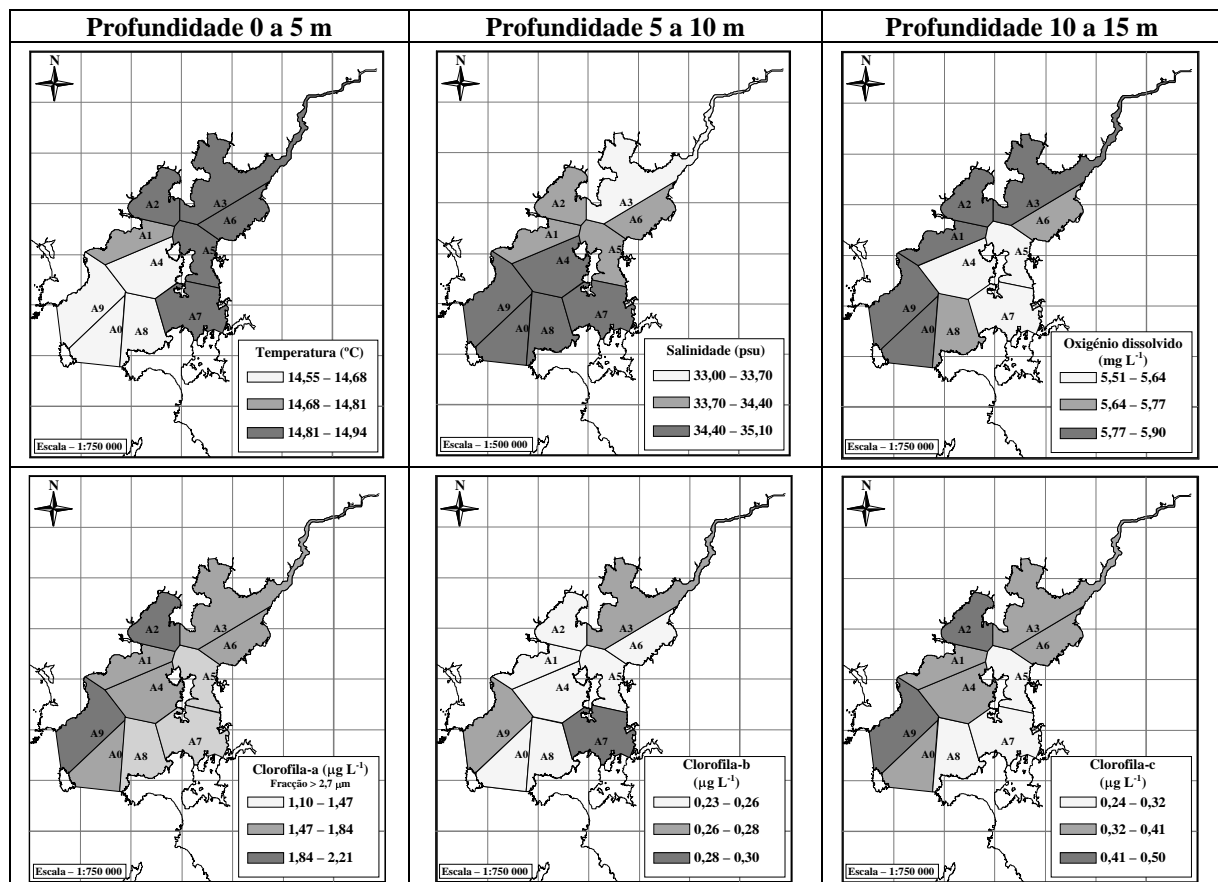


Figura 3 – Temperatura, salinidade, concentração de oxigénio dissolvido e pigmentos fitoplanctónicos médios na Ria de Arosa (período de Março de 1992 a Dezembro de 1993).

A série de dados semanais disponível compreende o período de Junho de 1992 a Dezembro de 1997. A concentração média anual de nutrientes apresenta uma distribuição espacial semelhante para os vários nutrientes, existindo um aumento da concentração média da zona oceânica para a zona interior. Na Figura 4 apresenta-se a evolução anual da concentração média de nutrientes nas diferentes estações de amostragem. As concentrações encontram-se expressas em % do valor da máxima concentração média mensal. A variação das concentrações de nutrientes registada é consentânea com a evolução das concentrações de clorofila-a verificadas: as máximas concentrações de nutrientes verificam-se no Inverno, diminuem ao longo da Primavera e registam os valores mínimos no Verão, estação a partir da qual voltam a aumentar as concentrações de nutrientes na coluna de água.

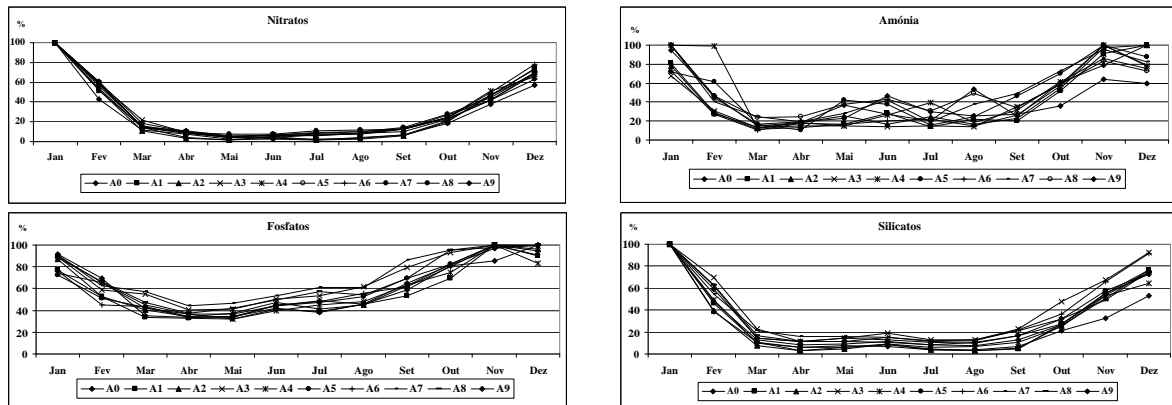


Figura 4 – Variação mensal da concentração (expressa em % do valor máximo) de nutrientes na Ria de Arosa (período de Junho de 1992 a Dezembro de 1997).

4. MODELAÇÃO DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA NA RIA DE AROSA

4.1. Generalidades

As principais variáveis com influência na produção primária de um sistema costeiro podem ser reunidas em três grupos: (1) condições ambientais, incluindo a intensidade da radiação solar, a temperatura da água e as condições de circulação e mistura; (2) disponibilidade de nutrientes na camada fótica, sendo o azoto, o fósforo e a sílica aqueles que, pela sua ausência, poderão limitar a produção primária e (3) o tipo e diversidade dos constituintes biológicos (fitoplâncton e zooplâncton).

Optou-se por realizar um conjunto de simulações que permitam caracterizar a variação sazonal da produção primária na ria, uma vez que a frequência de amostragem dos dados disponíveis (semanal) dificulta a consideração de dinâmicas associadas a escalas inferiores à da escala sazonal. Tenore e Gonzalez (1975) identificaram os bivalves cultivados em *bateas* como a espécie de zooplâncton dominante da cadeia alimentar da ria, verificando, no entanto, a existência de outros consumidores secundários que se desenvolvem, quer nas cordas suspensas das plataformas flutuantes, quer nas camadas bênticas. Estas espécies servem por sua vez de alimento a outras espécies piscícolas. No presente modelo da cadeia alimentar é considerada uma camada da ria de profundidade constante igual a 15 m, referindo-se os valores das variáveis envolvidas no modelo a concentrações médias nesta camada.

Para além do azoto e do fósforo considerou-se ainda como nutriente limitante a sílica, uma vez que, durante os episódios de *upwelling*, as espécies fitoplanctónicas dominantes na

ria (Alvarez-Salgado *et al.*, 1998) pertencem ao grupo das diatomáceas que necessitam de sílica para a formação da *parede* envolvente das suas células (Chapra, 1997).

A formulação utilizada para a modelação da evolução temporal do zooplâncton herbívoro (constituído essencialmente pelos mexilhões de cultivo, segundo Tenore e Gonzalez (1975), como foi referido anteriormente) é análoga à traduzida pela Eq. 11.

A taxa de predação presente na equação anterior deverá incluir a *predação artificial* associada à operação de colheita da técnica de cultivo deste bivalve que apresenta as seguintes fases (Roman e Perez, 1978): a semente de mexilhão é recolhida das rochas localizadas essencialmente na zona intertidal ou/e sob as *bateas* e é fixada às cordas; nestas cordas com um peso inicial de aproximadamente 10 *kgf* os mexilhões desenvolvem-se, atingindo ao fim de 4 a 6 meses dez vezes o peso inicial; segue-se a fase de *desdobramento* que consiste em dividir os mexilhões da corda inicial por três novas cordas com o mexilhão de maiores dimensões (tendo cada corda peso aproximado de 30 *kgf*) e uma corda com o mexilhão de semente; as cordas são novamente suspensas das *bateas* podendo ao fim de 10 a 12 meses realizar-se a operação de colheita (após terem triplicado o seu peso, aproximadamente). Estas operações podem realizar-se durante todo o ano; contudo, 85% das cordas de semente são suspensas nos meses de Novembro a Abril e 80% das cordas de desdobramento são suspensas nos meses de Junho a Setembro.

A abundância de nutrientes na camada superficial da ria depende dos episódios de afloramento das águas profundas da ria que são motivados pela actuação do vento de Norte, conforme se constatou pelos resultados das simulações hidrodinâmicas realizadas (Pinho, 2001). Assim, nas equações de balanço de nutrientes (fósforo, azoto e sílica) considera-se um termo que traduz o enriquecimento devido ao *upwelling* (para além dos termos referentes à respiração/excreção de fitoplâncton e zooplâncton) e o seu consumo devido ao crescimento da biomassa algal. Optou-se por considerar o azoto total disponível, omitindo-se a forma em que se encontra (nitratos, nitritos ou amónia). O modelo da cadeia alimentar apresentado constitui assim uma primeira aproximação na tentativa de modelar a produção primária na Ria de Arosa. Um modelo mais elaborado com maior número de variáveis envolvidas requer a utilização de meios técnicos e de recursos humanos mais vastos dos que foram usados neste trabalho.

4.2. Radiação solar e temperatura da água

A radiação solar no topo da atmosfera pode ser calculada em qualquer instante e para qualquer latitude utilizando-se uma fórmula em que intervêm grandezas geométricas relacionadas com a posição da Terra em relação ao Sol (Yool, 1997). A percentagem de radiação solar que chega à superfície oceânica é de difícil quantificação, dependendo das propriedades da atmosfera (existência de nuvens, composição gasosa, etc.). No presente trabalho foi utilizada uma expressão empírica apresentada em Yool (1997), que faz depender a percentagem de radiação que atinge a superfície oceânica (CF) da nublosidade na atmosfera. Esta deverá ser expressa numa escala qualitativa variando de 0 a 8 em que a unidade é o *okta*. Neste trabalho foi considerada uma nublosidade média de 4 *okta* (0 *okta* corresponde a um céu limpo e 8 *okta* a um céu totalmente nublado). Na Figura 5 apresenta-se a variação anual da intensidade da radiação solar no topo da atmosfera (I_{top}) e na superfície oceânica (I_{so}) para a latitude de 42,5 ° N às 12 horas (intensidades máximas).

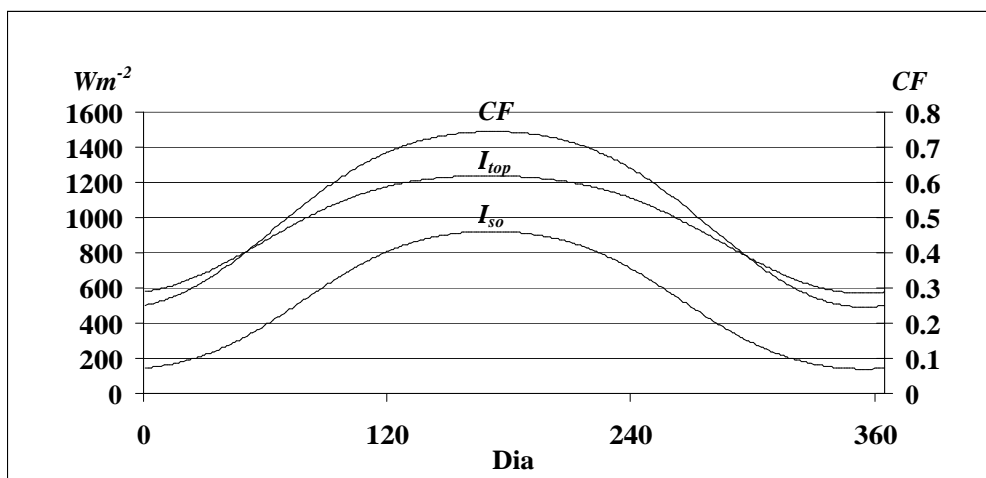


Figura 5 – Variação anual da intensidade da radiação solar no topo da atmosfera (I_{top}) e na superfície oceânica (I_{so}) para a latitude de $42,5^\circ N$ às 12 horas (intensidades máximas).

A radiação solar que atinge a superfície oceânica foi corrigida de forma a contabilizar-se a reflectividade da superfície oceânica ($\bar{\alpha} = 0,05$) e o quociente entre a radiação total e a radiação disponível para a actividade fotosintética (0,43 segundo Chapra, 1997). A variação diária foi considerada do tipo sinusoidal sendo o valor médio diário obtido a partir da relação expressa pela Eq. 5. Obteve-se assim, a intensidade média diária da radiação solar apresentada na Figura 6 a).

O factor limitante do crescimento de algas relacionado com a intensidade da luz no presente modelo resulta da integração vertical da Eq. 8, considerando uma camada de espessura igual a 15 m. Na expressão resultante consta a duração do fotoperíodo (f) que foi estimada para a latitude considerada por uma expressão proposta em Yool (1997) e cujos resultados são também apresentados na Figura 6 a). A temperatura média da água foi obtida a partir da média dos valores disponíveis em três camadas superficiais (0 a 5 m, 5 a 10 m e 10 a 15 m) nas dez estações da ria (CCCMM, 1997) no período de Março de 1992 a Dezembro de 1993. Os valores calculados foram aproximados por uma função polinomial que traduz a variação sazonal da temperatura da água (na camada superficial) e que é apresentada na Figura 6 b).

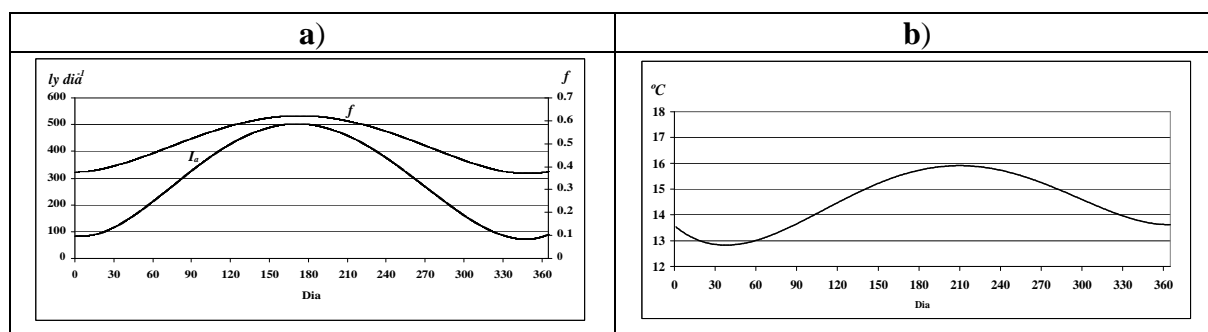


Figura 6 – Variação anual: a) da intensidade média diária da radiação solar sob a superfície oceânica e da duração relativa do fotoperíodo para a latitude de $42,5^\circ N$; b) da temperatura média da água da camada superficial da ria estimada a partir dos valores medidos de Março de 1992 a Dezembro de 1993.

4.3. Parâmetros do modelo

A principal dificuldade na criação de um modelo de um processo biogeoquímico em geral e de modelos de cadeias alimentares em particular resulta da grande quantidade de parâmetros necessários à correcta descrição dos fenómenos envolvidos. Por outro lado, se alguns dos parâmetros apresentam intervalos de variação relativamente curtos e com valores semelhantes em sistemas idênticos, outros apresentam uma grande variabilidade e são simultaneamente de difícil quantificação (quer através de métodos laboratoriais quer através de medições de campo). Outra dificuldade adicional resulta do facto de alguns dos parâmetros que são considerados constantes nos modelos serem na realidade variáveis, traduzindo esta variabilidade a adaptação dos sistemas naturais à modificação das condições ambientais. Perante as dificuldades apresentadas, os resultados obtidos com os modelos de processos (estabelecidos a partir de equações de conservação) deverão ser preferencialmente interpretados do ponto de vista qualitativo e utilizados sobretudo como uma ferramenta auxiliar que se revela muito poderosa como meio de validação de hipóteses de funcionamento de ecossistemas naturais e permite identificar os processos mais influentes desse funcionamento. No Quadro 2 apresentam-se os principais parâmetros cinéticos e estequiométricos utilizados no modelo da cadeia alimentar da Ria de Arosa e os respectivos intervalos de variação. Os coeficientes relacionados com a composição da biomassa apresentados (a_{na} , a_{pa} , a_{si} , a_{nc} e a_{pc}) foram determinados considerando-se um coeficiente de conversão de clorofila-a em carbono de $0,1 \text{ g C mg Chla}^{-1}$ e um conteúdo na biomassa algal de 5% de sílica.

Quadro 2 – Parâmetros cinéticos e estequiométricos utilizados no modelo da cadeia alimentar da Ria de Arosa.

Parâmetro	Descrição	Intervalo de variação e referência bibliográfica	Coefficiente temperatura
$k_{g,20}$	Taxa máxima de crescimento das algas à temperatura de referência (20 °C) (dia^{-1}).	1,5–2,5: Thomann e Mueller (1987) 2,0: Chapra (1997) 1,25; 2,9: Yool (1997)	$\theta_a=1.066$
k_{ra}	Taxa de respiração e excreção das algas (dia^{-1})	0,05–0,25: Thomann e Mueller (1987) 0,10–0,20: Chapra (1997)	$\theta_{ra}=1.080$
I_S	Intensidade de luz óptima ($ly \text{ dia}^{-1}$)	100 – 400: Chapra (1997)	-
k'_e	Coefficiente de extinção da luz (m^{-1}) (sem presença de fitoplâncton)	0,04: Yool (1997)	
k_{sp}	Constante de semi-saturação – fósforo ($mg \text{ P } m^{-3}$)	1,0-5,0: Thomann e Mueller (1987) 1,0-5,0: Chapra (1997)	-
k_{sn}	Constante de semi-saturação – azoto ($mg \text{ N } m^{-3}$)	10-20: Thomann e Mueller (1987) 5-20: Chapra (1997)	-
k_{ssi}	Constante de semi-saturação – sílica ($mg \text{ Si } m^{-3}$)	20-80: Chapra (1997)	-
a_{ca}	Razão de conversão da clorofila-a das algas em carbono do zooplâncton ($g \text{ C } mg \text{ Chla}^{-1}$)	0,01-0,10: Chapra (1997) 0,112: Yool (1997)	-
C_g	Taxa de ingestão do zooplâncton herbívoro ($L \text{ mg } C^{-1} \text{ dia}^{-1}$)	0,5-5,0: Chapra (1997)	$\theta_{gh}=1.066$
ϵ_h	Eficiência de predação de algas (-)	0,4-0,8: Chapra (1997)	-
k_{rh}	Taxa de respiração/excreção do zooplâncton herbívoro (dia^{-1})	0,01-0,05: Chapra (1997)	$\theta_{gh}=1.066$
k_{dh}	Taxa de mortalidade do zooplâncton herbívoro (dia^{-1})	0,1: Chau e Jin (1998)	$\theta_{gh}=1.066$
a_{na}	Razão estequiométrica de conversão do azoto em clorofila-a ($mg \text{ N } mg \text{ Chla}^{-1}$)	18	-
a_{pa}	Razão estequiométrica de conversão do fósforo em clorofila-a ($mg \text{ P } mg \text{ Chla}^{-1}$)	2,5	-
a_{si}	Razão estequiométrica de conversão da sílica em clorofila-a ($mg \text{ Si } mg \text{ Chla}^{-1}$)	13,16	-
a_{nc}	Razão estequiométrica de conversão do azoto em carbono ($\mu g \text{ N } mg \text{ C}^{-1}$)	180	-
a_{pc}	Razão estequiométrica de conversão do fósforo em carbono ($\mu g \text{ P } mg \text{ C}^{-1}$)	25	-

4.4. Análise de resultados

O estabelecimento de um modelo de cadeia alimentar obriga à quantificação da composição da biomassa algal. Esta poderá ser estimada a partir da equação representativa da fotossíntese (Chapra, 1997), tornando-se possível definir os conteúdos em azoto, fósforo e carbono da referida massa algal. A partir da referida equação e considerando que a parcela de fósforo corresponde a 1% do peso seco total é possível definir a composição relativa em cada um dos nutrientes. No caso do fitoplâncton incluir algumas espécies de diatomáceas (como se verifica na composição da massa algal da Ria de Arosa, de acordo com diversos estudos realizados na ria) parte da biomassa é formada por sílica (as diatomáceas apresentam na sua composição 4 a 50% de sílica, Lalli e Parsons, 1997).

Com as primeiras simulações realizadas com o modelo da cadeia alimentar da Ria de Arosa, procurou-se estabelecer a composição da biomassa algal e o coeficiente de conversão da clorofila-a em carbono (a_{ca}). Para tal foram consideradas as composições relativas apresentadas nos gráficos da Figura 7 correspondentes a dois conteúdos distintos em sílica: a) 5% de sílica e b) 10% de sílica.

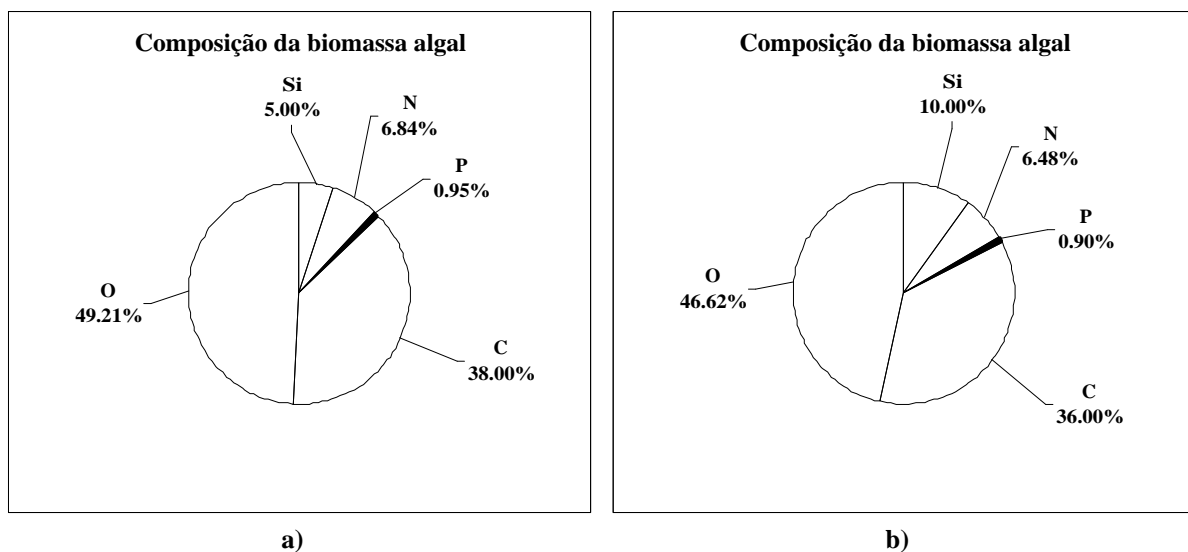


Figura 7 – Estimativa da composição da biomassa algal: a) com 5% de sílica; b) com 10% de sílica.

Para além dos distintos conteúdos em sílica foram ainda considerados dois coeficientes distintos de conversão da clorofila-a em carbono (a_{ca}): 0,1 e 0,05 $g C mg Chla^{-1}$. De facto, em algumas formulações de modelos de cadeias alimentares este coeficiente é considerado variável (Chau e Jin, 1998), o que permite estimar de forma mais realista a quantidade de biomassa presente na coluna de água a partir de medições de clorofila-a.

No Quadro 3 apresentam-se os valores adoptados para os diversos parâmetros cinéticos do modelo que resultaram em quatro simulações distintas. Em cada uma das simulações foram consideradas durações de simulações superiores a dez anos, tendo sido retidos os valores das fontes de nutrientes que conduzem a um ponto de equilíbrio do sistema e quantificada a correspondente produção primária.

A comparação da evolução das concentrações de nutrientes ao longo do ano calculadas a partir do modelo da cadeia alimentar da Ria de Arosa, apresentadas na Figura 8, com as concentrações médias mensais observadas, apresentadas na Figura 9, permite concluir que

aquelas que mais se aproximam dos valores registados são as que foram obtidas considerando-se um conteúdo de 5% de sílica na biomassa algal.

Quadro 3 – Valores dos parâmetros cinéticos e estequiométricos utilizados no modelo da cadeia alimentar da Ria de Arosa.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$k_{g,20}$	$2,0 \text{ dia}^{-1}$	ϵ_h	0,7
k_{ra}	$0,15 \text{ dia}^{-1}$	k_{rh}	$0,03 \text{ dia}^{-1}$
I_S	250 ly dia^{-1}	k_{dh}	$0,075 \text{ dia}^{-1}$
k'_e	$0,04 \text{ m}^{-1}$	a_{na}	$18; 9 \text{ mg N mg Chla}^{-1}$
k_{sp}	2 mg P m^{-3}	a_{pa}	$2,5; 1,25 \text{ mg P mg Chla}^{-1}$
k_{sn}	7 mg N m^{-3}	a_{si}	$27,78; 13,16; 13,89; 6,58 \text{ mg Si mg Chla}^{-1}$
k_{ssi}	20 mg Si m^{-3}	a_{nc}	$180 \mu\text{g N mg C}^{-1}$
a_{ca}	$0,05; 0,1 \text{ g C mg Chla}^{-1}$	a_{pc}	$25 \mu\text{g P mg C}^{-1}$
C_g	$3 \text{ L mg C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$		

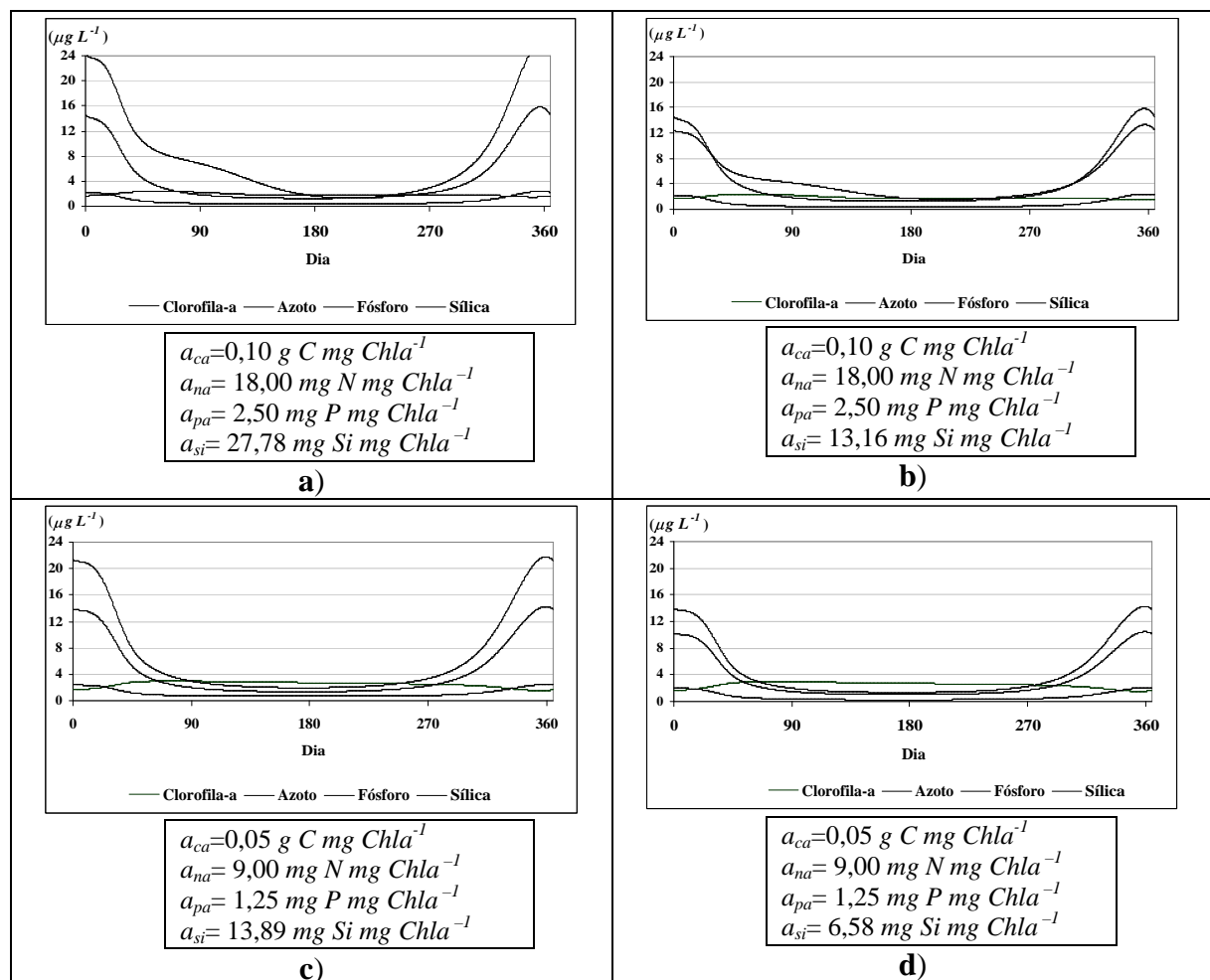


Figura 8 – Resultados obtidos para concentrações de nutrientes e clorofila-a para diferentes conteúdos de sílica da massa algal (10% em a) e c) e 5% em b) e d)) e diferentes coeficientes de conversão da clorofila-a em carbono .

Por outro lado, a produção primária total associada às simulações apresentadas na Figura 8 a) e b) é de $784 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e de $504 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ nas simulações c) e d). Noutros trabalhos (Tenore e González, 1975; Alvarez-Salgado *et al.*, 1996) indicam-se valores médios de produção primária na ria da ordem de $790 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Assim o valor do coeficiente de conversão da clorofila-a em carbono que conduz a produções primárias mais próximas das verificadas na ria será o valor mais elevado considerado ($a_{ca}=0,10 \text{ g C mg Chla}^{-1}$).

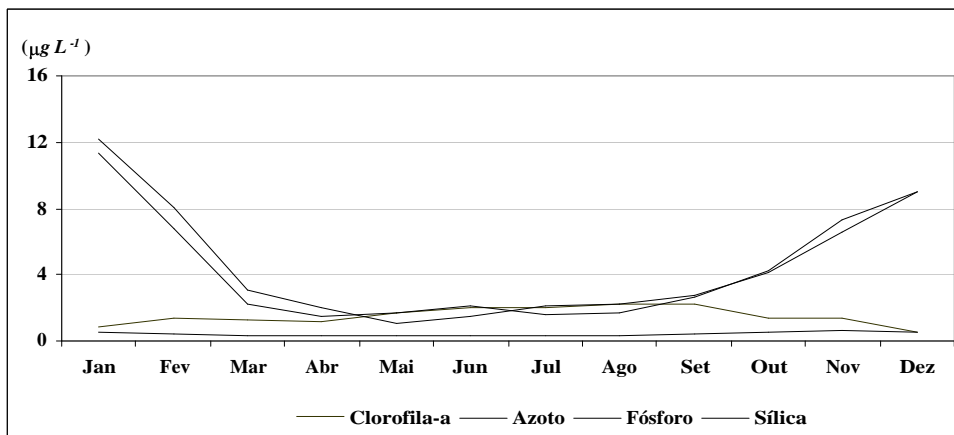


Figura 9 – Concentrações médias mensais de nutrientes e *clorofila-a* medidas.

Nas simulações a seguir apresentadas serão considerados os valores dos parâmetros apresentados no Quadro 3 e os valores de a_{ca} , a_{na} , a_{pa} e a_{si} utilizados na simulação b) da Figura 8. Como foi referido anteriormente, uma das principais dificuldades no estabelecimento de um modelo da cadeia alimentar num sistema natural prende-se com o facto de envolverem um grande número de parâmetros cujo comportamento e valor é na maior parte das situações de difícil quantificação. Assim, optou-se por apresentar os resultados para as concentrações da *clorofila-a* e zooplâncton herbívoro ao longo do ano, calculadas em função dos parâmetros com maior influência nos resultados obtidos. Na Figura 10 apresentam-se as concentrações de *clorofila-a* e zooplâncton herbívoro em função da taxa máxima de crescimento das algas à temperatura de referência, da intensidade de luz óptima e da taxa de respiração/excreção do fitoplâncton. Nesta figura apresentam-se ainda resultados em função de parâmetros relacionados com o crescimento do zooplâncton herbívoro: a taxa de ingestão do zooplâncton herbívoro, a eficiência da predação e a taxa de respiração/excreção do zooplâncton herbívoro.

A variação sazonal da concentração de clorofila-a evidenciada pelos resultados apresentados é característica das zonas costeiras de regiões temperadas (Odum, 1971). São evidentes dois valores máximos na concentração do fitoplâncton: um no início da Primavera e o segundo no Outono. Relativamente à influência dos valores adoptados para os parâmetros relacionados com o fitoplâncton, esta faz-se sentir essencialmente na variação da concentração no pico primaveril, sendo a referida variação igual ou inferior a 1 mg Chla L^{-1} . Contudo, os resultados obtidos pelo modelo, quando se considera $k_{g,20}=2,5 \text{ dia}^{-1}$, apresentam uma aproximação quase perfeita com os valores da concentração média de *clorofila-a* medidos nas várias estações de amostragem da ria, conforme se apresenta na Figura 9. O valor da concentração máxima do zooplâncton herbívoro ocorre para todas as simulações no final da Primavera sendo o valor máximo bastante sensível aos valores dos parâmetros adoptados. Os resultados dependentes dos parâmetros associados ao zooplâncton herbívoro apresentam uma influência mais marcada no andamento das curvas de concentração da clorofila-a após a

ocorrência do valor máximo de Primavera. Dependendo das características da comunidade de zooplâncton herbívoro, constituída essencialmente pelos bivalves das plataformas flutuantes (Tenore e González, 1975), serão de esperar variações sazonais que atingem valores máximos muito dependentes dos referidos parâmetros (Figura 10) mas com uma evolução semelhante ao longo do ano.

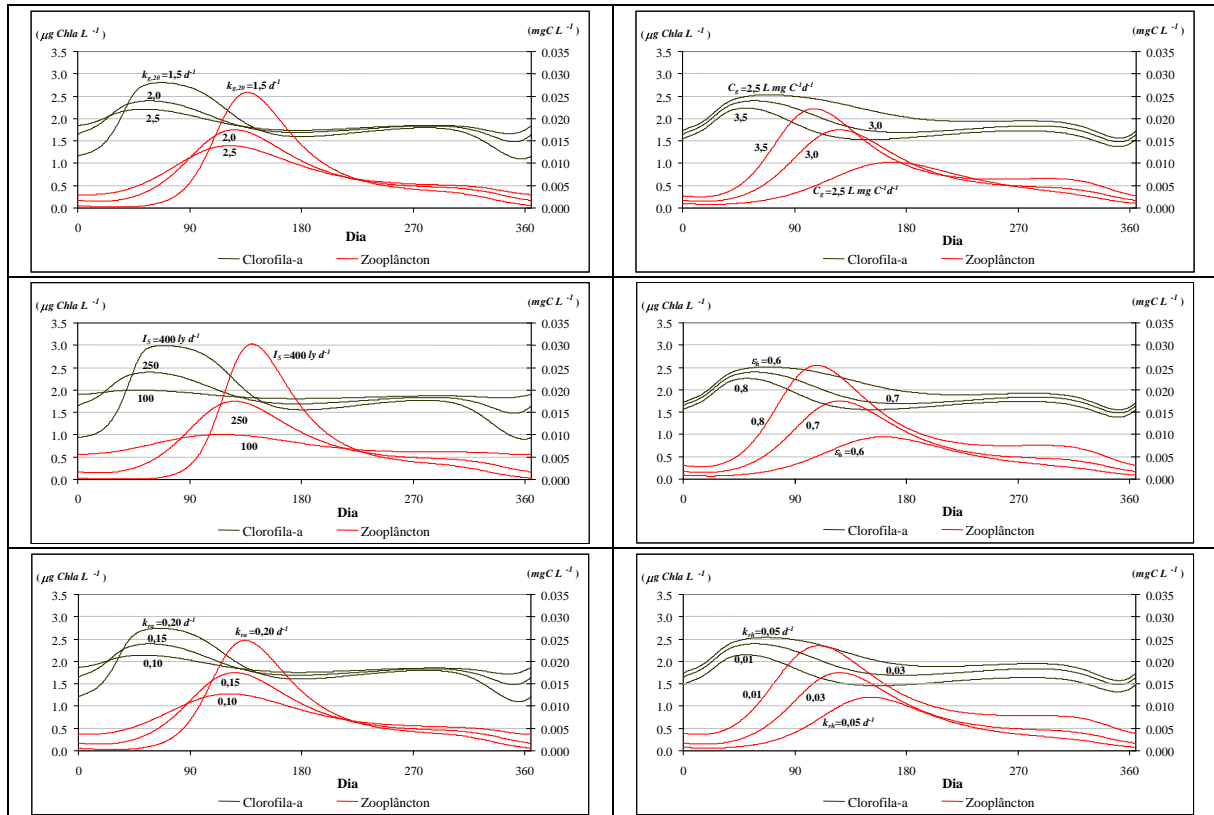


Figura 10 – Resultados obtidos para as concentrações de *clorofila-a* e zooplâncton herbívoro.

Finalmente para se ilustrar as potencialidades do modelo apresentado no estudo de um sistema com a complexidade da Ria de Arosa, apresentam-se os resultados de um conjunto de simulações com as quais se procura avaliar o impacto de diferentes condições de afluência de nutrientes à camada fótica na produção de zooplâncton herbívoro. De facto, embora uma parcela dos nutrientes resulte da remineralização da matéria orgânica (Alvarez-Salgado *et al*, 1996), uma parte significativa resulta dos episódios de afloramento costeiro induzido pelos ventos de Norte frequentes no Verão. Assim, é de esperar uma variabilidade inter-anual nas fontes de nutrientes na Ria de Arosa associada à variação das condições que influenciam o *upwelling* costeiro, com a conseqüente variação na produtividade do nível trófico superior (zooplâncton herbívoro). Consideraram-se os valores das fontes: Azoto - $0,4500 \mu\text{g N L}^{-1} \text{d}^{-1}$, Sílica - $0,3500 \mu\text{g Si L}^{-1} \text{d}^{-1}$ e Fósforo - $0,0625 \mu\text{g P L}^{-1} \text{d}^{-1}$, que conduzem a concentrações médias de clorofila-a e nutrientes próximos dos valores médios observados, e impuseram-se variações de $\pm 20\%$ aos valores anteriores. Na Figura 11 apresentam-se os resultados das concentrações de clorofila-a, zooplâncton herbívoro e nutrientes para os três valores distintos das fontes dos nutrientes considerados. Para os valores dos parâmetros adoptados no modelo da cadeia alimentar da Ria de Arosa, a variação dos valores das fontes de nutrientes apresentam uma influência muito acentuada na produção de zooplâncton herbívoro. No entanto, os resultados apresentados carecem de uma validação mais consistente baseada em medições das variáveis associadas aos dois níveis tróficos envolvidos no modelo apresentado.

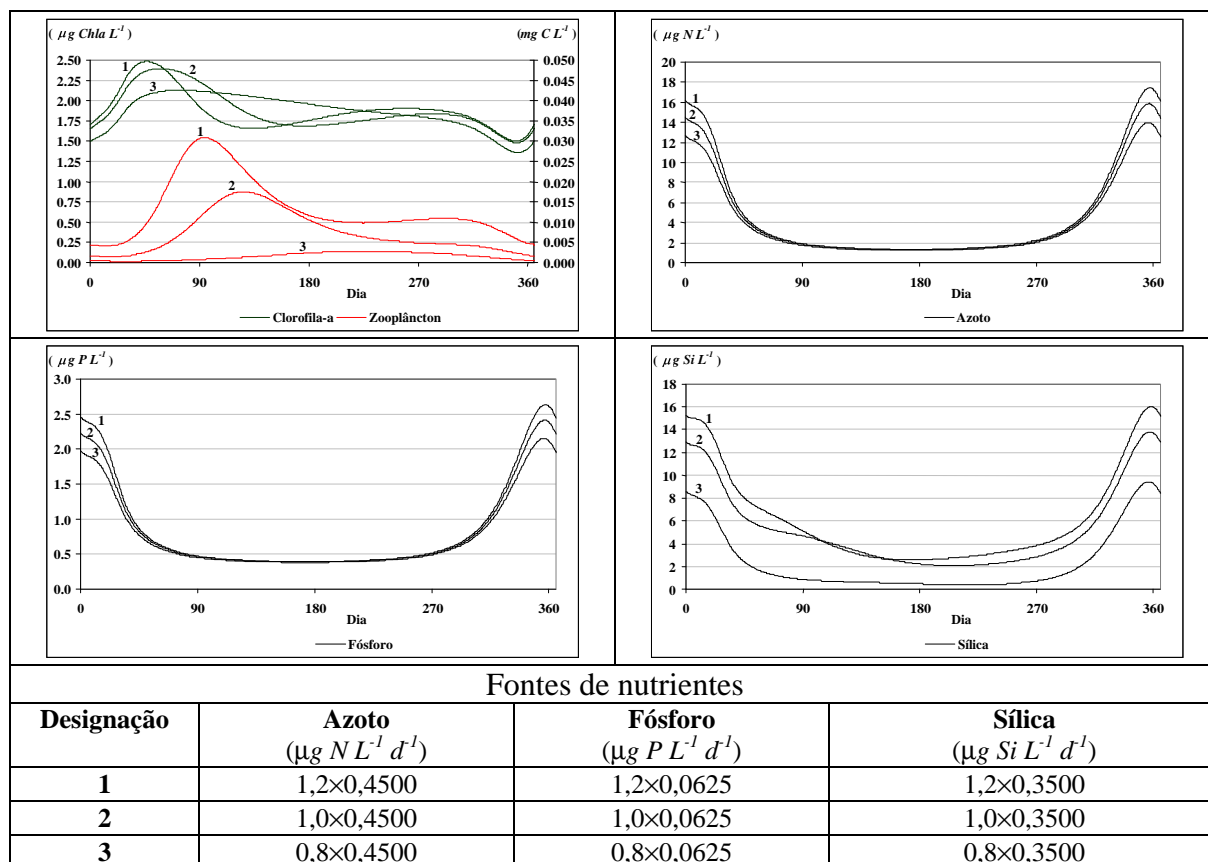


Figura 11 – Resultados das concentrações de clorofila-a, zooplâncton herbívoro e nutrientes para diferentes valores das fontes de nutrientes.

5. CONCLUSÃO

A aplicação do modelo criado para a Ria de Arosa permitiu proceder a uma caracterização da variação sazonal de produção primária neste sistema costeiro, evidenciando as principais características da sua evolução em termos de clorofila-a, nutrientes e zooplâncton herbívoro.

Salienta-se a enorme potencialidade de um modelo deste tipo como uma ferramenta auxiliar para uma análise prospectiva dos vários compartimentos da cadeia alimentar da ria, podendo, por exemplo, servir para a definição das épocas do ano em que deverão ser realizadas campanhas de amostragem, assim como avaliar as capacidades produtivas das actividades aquícolas em função da intensidade dos episódios de *upwelling* que se reflectem nos fluxos de nutrientes para a camada superficial.

REFERÊNCIAS

Abbott M. B. (1996) The sociotechnical dimension of hydroinformatics, In Hydroinformatics'96, Edited by Müller A., Vol 1, p. 3-18. A.A. Balkema. Rotterdam.

Alvarez-Salgado X. A., Figueiras F. G., Villarino M. L. e Pazos Y. (1998) Hydrodynamic and chemical conditions during onset of a red-tide assemblage in na estuarine upwelling ecosystem, Marine Biology, Springer-Verlag, 130, 509-519.

Alvarez-Salgado X. A., Rosón G., Pérez F. F., Figueiras F. G. e Pazos Y. (1996) Nitrogen cycling in na estuarine upwelling system, the Ría de Arousa (NW Spain). I. Short-time-scale patterns of hydrodynamic and biogeochemical circulation, *Marine Ecology Progress Series*, 135, 259-273.

CCCMM (1997) Informe Anual 1992-1997, Centro de Control da Calidade do Medio Mariño, CPMA-DXRM, Xunta de Galicia, Espanha.

Chapra S. C. (1997) *Surface Water-Quality Modeling*, McGraw-Hill Int. Edi.

Chau K. W. e Jin H. (1998) Eutrophication Model For a Coastal Bay in Hong Kong, *J. of Environmental Engineering, ASCE*, Vol. 124, 7, pp. 628-638.

Lalli C. M. e Parsons T. R. (1997) *Biological Oceanography An Introduction*, Second Edition. Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford.

Odum E. P. (1971) *Fundamentos de Ecologia*, 4º Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Pinho, J. L. S. (2001) *Aplicação de Modelação Matemática ao Estudo da Hidrodinâmica e da Qualidade da Água em Zonas Costeiras*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, Portugal.

Roman G. e Perez A. (1978) Estudio del mejillón y de su epifauna en los cultivos flotantes de la Ría de Arosa. I: Estudios Preliminares, *Bol. Inst. Esp. Oceanografía*, N° 266, 156-167.

Tenore K. R. e González N. (1975) Food chain patterns in the Ria de Arosa, Spain: an area of intense mussel aquaculture, 10th European Symposium on Marine Biology, Ostend, Belgium, Sept. 17-23, Vol. 2, pp. 601-619.

Thomann R. V. e Mueller J. A. (1987) *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper Collins, USA.

Yool A. (1997) *The Dynamics of Open-Ocean Plankton Ecosystem Models*. Tese de doutoramento, University of Warwick, England.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.