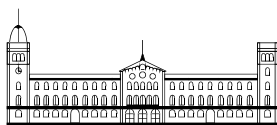




2007

***"SITUACIONS D'ANÒXIA EN ZONES ESTUÀRIQUES
SENSE FORÇAMENT MAREAL:
una aproximació als balanços producció/consum d'oxigen"***

Tesi doctoral
Xavier de Pedro Puente



TESI DOCTORAL

DEPARTAMENT D'ECOLOGIA –FACULTAT DE BIOLOGIA

UNIVERSITAT DE BARCELONA

Programa de Doctorat: Ecologia. Bienni: 1996-1998.

"SITUACIONS D'ANÒXIA EN ZONES ESTUÀRIQUES SENSE FORÇAMENT MAREAL: una aproximació als balanços producció/consum d'oxigen"

Memòria presentada per Xavier de Pedro Puente per optar al títol de doctor per la Universitat de Barcelona, sota la direcció del Dr. Javier Romero Martinengo i del Dr. Jordi Camp Sancho.

Dr. Javier Romero Martinengo
Departament d'Ecologia
Facultat de Biologia
Universitat de Barcelona

Dr. Jordi Camp Sancho
Institut de Ciències del Mar.
Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i
Ambientals, CMIMA-CSIC.
Barcelona

Xavier de Pedro Puente
Barcelona, 25 de setembre de 2007



**Capítol 4. Processos a la columna d'aigua que
es relacionen amb la dinàmica de l'oxigen
dissolt**

Capítol 4. Processos a la columna d'aigua que es relacionen amb la dinàmica de l'oxigen dissolt

Introducció general

En aquest capítol s'analitzen els principals processos que succeeixen a la columna d'aigua i que estan relacionats amb la dinàmica d'oxigen dissolt.

Per a la columna d'aigua, els canvis de concentració d'oxigen dissolt són el resultat de diversos processos que, en primera consideració i per espais curts de temps, podem considerar additius. Així doncs,

$$\text{CNP} = \text{PPB}_{\text{plc}} - \text{R}_{\text{plc}} + \text{FOD}_{\text{vent}} + \text{FOD}_{\text{hid}} \quad <4.1>$$

on CNP és el canvi net de concentració d'oxigen dissolt a l'aigua, PPB_{plc} la producció primària bruta planctònica, R_{plc} la respiració o consum d'oxigen a la columna d'aigua, FOD_{vent} el canvi de concentració o flux a causa de l'intercanvi difusiu d' O_2 entre aigua i aire, molt influït per l'acció del vent, i FOD_{hid} el canvi de concentració o flux d'oxigen a causa de l'hidrodinamisme (advecció i difusió turbulenta en conjunt). Els primers dos termes són de caire fonamentalment biològic, mentre que els dos últims són de caire purament físic, i tots ells tenen unitats de $\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$, equivalent a $\text{mg l}^{-1} \text{h}^{-1}$ i ppm h^{-1} . Cada terme té el seu signe en funció de si introdueix (+) o extreu (-) oxigen de l'aigua (PPB_{plc} sempre positiva, R_{plc} sempre negativa, i els altres dos termes depèn).

En el nostre treball s'han fet mesures de camp per estimar cada un dels termes de l'equació <4.1>, excepte PPB_{plc} que hem deduït dels altres:

$$\text{PPB}_{\text{plc}} = \text{CNP} + \text{R}_{\text{plc}} - \text{FOD}_{\text{vent}} - \text{FOD}_{\text{hid}} \quad <4.2>$$

En els següents apartats s'expliquen amb més detall:

- les mesures adreçades a estimar la producció i consum d'oxigen a la columna d'aigua en general per a tota la badia dels Alfacs (1^a part: "El plàncton"),
- les referents als processos purament físics, també per a tota la badia dels Alfacs, en general (2^a part: "Processos físics"), i
- les referents a la degradació de la matèria orgànica i el consum d'oxigen associat, tenint en compte la heterogeneïtat espacial de la badia (3^a part: "La degradació de la matèria orgànica").

Posteriorment es presentaran i discutiran els resultats generals que surten de combinar informació de les diferents parts, per tal de poder fer-los servir en el balanç global d'oxigen de l'ecosistema i entendre millor els aspectes relacionats amb la columna d'aigua que afecten la dinàmica d'oxigen dissolt de la badia.

4.1. El plàncton

4.1.1. Introducció

El metabolisme d'oxigen del plàncton és molt important per al balanç d'oxigen dissolt a l'aigua de mar dels ecosistemes aquàtics. La producció fitoplanctònica és una de les fonts d'oxigen dissolt principals en aigües marines (Jørgensen i Richardson 1996). La seva respiració pot ser notable també, generalment superior a la del bentos en sistemes marins costaners amb més de 5 m de fondària (Kemp *et al.* 1992), malgrat en alguns casos ha estat ignorada per als càlculs de balanços d'oxigen a nivell d'ecosistema (Camp *et al.* 1991, Hearn i Robson 2001).

El metabolisme d'oxigen planctònic pot ser estudiat a través de dues grans aproximacions, que comporten dues grans famílies de mètodes. D'una banda l'estratègia reduccionista, a nivell quasi fisiològic, que comporta mètodes directes d'anàlisi; d'altra, l'estratègia d'estudi a nivell d'ecosistema, de caire més holista, i que es fonamenta sobre tot en mètodes indirectes.

Les estimacions directes més emprades són les basades en mesures de metabolisme d'O₂ i CO₂ en ampolles d'incubació clares i fosques (Bender *et al.* 1987), i mesures que fan servir l'isòtop radioactiu ¹⁴C (Steehan-Nielsen 1952, Peterson 1980, Harding *et al.* 1982a, Côté i Platt 1983). També s'han emprat ocasionalment els isòtops estables ¹⁸O (Grande *et al.* 1991), ¹³C (Slawyk *et al.* 1984) i la metodologia de la fluorescència modulada per amplitud de polsos o "PAM-Fluorometry" (Geel 1997). A la badia dels Alfacs, Delgado (1986) va estimar la producció fotosintètica pel mètode del ¹⁴C, fent incubacions de 2 h.

A les aproximacions indirectes (Odum 1956, Welch 1968, Boynton *et al.* 1996, Falck i Gade 1999) s'estima la resultant neta de canvi d'oxigen o de carboni a l'aigua, i després s'analitzen o estimen tots els processos importants que intervenen en els canvis de concentració d'oxigen de la columna d'aigua, per tal d'aïllar el component atribuïble estrictament al fitoplàncton. Val a dir que en sistemes somers, l'intercanvi d'oxigen amb l'atmosfera és, potencialment, un dels processos més importants que hi poden actuar, en la mateixa manera o fins i tot més que el que s'ha descrit per a mar obert (Jørgensen i Richardson 1996). Aquesta aproximació a la producció fotosintètica planctònica a partir de mètodes indirectes permet concentrar l'atenció no tant en els processos aïllats en si relacionats amb la fotosíntesi, de vegades altament variable (e.g. Harding *et al.* 1982b), sinó en el metabolisme d'oxigen del fitoplàncton de forma integrada a nivell de comunitat o ecosistema (Falck 1999). Aquesta aproximació indirecta ha estat l'emprada en el marc de la present tesi.

Així, l'objectiu de la primera secció d'aquest capítol és mostrar els resultats de canvi d'oxigen dissolt a la columna d'aigua (variació entre mínim i màxim), de concentració de clorofil·la a, de la productivitat del fitoplàncton (producció respecte concentració de pigment), i de consum d'oxigen en condicions ambientals controlades. Aquesta informació serà combinada a la secció de resultats generals del

capítol amb les estimacions sobre les magnituds dels processos físics que hi intervenen a la columna d'aigua (2a part), per tal d'estimar la producció neta del plàncton i poder-la fer servir al balanç global d'oxigen de la badia (Capítol 6).

4.1.2. Metodologia

Treball de camp i de laboratori

Els canvis diaris de concentració d'oxigen dissolt de la columna d'aigua es van mesurar en algunes de les estacions *Boca*, *Mig* i *Cua* (Figura 1.2, Figura 1.5), un total de 5 vegades durant els anys 1996 i 1997 en diversos moments del cicle estacional (Taula 4.1). Es van agafar dades de concentració d'oxigen al llarg de perfils verticals (amb un oxímetre WTW model oxi196 acoblat amb un sensor polarogràfic de membrana), efectuant també perfils de salinitat i temperatura (amb un salinòmetre WTW). Es va utilitzar aquí només la mitjana de les concentracions d'oxigen de la capa superficial (dades de 0 a 3 m del perfil de mesura), sense tenir en compte els valors de la capa fonda (per sota de la pycnoclina), atès que els seus valors de concentració d'oxigen estan influïts en major o menor mesura per l'activitat metabòlica de les comunitats bentòniques. Les mesures es van fer cada vegada en tres moments diferents: a mitja tarda, tot just després de la sortida del sol del dia següent, i entre 3 i 10 hores després, la majoria de vegades al capvespre. Aquests moments extrems corresponen de forma aproximada al màxim, mínim i màxim successius de concentració, respectivament.

Per a les mesures de concentració de clorofil·la a i de demanda bioquímica d'oxigen, es van recollir dues mostres de 8 l d'aigua a cadascuna de les tres estacions de mostreig habituals, una per sota i una altre per sobre de la pycnoclina, en un total de 10 ocasions entre juliol de 1997 i setembre de 1998. L'aigua es va agafar amb ampolles Niskin i es va transportar fins a terra en garrafes d'aigua prèviament rentades amb aigua de la mateixa procedència. Per determinar la concentració de clorofil·la a (Cla) es va filtrar un volum conegut d'aigua (entre 100 i 500 ml) i es va guardar en total fosc el filtre congelat (filtres de microfibra de vidre Whatman GF/F, 25mm Ø, a -20 °C) fins a la seva posterior anàlisi als laboratoris de l'Institut de Ciències del Mar del *Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i Ambientals, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, (ICM, CMIMA-CSIC). Per determinar la concentració en pigments es van aplicar 6 ml d'acetona al 90 % al filtre congelat, es van conservar a 4 °C entre 6 i 10 hores en fosc i es van centrifugar durant 15 minuts (Yentsch i Menzel 1963), per mesurar la fluorescència del líquid resultant del procés (fluoròmetre marca Turner Designs, 10-AU-450, Filtre d'excitació a 340-500 nm - pas de banda rodó 5-60 -, Filtre d'emissió >665 nm - tall esmolat rodó 2-64).

El consum d'oxigen de la columna d'aigua es va estimar a través d'incubacions de demanda bioquímica d'oxigen en cinc dies (DBO₅) amb aigua de la mateixa procedència que les mostres anteriors. Val a dir que la mesura de la DBO₅ no és una estima de respiració del plàncton en si mateixa, sinó del consum d'oxigen que es pot donar en un volum d'aigua en aïllar-lo de la resta en fosc, i per tant, inclou la respiració de la comunitat planctònica i d'altres termes, com l'oxidació

d'altres partícules del sèston. Es discuteixen més endavant les limitacions de l'ús de la DBO_5 per estimar la respiració.

Les DBO_5 es van realitzar a dues temperatures controlades (15 i 25°C, aprox.). La concentració d'oxigen inicial és va mesurar a cada ampolla d'incubació immediatament després d'haver introduït la mostra d'aigua, amb un oxímetre WTW model oxi196. La concentració final es va determinar de la mateixa manera en acabar-se el període d'incubació. Les ampolles eren de vidre de coll i tap esmerilat, de 330 ml i van ser embolicades amb paper d'alumini per tal de mantenir-les en fosc.

Tractament de les dades

Per a les estimes relacionades amb els canvis diaris de concentració d'oxigen es va considerar el cicle diari dividit en dues parts: la diürna (entre mínim d'un dia i màxim del mateix dia) i la nocturna (entre màxim d'un dia i mínim de la matinada següent), i per a cadascuna d'elles es va calcular el canvi net d'oxigen.

La demanda d'oxigen de la columna d'aigua, que va ser emprada com a la respiració de la comunitat planctònica (R_{plc}), va ser estimada a la temperatura de camp (t_{camp}) a partir de les DBO_5 mesurades, interpolant entre les dues temperatures experimentals (t_1 i t_2) (Jørgensen i Sørensen 1985):

$$DBO_5(t_{camp}) = DBO_5(t_2) e^{\left[\frac{\ln\left(\frac{DBO_5(t_1)}{DBO_5(t_2)}\right)(t_2 - t_{camp})}{(t_2 - t_1)} \right]} \quad <4.3>$$

essent $t_1 < t_{camp} < t_2$.

4.1.3. Resultats

Canvis nets observats

La concentració d'oxigen a la capa superficial durant els dies de mostreig es va mantenir entre els 7 i els 9 mg l⁻¹ (90 i 130% de saturació, aproximadament), excepte en setembre de 1997 quan es van mesurar valors inferiors als 6 mg l⁻¹ (Taula 4.1; inferior a 80% de saturació). Els increments observats durant el dia van oscil·lar entre els 0.5 i els 1.1 mg l⁻¹ al llarg de 3 a 10 hores, el que va donar uns canvis nets d'entre 0.050 i 0.225 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹. Les concentracions de clorofil·la es van trobar entre 2 i 6 mg m⁻³ en la majoria de casos, si bé tendien a estar en la part baixa del rang. El canvi net d'oxigen dissolt observat a la nit (per tant, decrement) a la badia dels Alfacs va ser d'entre 0.006 i 0.067 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹ (valors mitjans en Taula 4.2)

Taula 4.1 Canvi diari de concentració d'oxigen dissolt (OD). Es mostren els OD inicial i final (OD_i i OD_f, respectivament), l'increment d'OD (ΔOD), l'interval de temps considerat (t), el canvi net planctònic (CNP), la concentració de la clorofil·la a (Cl.a), i la productivitat bruta del plàncton (PB_m^{Cl.a}) del període estudiat.**

	Data	OD _i	OD _f	ΔOD	t	CNP	Cl.a	PB _m ^{Cl.a} *
		mg O ₂ l ⁻¹			h	mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹	mg m ⁻³	mgO ₂ mgCl.a ⁻¹ h ⁻¹
Boca	07-03-97	8.3	8.8	0.5	7.5	0.067	2.96	22.6
	25-04-97	8.3	9.4	1.1	9	0.122	3.71	32.9
	10-06-97	7.8	8.3	0.5	7.5	0.067	2.61	25.7
	08-07-97	8.1	8.0	-0.1	5.5	-	2.25	
Mig	07-03-97	8.8	9.3	0.5	8	0.062	2.98	20.8
	25-04-97	8.4	9.4	1.0	10	0.100	2.34	42.7
	10-06-97	8.2	8.6	0.4	8	0.050	2.2	22.7
	08-07-97	7.8	7.3	-0.5	8	-	2.29	
	17-09-97	7.1	7.7	0.6	3	0.200	5.23	38.2
Cua	18-09-96	6.4	6.9	0.5	6	0.083	2.0	41.5
	07-03-97	8.5	9.6	1.1	7.2	0.153	5.04	30.4
	25-04-97	8.1	8.8	0.7	9	0.077	2.98	25.8
	17-09-97	5.6	6.5	0.9	4	0.225	6.4	35.2

Suposant que el fitoplàncton és l'únic responsable del canvi d'oxigen observat *in situ*, és a dir, que FOD_{hid} i FOD_{vent} siguin menyspreables respecte la producció del plàncton.

Taula 4.2 Decrement d'oxigen dissolt (mg O₂ l⁻¹ h⁻¹) mitjà entre la concentració de mitja tarda i la de la matinada del dia següent de totes les dades disponibles per a cada compartiment. Dades procedents del període entre 09/96 i 09/97.

Estació	mitjana	error est.	n
	(mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹)		
Boca sup.	0.014	±0.008	5
Mig sup.	0.020	±0.011	6
Cua sup.	0.032	±0.032	5
Alfacs sup.	0.022	±0.010	16

Consum d'oxigen

Les estimes de DBO₅ de les incubacions al llarg de tot el període de mostreig, corregides per la temperatura de camp, van ser d'entre 0.7 i 4 mg O₂ l⁻¹ (5 d)⁻¹ (Figura 4.1), que en terme mig equival a entre 0.0058 i 0.0333 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹, manifestant en general major variància entre els diferents períodes que entre els diferents punts de mostreig.

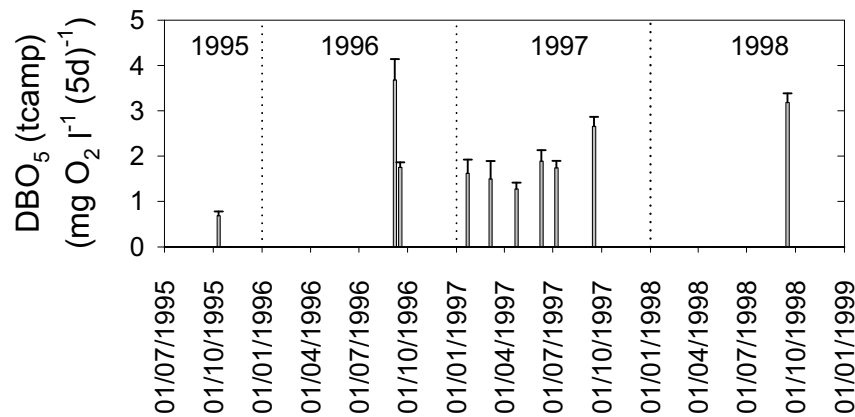


Figura 4.1. Evolució de la demanda bioquímica d'oxigen en cinc dies (DBO₅) mitjana de la badia dels Alfacs, expressada per la temperatura de camp. Les barres d'error corresponen als errors estàndard de les estacions de mostreig de cada incubació (n entre 8 i 10).

En els quatre experiments agafats com a representatius de les estacions climatològiques, la demanda d'oxigen de la columna d'aigua van ser de l'ordre de $1 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} (5 \text{ d})^{-1}$ a $15 \text{ }^\circ\text{C}$, i quasi el doble a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, assolint un consum màxim de $2.4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} (5 \text{ d})^{-1}$ a setembre de 1997 (Taula 4.3). Les estimes de la demanda *in situ* (a la temperatura de camp), van oscil·lar entre 0.010 i $0.023 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Taula 4.3 Càlcul de la demanda d'oxigen de la columna d'aigua, per estimar l'ordre de magnitud de la respiració del plàncton (R_{plc}), a partir de mesures de demanda bioquímica d'oxigen en 5 dies (DBO₅), suposant consum constant. Es mostra la temperatura de les dues incubacions i la de camp (t_1 , t_2 , t_{camp} , respectivament), i les seves DBO₅ respectives (DBO₅ t_1 , DBO₅ t_2 , DBO₅ t_c).

Estació	Data	t_1	t_2	t_{camp}	DBO ₅ t_1	DBO ₅ t_2	DBO ₅ t_c	R_{plc}
		°C			mg O ₂ l ⁻¹ 5d ⁻¹			mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹
hivern	06/03/97	15,0	25,0	15,40	1,389	2,361	1,419	0,0118
primav.	24/04/97	15,0	25,0	17,29	1,017	1,967	1,182	0,0099
estiu	10/06/97	12,0	25,0	24,51	1,007	1,956	1,908	0,0159
tardor	17/09/97 ¹	16,0	23,5	25,23	1,400	2,400	2,718	0.0227

¹ Totes les dades corresponen a mitjanes de totes les estacions de mostreig de les quals es té dada de la capa superficial per a la data en qüestió, excepte la del 17/09/97, atès que per al càlcul de l'efecte del vent hem exclòs de la mitjana els valors de les estacions boca i mig, ja que momentàniament es trobaven a 100% de saturació d'oxigen i això provocaria estimes nul·les de FOD_{vent} , quan generalment l'aigua es troba sota saturació d'oxigen en aquesta època a causa de les hipòxies de la capa inferior.

4.2. Processos físics

4.2.1. Introducció

Els principals processos físics que afecten la distribució d'oxigen dissolt a l'aigua en ecosistemes marins són advecció horitzontal i vertical, barreja pel vent, difusió turbulenta, i convecció-intercanvi (Svendsen 1997). A les àrees costaneres, l'entrada d'oxigen per processos físics a les aigües superficials és controlada fonamentalment per advecció i intercanvi de masses d'aigua en els eixos vertical i horitzontal (Hagy *et al.* 2000), i per l'intercanvi gasós entre l'aigua i l'aire. L'advecció i l'intercanvi d'aigua verticals estan molt influïts per l'acció del vent. L'advecció i l'intercanvi d'aigua horitzontals estan influïts per les mareas (astronòmiques i baromètriques), les ones estacionàries, l'acció del vent i les corrents (Capítol 1, plana 15 i ss.). L'intercanvi gasós és influït per la velocitat del vent (en qualsevol direcció), la concentració del gas a l'aigua a la superfície, la salinitat i la temperatura.

Per al cas concret de la badia dels Alfacs, ens hem centrat en tots ells menys en l'intercanvi horitzontal, per no ser considerat important en les aproximacions clàssiques de models de caixes per estimar els fluxos advectionals i no advectionals (Officer 1980).

4.2.2. Metodologia

S'ha estimat l'entrada d'oxigen per hidrodinamisme ($M L^{-3} T^{-1}$) a través d'un model de caixes en estat estacionari (Capítol 1, plana 25), que permetia estimar els fluxos advectionals (termes F) i no advectionals (resultant de la suma dels dos termes E entre el mateix parell de compartiments) del patró de circulació entre les caixes (Figura 1.5a). Així, es va multiplicar la suma del flux advectional i no advectional ($L^3 T^{-1}$) d'aigua d'una caixa (estació de mostreig) cap a la següent, per la concentració d'oxigen dissolt ($M L^{-3}$) de la caixa inicial, i dividit pel volum d'aigua de la caixa final (L^3). De forma anàloga s'ha estimat la sortida d'oxigen per hidrodinamisme de cada caixa, i per tant, les resultants netes de flux d'oxigen a causa de l'hidrodinamisme en cada caixa, tenint en compte els fluxos de i a totes les caixes adjacents i a l'hora, els termes advectionals i no advectionals en el mateix terme (FOD_{hid} , en $mg l^{-1} h^{-1}$).

El flux d'oxigen a través de la interfase aire-aigua (FOD_{vent}) ha estat calculat a partir de:

$$FOD_{vent} = k(C_a - C_w) \quad <4.4>$$

on k ($m s^{-1}$) és el coeficient de transferència d'oxigen, C_a ($g m^{-3}$) és la concentració d' O_2 dissolt a l'aigua a 100% de saturació amb l'aire i C_w ($g m^{-3}$) és la concentració d'oxigen dissolt de la capa límit entre l'aire i l'aigua (presa com la concentració que hi ha al compartiment barrejat). El terme FOD_{vent} pot ser positiu (l'oxigen entra a l'aigua) o negatiu (surta de l'aigua), té unitats de $M L^{-2} T^{-1}$ ($g O_2 m^{-2} s^{-1}$), i posteriorment és expressat en $mg O_2 l^{-1} h^{-1}$ en multiplicar-lo per l'àrea superficial de la caixa i dividir-lo pel seu volum, per tal de poder afegir aquest terme al balanç global. Stigebrandt 1991, i Woolf i

Thorpe (1991) van proposar una modificació de la fórmula per incloure un terme extra relacionat amb la entrada d'oxigen a l'aigua a través de la formació de bombolles per acció de les onades, però es va descartar aplicar aquesta variant ja que en la badia dels Alfacs el flux principal és de sortida d'oxigen i no d'entrada, i els resultats, a més, no semblen diferir gaire dels de la fórmula no modificada (Falck i Gade 1999).

La concentració d'oxigen dissolt en aigua en equilibri teòric amb l'aire es pot calcular com (UNESCO 1973):

$$C_a = \frac{32}{22.4} e^{\left\{ -173.4292 + 249.6339 \left(\frac{100}{T_K} \right) + 143.3483 \ln \left(\frac{T_K}{100} \right) - 21.8492 \frac{T_K}{100} + S \left[-0.033096 + 0.014259 \frac{T_K}{100} - 0.0017 \left(\frac{T_K}{100} \right)^2 \right] \right\}} \quad <4.5>$$

on S és la salinitat (psu) de l'aigua junt a l'interfase aigua-aire, T_K és la temperatura absoluta de l'aigua (en Kelvin).

Alguns treballs han emprat com a coeficient de transferència d'oxigen (k) un valor empíric (Inoue 1974, Munekage 1992, Kemp i Boynton 1980, Nixon *et al.* 1986, Camp *et al.* 1991, Kemp *et al.* 1992, Pastres *et al.* 1997), malgrat darrerament ja són més freqüents les fórmules de càlcul que el consideren proporcional a la velocitat del vent (D'Avanzo *et al.* 1996, Olesen *et al.* 1999), a la velocitat del vent i la temperatura (Liss i Merlivat 1986, Norro i Frankignoulle 1996, Falck i Gade 1999), a la velocitat del vent, la temperatura i la salinitat (Hamilton i Herzfeld 2001), o proporcional a una funció combinada del vent i de la velocitat mareal (Lee *et al.* 1991, a partir de la fórmula de O'Connor-Banks, Thomann i Mueller 1987). El mètode més estès de càlcul de k ha estat el de Liss i Merlivat (1986), però va ser discutit posteriorment per Tans *et al.* (1990) i Wanninkhof (1992), i en el seu lloc aquest darrer autor va proposar la següent formulació:

$$k = 0.31u^2 \left[\frac{Sc}{660} \right]^{-0.5} \quad <4.6>$$

on k aquí es troba en cm h^{-1} , u és la velocitat del vent (m s^{-1}) a l'alçada de 10 m de l'anemòmetre de les estacions meteorològiques, i Sc correspon al *Número de Schmidt*, una mesura de la relació entre la viscositat cinemàtica de l'aigua i la difusivitat molecular del gas a l'aigua. En alguns treballs s'ha calculat Sc com a funció només de la temperatura (Stigebrandt 1991), però aquí s'ha fet servir la funció dependent de la salinitat i temperatura (Hamilton i Herzfeld 2001):

$$Sc = \left(0.9 + \frac{0.1S}{35} \right) (1953.4 - 128.0T + 3.9918T^2 - 0.050091T^3) \quad <4.7>$$

on S és salinitat (psu), i T és temperatura en graus Celsius.

La fórmula de Wanninkhof (1992), que ha estat l'emprat aquí, ha donat estimes de FOD_{vent} superiors a les basades en el model de Liss i Merlivat (1986) en estudis comparatius fets a mar obert (Falck i Gade 1999, Jähne 2001). Marino i Howarth (1993) van constatar experimentalment que FOD_{vent} era particularment pronunciat a estuaris i llacs, que era molt menys influenciat pel vent a mar obert, i van

suggerir que la turbulència superficial en les zones amb més fondària pot trobar-se desacoblada del vent de forma temporal i espacial. Per aquesta raó, aquí s'ha fet servir el mètode de Wanninkhof (1992), ja que la badia dels Alfacs és un sistema estuarià costaner, previsiblement molt influenciat per l'acció de vents recurrents que hi actuen i, a més, per ser el mètode emprat en altres estudis recents tant de sistemes aquàtics costaners (Hamilton i Herzfeld 2001) com fins i tot de mar obert (Skjelvan *et al.* 2001).

Els càlculs per obtenir FOD_{hid} i FOD_{vent} es van fer a partir de mostrejos considerats com a representatius de cada estació climatològica (1 per cadascuna), d'entre els quals es disposava de valors de camp de totes les variables implicades.

4.2.3. Resultats

Les estimes de l'efecte del moviment de l'aigua sobre la concentració d'oxigen (FOD_{hid}) van oscil·lar entre $-0.001 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ i $+0.070 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Són valors molt baixos, que cal recordar que corresponen només a la capa superficial, molt influïda per l'advecció horitzontal i per les condicions habitualment properes a la normòxia de la capa superficial en contacte amb l'atmosfera. Aquest valor d'entrada ($+0.070 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$) a la capa superficial es va observar el mes de juny de 1997, en que es va donar la gran producció fotosintètica estival al compartiment inferior a causa de l'activitat de les macroalgues bentòniques. Es presenta un resum de dades de la influència de l'hidrodinamisme a la Taula 4.4, per a les dates més representatives de l'evolució anual d'entre totes les que es disposa en que, a més, es tenen mesures de les altres variables que afecten a l'oxigen de la columna d'aigua.

Taula 4.4 Velocitats de canvi parcials de concentració d'oxigen dissolt a la columna d'aigua en la capa superficial: es mostra l'oxigen dissolt (OD), el canvi net planctònic (CNP), el flux per l'aireig del vent (FOD_{vent}), i el flux per hidrodinamisme (FOD_{hid}).

Estació	Data	OD	CNP ¹	FOD_{vent}	FOD_{hid}
		%			
Hivern	07/03/97	109	0.094	-0.132	-0.001
Primav.	25/04/97	114	0.100	-0.102	+0.001
Estiu	10/06/97	122	0.059	-0.113	+0.070
Tardor	17/09/97 ⁶	91	0.225	+0.091	-0.018

¹ Canvi d'oxigen observat a la columna d'aigua tenint en compte l'oxigen produït pel plàncton i l'oxigen intercanviat amb l'aire i amb els altres compartiments d'aigua del model de caixes.

El flux per aireig del vent (FOD_{vent} , Taula 4.5) va donar uns valors entre $+0.091 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ i $-0.167 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$. El màxim FOD_{vent} va correspondre al setembre de 1997, en que l'oxigen es trobava per sota de la saturació (91%) i la velocitat mitjana del vent va ser de 3.0 m s^{-1} durant les 4 h de mesura. El mínim FOD_{vent} (màxim flux de sortida) es va estimar el març de 1997, quan l'oxigen es trobava a 112% i el vent a 3.7 m s^{-1} de mitjana durant el període considerat. Val a dir que aquestes mesures de

FOD_{vent} van representar un ordre de magnitud similar al del canvi net d'oxigen de la columna d'aigua o canvi net planctònic (CNP, equació <4.1>, Taula 4.4).

Taula 4.5 Càlcul del flux d'oxigen provocat per l'aireig del vent, FDO_{vent} (segons Wanninkhof 1992). V.v.: velocitat del vent a 10 m d'altura (estàndard de les estacions meteorològiques). i.t.: interval de temps. Sc: Número de Schmidt. K: coeficient de transferència de l'oxigen dissolt.

Data	Sal psu	T °C	O.D. _{tpc} %	O.D. mg O ₂ l ⁻¹	dèficit ¹	V.v. m s ⁻¹	i.t. h	Sc	K m s ⁻¹	FOD _{vent} mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹
18/09/96	31,8	21,3	90	6,7	0,7	1,57	5,7	549	0,0222	0,026
07/03/97	35,1	15,0	105	8,6	-0,4	3,69	7,3	763	0,1040	-0,067
07/03/97	34,8	15,5	112	9,1	-1,0	3,69	7,3	741	0,1055	-0,167
07/03/97	34,8	15,3	111	9,1	-0,9	3,69	7,9	752	0,1048	-0,163
25/04/97	35,5	17,6	115	8,9	-1,1	2,65	9,3	667	0,0574	-0,103
25/04/97	35,0	19,1	112	8,5	-0,9	2,65	9,1	617	0,0596	-0,089
25/04/97	35,1	17,7	115	8,9	-1,2	2,65	9,8	661	0,0576	-0,113
10/06/97	34,8	24,5	119	8,1	-1,3	2,21	11,6	477	0,0472	-0,095
10/06/97	35,1	24,7	124	8,5	-1,6	2,21	11,8	474	0,0473	-0,130
17/09/97	36,5	25,3	91	6,1	0,6	3,00	4,2	461	0,0884	0,091
17/09/97	35,5	24,3	108	7,4	-0,6	3,00	3,2	483	0,0864	-0,081

Les dades de salinitat, temperatura, oxigen i velocitat del vent corresponen a mitjanes entre els dos moments de mesura de tot el compartiment superficial en qüestió.

¹ El dèficit d'oxigen s'ha calculat respecte la concentració en mg l⁻¹ corresponent a 100% de saturació amb l'aire.

4.3. La degradació de la matèria orgànica

4.3.1. Introducció

El carboni orgànic a l'aigua de mar apareix en formes dissoltes (carboni orgànic dissolt, COD) i en formes particulades vives o mortes (carboni orgànic particulat, COP). Les concentracions de matèria orgànica dissolta a l'aigua de mar són molt superiors a les de COP: sol haver-hi generalment la relació 100:10:2 entre COD, COP mort i COP viu (Parsons 1963). El COD inclou tota mena de compostos, anant des dels més làbils als més refractaris que perduren llarg temps en dissolució. El COP, per la seva banda, sol estar compostat entre un 40 i un 99% per detritus més els seus fongs i bacteris associats, i, en menor mesura, per fitoplàncton, zooplàncton i bacteris lliures, per ordre d'importància (Valiela 1995).

Aquest marc general pot variar en funció de circumstàncies específiques. Seria d'esperar que la badia dels Alfacs rebés grans quantitats de COP viu i mort, influenciada pels aportos de matèria orgànica dels arrossars i llacunes costaneres, que en arribar a condicions de major salinitat, es convertís en COP mort i COD a causa dels processos de descomposició. Aquest tram del cicle del carboni, en que passa de ser constituent des de formes vives en aigües salobres, fins a formes mortes particulades i dissoltes, és molt rellevant en la dinàmica d'oxigen dissolt de la columna d'aigua en els mesos amb menor renovació de les masses d'aigua, que solen ser a l'hora els de major risc d'anòxies. Així, és necessari quantificar cadascuna d'aquestes fraccions de carboni, i identificar el grau responsabilitat que tenen en la demanda d'oxigen de la columna d'aigua.

Per tant, l'objectiu d'aquesta tercera part és presentar unes primeres estimes de canvis en la concentració del carboni orgànic dissolt i particulat en relació a la demanada bioquímica d'oxigen, així com estimar també en quina mesura el COP correspon a poblacions fitoplanctòniques en procés de descomposició.

4.3.2. Metodologia

Per a les mesures de concentració de carboni dissolt i particulat es van fer servir mostres de les tres estacions de mostreig habituals, una per sota i una altre per sobre de la picnoclina. L'aigua es va agafar amb ampolles Niskin i es va transportar fins a terra en garrafes d'aigua prèviament rentades amb aigua de la mateixa procedència. Es van filtrar de 70 a 300 ml d'aigua de mostra amb discs de fibra de vidre (Whatmann - GF/F de 0.45 μm com a mida mitjana de forat de pas) de 22 mm de diàmetre muflats prèviament durant 1 h a 400 °C per eliminar-ne qualsevol carboni orgànic. La fracció de COP es va quantificar a partir del residu recollit al filtre i la fracció de COD, a partir de l'aigua filtrada.

Els filtres per a anàlisi de COP van ser transportats al laboratori, cadascun en un recipient estil "càpsula de Petri" de plàstic amb tapa, prèviament rentada amb àcid clorhídric diluït, i van ser mantinguts en fred fins el pas següent. Per descalcificar les mostres, els filtres eren col·locats sobre un suport foradat a mitja alçada dins una campana de vidre on s'havia introduït àcid clorhídric concentrat i mantinguts 12 h en aquesta atmosfera àcida. Posteriorment, es va canviar l'àcid clorhídric per lleties d'hidròxid sòdic, per tal de neutralitzar els possibles restes d'àcid, i es va deixar de nou tapat durant un mínim d'un dia o fins que els filtres del seu interior estiguessin completament secs. Després, els filtres es van embolicar en discos de 20 mm de diàmetre de làmina d'estany junt amb una petita quantitat de pentòxid de Vanadi (V_2O_5) com a catalitzador per a ajudar a la combustió de la matèria orgànica. La quantitat de carboni total va ser determinada amb un autoanàlitzador elemental Carlo Erba Instruments NA2100 Protein, en els Serveis Científic-Tècnics de la Universitat de Barcelona.

Per l'anàlisi de COD es van fer servir recipients de vidre de 33 ml amb taps de plàstic que van ser rentats amb àcid clorhídric diluït primer i amb aigua destil·lada després. Llavors es va muflar els pots durant 1 h a 400 °C, se'ls va embolicar la boca amb paper d'alumini i es van guardar dins contenidors de plàstic hermètics fins a fer-se servir. La introducció de la mostra al pot de vidre es va fer amb l'ajut d'una xeringa de plàstic de 100 ml, prèviament esbandida amb aigua de mostra, a través d'un suport de plàstic que contenia el filtre GF/F 25 mm-0.45 μm de mitjana d'equivalent de forat de pas. Un cop ple es va tapar amb l'ajut d'un quadrat de parafilm prenent cura de que no quedés cap bombolla dins el recipient, i per últim es va col·locar el tap de plàstic per assegurar-ne l'estanqueïtat. Les mostres van ser mantingudes i transportades en fred fins a ser analitzades. L'anàlisi de COD es va realitzar a través del mètode EPA 9060A. Es va acidificar el medi amb àcid clorhídric i bombollejant aire sense carboni per a extreure tot el carboni inorgànic en forma de $\text{CO}_2(\text{g})$. El carboni restant (que estrictament s'anomena "carboni orgànic no purgable") va ser assimilat al carboni orgànic dissolt (COD) i determinat amb un analitzador de carboni orgànic total SHIMADZU TOC5000 als Serveis Científic-Tècnics de la Universitat de Barcelona.

Per tal d'avaluar la relació entre el consum d'oxigen i les concentracions de COP i COD, es van realitzar incubacions en ampolles per determinar la demanda bioquímica d'oxigen en cinc dies (DBO_5) d'aigües de diverses procedències (sis punts de mostreig: capa superficial i fonda de les estacions *Boca*, *Mig* i *Cua*) de les quals es coneixia la concentració inicial de COP i COD. Els experiments es van realitzar amb aigua de mar recollida el 22 de gener de 1997 i el 17 de setembre de 1998, en ambdós casos en incubacions a 15 °C. Les concentracions finals de les dues fraccions de carboni es van mesurar amb el mateix procediment ja descrit però sobre l'aigua de les ampolles de DBO_5 un cop acabada la incubació. La hipòtesi de partida és que la respiració biològica consumeix COP i COD, i per aquesta raó, hauria d'haver una correlació entre la demanda bioquímica d'oxigen i el decrement de les fraccions de carboni. Així, s'ha calculat el consum d'oxigen estimat lligat a consum de COP i COD, transformant aquest a $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$, a partir de prendre la relació estequiomètrica entre C:O com a 1:1 molar.

Per estimar la relació entre les concentracions mesurades de clorofil·la a i la de carboni orgànic particulat es van emprar, a més de les dades corresponents als experiments anteriors, fins a 81 parells de mostres de 8 campanyes de mostreig entre 1996 i 1997, amb dades transformades en logaritmes per evitar el pes excessiu de pocs valors extrems de la sèrie sobre la regressió lineal.

Per intentar deduir si aquest fitoplàncton era fotosintèticament actiu, es va calcular la correlació entre la concentració de clorofil·la a i la d'oxigen dissolt, que hauria de sortir en tot cas positiva i significativa estadísticament.

4.3.3. Resultats

Fraccions de carboni i relació amb la DBO

El carboni orgànic de la columna d'aigua es va trobar entre el 57 i el 85 % en forma dissolta (de mitjana per a gener i setembre, respectivament), essent la resta carboni particulat (Taula 4.6).

Les incubacions d'aigua en ampolles tancades durant 5 dies van comportar consum de carboni orgànic dissolt i particulat (Figura 4.2), llevat d'uns pocs casos aïllats en què, probablement a causa d'errors experimentals o de determinació, les concentracions de carboni al final de l'experiment van ser superiors a les del principi.

Els resultats mostren que en general la DBO va estar efectivament relacionada amb el consum de carboni orgànic, tant dissolt com particulat en conjunt, a l'hivern ($r^2=0.51$, $p<0.05$, $n=20$), tot i que analitzant les dues fraccions per separat, només va sortir estadísticament significativa la relació amb el carboni orgànic particulat ($r^2=0.45$, $p<0.05$, $n=10$, Taula 4.7). A finals d'estiu, però, no es va detectar cap relació entre el consum d'oxigen i el consum de carboni orgànic.

La relació estequiomètrica del consum d'oxigen i de carboni és de 0.445 mol d'O₂ respirat per cada mol de C orgànic consumit a l'hivern (a 15 °C, $n=10$). Gràficament s'observa que la demanda bioquímica d'oxigen està relacionada amb el consum de COD i COP, tret d'alguns punts, que procedeixen de l'estació de *Cua*, tant superficial com al fons (Figura 4.2).

Taula 4.6. Concentració de carboni orgànic dissolt (COD) i carboni orgànic particulat (COP) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs en gener de 1997 i setembre de 1998. Els codis corresponen als del llistat de la Figura 4.2.

Estació	COD (mg C/l)	COP (mg C/l)	COD (%)	COP (%)
Gener de 1997				
boF	0.850	0.956	47	53
miF	0.672	0.551	55	45
cuF	1.313	2.466	35	65
cuS	1.228	0.847	59	41
miS	1.730	0.688	72	28
boS	1.221	1.126	52	48
PNc	1.544	3.049	34	66
PNm	1.686	0.553	75	25
PNb	1.490	0.750	67	33
PS	1.371	0.473	74	26
<i>mitjana</i>	<i>1.31</i>	<i>1.15</i>	<i>57</i>	<i>43</i>
<i>error est.</i>	<i>0.1</i>	<i>0.3</i>	<i>4.8</i>	<i>4.8</i>
Setembre de 1998				
boF	2.79	0.899	76	24
miF	2.78	0.655	81	19
cuF	6.06	0.382	94	6
cuS	4.95	0.485	91	9
miS	2.84	0.487	85	15
boS	1.95	0.406	83	17
PNc	2.17	0.297	88	12
PNm	2.57	0.773	77	23
PNb	2.56	0.365	88	12
PS	3.90	0.387	91	9
<i>mitjana</i>	<i>3.26</i>	<i>0.514</i>	<i>85</i>	<i>15</i>
<i>error est.</i>	<i>0.4</i>	<i>0.1</i>	<i>2.0</i>	<i>2.0</i>

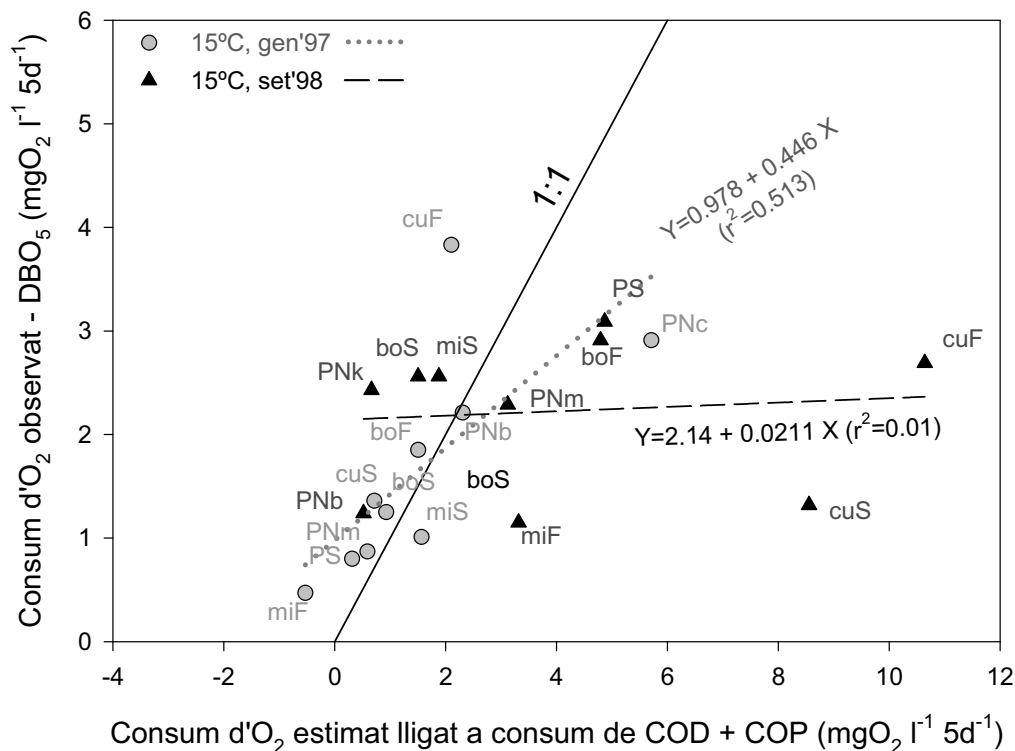


Figura 4.2. Relació entre consum d'oxigen dissolt (OD) estimat per consum de carboni orgànic dissolt (COD) més particulat (COP) assumint relació estequiomètrica C:O com a 1:1, i la respiració observada per la demanda bioquímica d'oxigen en 5 dies (DBO_5). Les sigles mostrades corresponen a les estacions de mostreig exterior fons (exF), boca fons (boF), mig fons (miF), cua fons (cuF), cua superficial (cuS), mig sup. (miS), boca sup. (boS), exterior sup. (exS), plataforma nord cua (PNc), plataforma nord mig (PNm), plataforma nord boca (PNb), i plataforma sud (PS).

Taula 4.7 Correlacions parcials entre consum d'oxigen dissolt (OD), estimat a través del canvi de concentració del carboni orgànic dissolt (COD) més carboni orgànic particulat (COP), i a través de la demanda bioquímica d'oxigen en 5 dies (DBO_5) observada. S'ha assumit la relació estequiomètrica molar entre carboni i oxigen de 1:1. Incubacions a 15 ° C.

	Consum d'OD per Δ de: Mes i Temp (°C)	DBO_5	
		r^2	p
COD	Gener	0.098	0.272
	Setembre	0.0156	0.739
	Totes	0.135	0.111
COP	Gener	0.454	0.037**
	Setembre	0.065	0.503
	Totes	0.155	0.089*
COD+COP	Gener	0.513	0.020**
	Setembre	0.010	0.787
	Totes	0.167	0.074*

Totes les correlacions s'han realitzat amb $n=10$, i les significatives s'han ombrejat i marcat amb asteriscos segons el nivell de significació: $p < 0.1$, en gris clar i un asterisc (*), i $p < 0.05$, en gris fosc i amb doble asterisc (**).

Clorofil·la a vs. carboni orgànic particulat i oxigen dissolt

El carboni orgànic particulat i la concentració de clorofil·la a van presentar una correlació estadísticament significativa (Figura 4.3a). Estudiant la mateixa correlació per estacions climatològiques, s'observa que només va ser significativa a l'estiu (Figura 4.3d). Es va treure d'aquesta anàlisi les dades de la primera campanya de mostreig, atès que van donar uns resultats anòmalament baixos de clorofil·la a i anòmalament alts de COP, per l'època de l'any en que es va mesurar i s'atribueix a algun error de mostreig inicial (cercles blancs del gràfic Figura 4.3a, d). La concentració d'oxigen dissolt i la concentració de clorofil·la a es van correlacionar negativament, encara que amb un baix coeficient de determinació ($p < 0.05$, $r^2 = 0.11$, Figura 4.3f). En aquest cas, per estacions, la correlació només és significativa a l'hivern, a on, a més, és positiva, (Figura 4.3g).

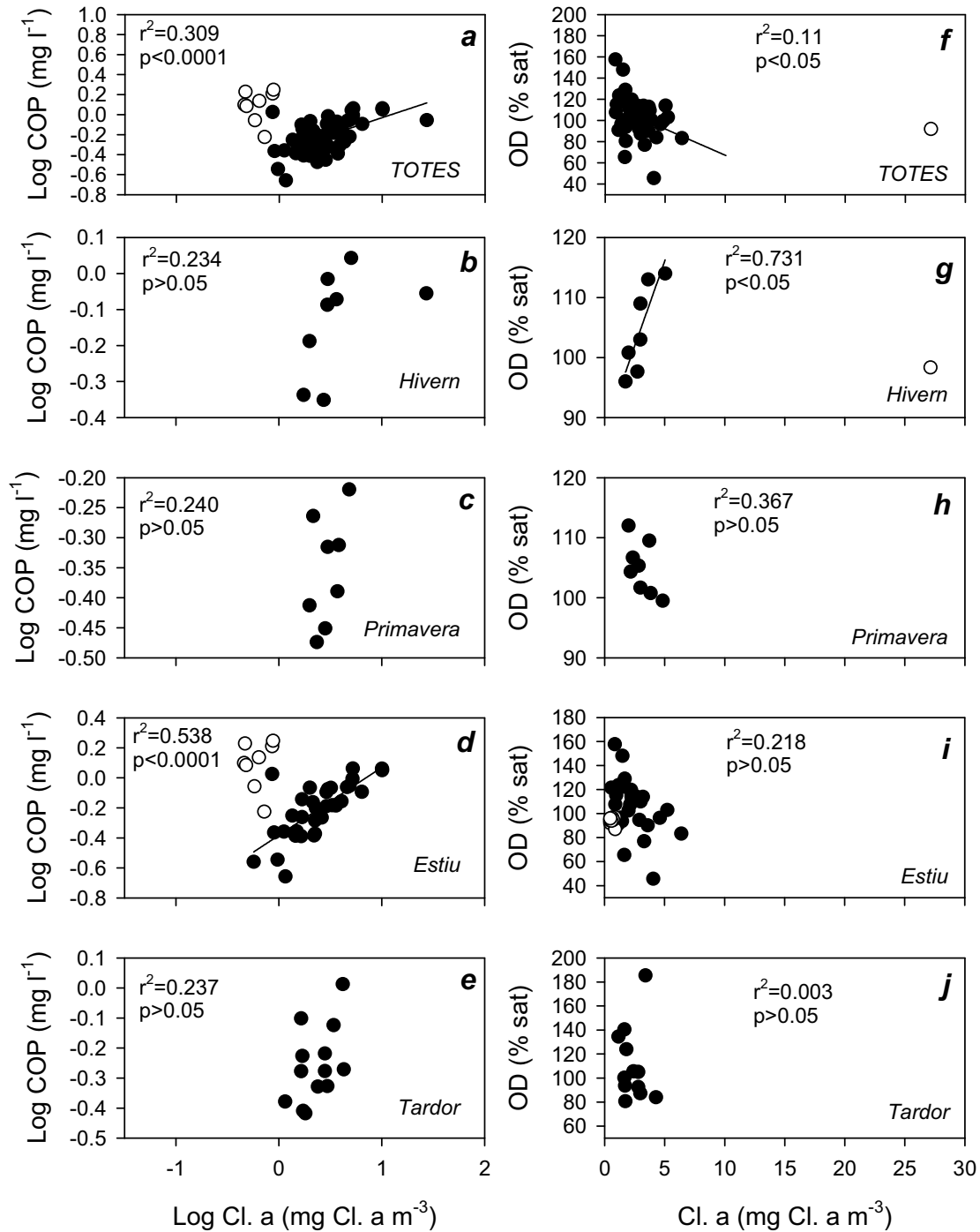


Figura 4.3. Regressions lineals entre la concentració de clorofil·la a (Cl.a) i (a-e) la de carboni orgànic particulat (COP) en escala doble logarítmica, o (f-j) entre Cl.a i la concentració d'oxigen dissolt. (a, f) totes les dades, (b, g) hivern, (c, h) primavera, (d, i) estiu, (e, j) tardor. Els cercles blancs corresponen a valors fora de rang o "outliers" (veure text per més detalls).

Resultats generals

Producció Bruta del Plàncton

Per estimar la producció bruta del plàncton s'han escollit els conjunts de dades de les campanyes de cada estació climatològica més adequats en cada cas, descartant aquelles en què certs processos podien produir un biaix important dels resultats. Per exemple, per estudiar la productivitat del fitoplàncton de la capa superficial s'han agafat les dades de les campanyes amb el menor intercanvi vertical de masses d'aigua (per reduir el biaix per entrada d'oxigen dissolt produït pels productors primaris de la capa de fons). Això ha estat a causa de les poques rèpliques estacionals dels valors de cada variable i la seva heterogènia distribució temporal i espacial. En cada taula de resultats s'indica la campanya o mes de mostreig del qual procedeixen les dades.

Taula 4.8 Estimes de producció bruta del plàncton (PPB_{plc}), velocitats de canvi parcials de concentració d'oxigen dissolt a la columna d'aigua en la capa superficial i percentatges parcials relatius a la PPN_{plc} (% PPN_{plc}). Les altres variables mostrades són l'oxigen dissolt (OD), el canvi net planctònic (CNP), el flux per l'aireig del vent (FOD_{vent}), el flux per hidrodinamisme (FOD_{hid}), la producció primària neta del plàncton (PPN_{plc}), la respiració del plàncton (R_{plc}). Les últimes tres columnes fan referència al percentatge de la PPN_{plc} que significa el valor de flux a causa del vent (Vent), hidrodinamisme (Hid) i respiració del plàncton (R).

Estació	Data	OD %	CNP ¹	FOD_{vent}	FOD_{hid}	PPB_{plc} ²	R_{plc} ³	PPN_{plc} ⁴	% PPN_{plc} ⁵			
									Vent	Hid.	R	
Hivern	07/03/97	109	0.094	-0.132	-0.001	0.227	0,0117	0.215	(-)	61	0	(-) 5
Primav.	25/04/97	114	0.100	-0.102	+0.001	0.201	0,0093	0.192	(-)	53	0	(-) 5
Estiu	10/06/97	122	0.059	-0.113	+0.070	0.102	0,0150	0.087	(-)	130	(+)	80 (-) 17
Tardor	17/09/97 ⁶	91	0.225	+0.091	-0.018	0.152	0,0225	0.130	(+)	70	(-)	14 (-) 17

¹ Canvi d'oxigen observat a la columna d'aigua tenint en compte l'oxigen produït pel plàncton i l'oxigen intercanviat amb l'aire i amb els altres compartiments d'aigua del model de caixes.

² Velocitat de canvi de la producció bruta del fitoplàncton, calculada com $PPB_{plc} = \text{Canvi Net Planctònic} - FOD_{vent} - FOD_{hid}$.

³ Estimada a partir de la DBO_5 i assumint consum d'oxigen lineal amb el temps.

⁴ Producció neta del plàncton, calculada com $PPN_{plc} = PPB_{plc} - R_{plc}$.

⁵ El signe correspon a si ha estat un efecte de treure una part de l'oxigen de la PPB_{plc} (-) o bé afegir-ne (+)

⁶ S'ha considerat no la mitjana de les dues dades del 17/09/97 sinó tan sols la corresponent a l'estació *Cua*, atès que la mitjana de concentració d'oxigen dissolt és justament 100%, el que no donaria idea del flux possible a través de la interfase que estaria existint. Per aquesta raó hem considerat els valors de *Cua*, amb 90% de saturació d'O.D., per tal de tenir una idea de l'ordre de magnitud de l'entrada d'oxigen via atmosfèrica en una situació perfectament possible per aquesta època de l'any.

Utilitzant l'equació <4.2>, s'estima que la producció primària bruta del plàncton (PPB_{plc}) es situa entre 0.102 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$ el juny i els 0.227 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$ a principis de març per a la capa superficial (Taula 4.8). La respiració, entre 0.0093 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$ en primavera i 0.225 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$ a la tardor; i la producció neta resultant oscil·la entre 0.087 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$ a l'estiu i 0.215 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$ a l'hivern. En expressar aquests i altres valors de la Taula 4.4 en percentatges respecte la producció neta en aquesta Taula 4.8, s'obté que la respiració del plàncton es situa entre el 5 i el 17 % de la PPN_{plc} . El

vent generalment provoca un flux d'oxigen cap a l'atmosfera que oscil·la entre el 53 i el 130 % de PPN_{plc} , excepte en la situació d'hipòxia de 1997, en que els dèficits d'oxigen van causar un intercanvi net d'oxigen en direcció a l'aigua en una quantitat equivalent al 70% de la producció neta planctònica. L'hidrodinamisme té una contribució pràcticament nul·la durant el període de canals tancats, si bé durant la resta de l'any, l'hidrodinamisme pot introduir oxigen a la capa superior de l'ordre d'un 80 % de la PPN_{plc} local a l'estiu, en que la producció local del plàncton és mínima i la producció del bentos és màxima (i l'aigua porta l'oxigen produït de la capa inferior). Finalment, durant l'època de les hipòxies a la capa de fons, l'hidrodinamisme pot fer disminuir la concentració d'oxigen a la capa superficial en una quantitat equivalent al 14 % de la producció neta planctònica superficial; paral·lelament, l'hidrodinamisme pot fer augmentar l'oxigen dissolt a la capa de fons en una quantitat equivalent al 8 % de l'anterior PPN_{plc} .

Les estimes de productivitat planctònica bruta d'oxigen per unitat de clorofil·la a es van situar entre 27.3 i 69.8 $mgO_2 (mg Cl.a)^{-1} h^{-1}$ (Taula 4.9).

Taula 4.9 Productivitat del plàncton ($PB_m^{Cl.a}$ i $PN_m^{Cl.a}$), a partir d'estimes de producció bruta (PPB_{plc}) i neta (PPN_{plc}), respectivament, i la concentració de clorofil·la a (Cl.a), per a cada estació climatològica.

Estació	Data	PPB_{plc}	PPN_{plc}	Cl.a	$PB_m^{Cl.a}$	$PN_m^{Cl.a}$
					$mg O_2$	$mg O_2$
		$mg O_2 l^{-1} h^{-1}$	$mg O_2 l^{-1} h^{-2}$	$mg m^{-3}$	$mg Cl.a^{-1} h^{-1}$	$mg Cl.a^{-1} h^{-2}$
hivern	07/03/1997	0.227	0.215	3.66	62.0	58.7
primav.	25/04/1997	0.201	0.192	3.01	66.8	63.8
estiu	10/06/1997	0.102	0.087	2.16	47.2	40.3
tardor	17/09/97 ¹	0.152	0.13	6.4	23.8	20.3

¹ A l'igual que en taules anteriors, s'ha considerat no la mitjana de les dues dades del 17/09/97 sinó tan sols la corresponent a l'estació *Cua*.

Discussió general

Estimes de producció i productivitat del fitoplàncton

Hi ha una certa discrepància entre els únics valors de producció fitoplanctònica existents per a la badia dels Alfacs calculats amb un mètode directe, i els resultats mostrats en aquest capítol, calculats amb un mètode indirecte. L'any 1984 es van realitzar incubacions *in situ* amb ^{14}C de mostres naturals de fitoplàncton (no concentrades) durant dues hores (Delgado 1986). Aquestes mesures fetes a superfície donaven unes produccions d'entre 5.77 i 11.63 $\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en els mesos de març, juliol i octubre a nivell de la zona més profunda de la badia dels Alfacs, que equivaldrien a 0.0154 i 0.0310 $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (assumint relació molar de 1:1 entre CO_2 i O_2). En el present treball, en canvi, s'han obtingut uns valors de PPN_{plc} entre 0.059 i 0.225 $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Taula 4.4), i de PPB_{plc} entre 0.102 i 0.227 $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Taula 4.8), entre 4 i 7 vegades per sobre que els anteriors. Convé recordar que el mètode del ^{14}C dona valors que es troben entre la producció neta i la producció bruta (Peterson 1980, Bender *et al.* 1987); per a incubacions suficientment curtes hauria de ser força ajustada a la PPB_{plc} (Collos *et al.* 1993), però en alguns casos d'incubacions de 2-3 h amb ^{14}C , s'ha arribat a descriure que els resultats eren un ordre de magnitud inferiors (Cole *et al.* 1991, Cole *et al.* 1992, Howarth *et al.* 1996). D'altra banda, les mesures basades en mostres d'aigua incubades en ampolles poden subestimar de forma severa la producció primària bruta i respiració a estuaris (Swaney *et al.* 1999), especialment en aigües tèrboles i profundament barrejades. Segons aquests darrers investigadors, la mesura del metabolisme a partir de canvis *in situ* en la concentració d'oxigen dissolt sobre un cicle diari, com hem fet aquí, ofereix una solució potencial a aquests problemes.

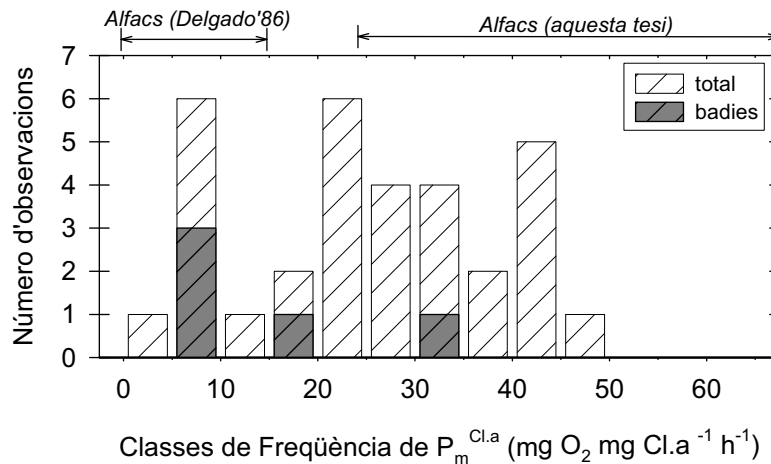


Figura 4.4. Productivitat mitjana del fitoplàncton ($P_m^{\text{Cl.a}}$, en $\text{mg O}_2 \text{ mg Cl.a}^{-1} \text{ h}^{-1}$) de diferents sistemes marins costaners, fonamentalment llacunes (total de les barres ratllades). S'assenyalen en gris els que corresponen a badies. A partir de Nixon (1986); cal tenir en compte que fins els anys 80 la majoria dels estudis es feien a partir d'incubacions amb ^{14}C .

Tanmateix, la productivitat del plàncton ($P_m^{\text{Cl.a}}$) també mostra discrepàncies lògicament (donat que la concentració de clorofil·la a no ha canviat molt), d'un ordre de magnitud entre les mesures anteriors amb ^{14}C (entre 1.87 i 5.12 $\text{mg O}_2 \text{ mg Cl.a}^{-1} \text{ h}^{-1}$, Delgado 1986) i les actuals per aquest mètode

indirecte (entre 20.3 i 63.8 mg O₂ mg Cl.a⁻¹ h⁻¹, per a productivitats netes, i una mica superiors per a les brutes; Taula 4.9). Nixon (1986) va recopilar dades de producció planctònica i clorofil·la a d'una varietat de sistemes marins costaners d'arreu del món (fonamentalment llacunes costaneres i badies), estimades la major part amb la tècnica de ¹⁴C (i per tant, amb produccions entre les netes i les brutes). Els resultats d'aquest estudi, tret d'excepcions, es troben inclosos al tercer i quart quartils de la distribució de la seva compilació de dades (Figura 4.4). Així, els valors de P_m^{Cla} obtinguts en el present treball són relativament alts però es troben perfectament dins l'ordre de magnitud observat en la bibliografia i els seus rangs de variació (Taula 4.10). I més concretament, també ho fan les taxes de producció per unitat de clorofil·la a descrites en altres indrets per a taxa similars.

Aquestes afirmacions són vàlides tant si tenim en compte la contribució del vent i de l'hidrodinamisme com si no. I això ho sabem per que en calcular també la productivitat a partir de l'equació <4.2> però ometent FOD_{vent} i FOD_{hid}, aquesta nova P_m^{Cla} de referència, no conté la influència de les estimes de la contribució del vent, hidrodinamisme, ni respiració, i es situa al voltant de 38.2 mg O₂ mg Cl.a⁻¹ h⁻¹ (Figura 4.5), encara un ordre de magnitud per sobre de les productivitats estimades amb el ¹⁴C. Aquesta mateixa estima de l'ordre de magnitud de P_m^{Cla} a través de CNP realitzada en altres sistemes va ser de 5.3 mg O₂ mg Cl.a⁻¹ h⁻¹ (r²=0.63, p<0.01, n=59) a badies costaneres de Maryland, EUA (Boynton *et al.* 1996) i entre 18 i 27 mgO₂ mg Cl.a⁻¹ h⁻¹, per a CNP+R, a l'estuari Choptank de la badia de Chesapeake, EUA (considerant un fotoperíode de 10 h aplicat sobre els resultats de la Figura 4.6, a partir de Petersen *et al.* 1998).

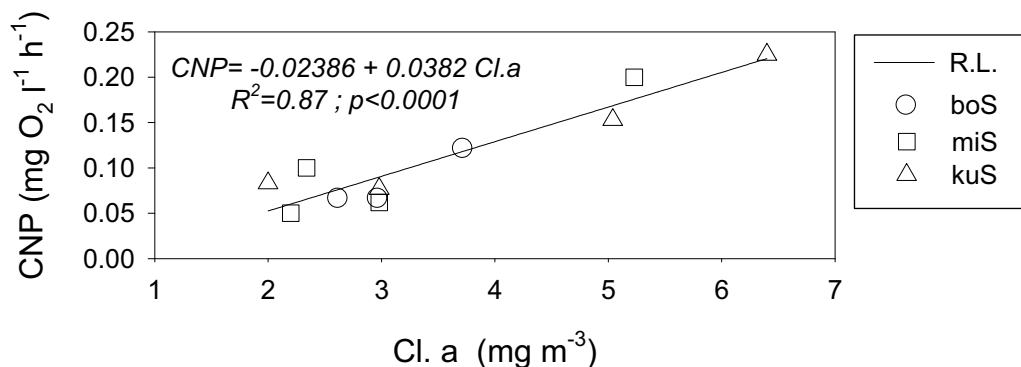


Figura 4.5. Canvi net d'oxigen del plàncton (CNP) diari a la capa superior, per compartiments. Llegendra: boS, miS, cuS representen els compartiments superficials de les estacions Boca, Mig i Cua, respectivament. Es mostra també l'equació de la regressió lineal (R.L.) entre ambdues variables.

Per altra banda, tot i semblar improbable, no es pot descartar que les discrepàncies observades responguin a un canvi real en el funcionament de la comunitat fitoplanctònica. Per exemple, el clima lumínic a la columna d'aigua a finals dels 90 va mostrar una major radiació global respecte mitjans dels anys 80, de quan es disposen dades (Capítol 1, plana 76). Aquesta diferència en la llum incident sobre el fitoplàncton podria haver estat produïda a molts nivells diferents i de diferent ordre

d'importància (Harding *et al.* 1987), essent un d'ells la terbolesa. L'aigua podria ser més tèrbola ara que abans, malgrat no es té cap suport experimental per sostenir aquesta hipòtesi. O podria ser, hipotèticament, que una major circulació de Langmuir mediada pel vent permetés a les cèl·lules del fitoplàncton fotoinhibir-se menys, a causa de romandre-hi menor temps en la superfície de la columna d'aigua (Macedo *et al.* 1998), o a causa d'altres efectes associats a la turbulència (Petersen *et al.* 1998, Olesen *et al.* 1999).

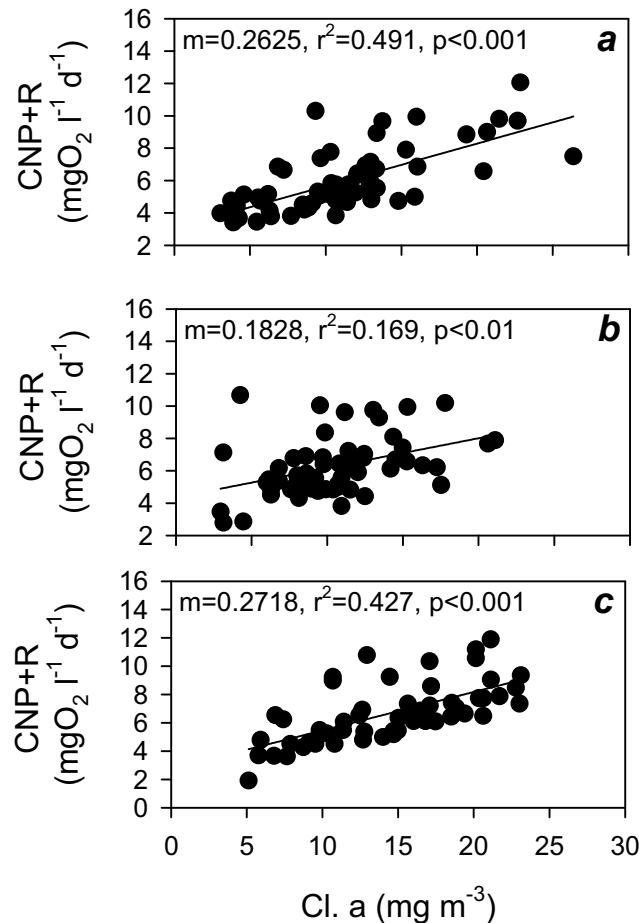


Figura 4.6. Relació entre la suma de la velocitat de canvi net planctònic d'oxigen més la respiració (CNP+R, en mgO₂ l⁻¹ d⁻¹) i la clorofil·la a (en mg m⁻³), en experiments de mesocosmos amb tres graus de turbulència: (a) baixa, (b) mitja i (c) alta. m=pendent de la recta. Elaborat a partir de dades de Petersen *et al.* (1998).

En qualsevol cas, se sap que les reduccions en la irradiància incident, tant a escala espacial, o temporal diària o estacional, poden fer que augmenti la productivitat del fitoplàncton respecte la clorofil·la a, o la seva eficiència fotosintètica⁹, per valors similars de productivitat. És previsible que els sistemes somers, com la badia dels Alfacs, rebin irradiàncies superiors a les de saturació de tot o gran part del seu fitoplàncton, com a mínim, en les hores de màxima elevació solar. I el fitoplàncton disminueix la seva eficiència fotosintètica a altes irradiàncies (Falkowski 1980, Yentsch 1980, Prézélin 1981). Així s'ha observat en la badia de Chesapeake en repetides ocasions, en que la seva màxima

⁹ productivitat per unitat d'irradiància, mg O₂ mg Cl. a⁻¹, h⁻¹ μmol fotons⁻¹

productivitat no és al migdia sinó a mig matí o mitja tarda (Harding *et al.* 1982a), i en una escala de variació estacional la seva màxima taxa d'eficiència fotosintètica per unitat de productivitat (el quocient entre pendent inicial de les corbes fotosíntesi – irradiància i P_m^{Cla}) es dona al març, mentre que els mínims anuals són al juny (Harding *et al.* 1986). La variació en fondària de la taxa d'eficiència fotosintètica respecte P_m^{Cla} a l'estiu mostra que és cinc vegades superior sota la picnoclina que a la capa superficial (Harding *et al.* 1985). Així, qualsevol factor que fes disminuir lleugerament la irradiància incident a la badia dels Alfacs (Figura 4.7c) produiria un cert augment de la producció fitoplanctònica de la capa superficial, a través d'increments en la seva productivitat o en la seva eficiència fotosintètica. En aquesta línia, s'ha observat que als mesos d'estiu les produccions brutes i netes del plàncton són les més baixes de l'any (Taula 4.4), tot i la gran transparència relativa de l'aigua (Figura 2.4), el que referma la hipòtesi anterior.

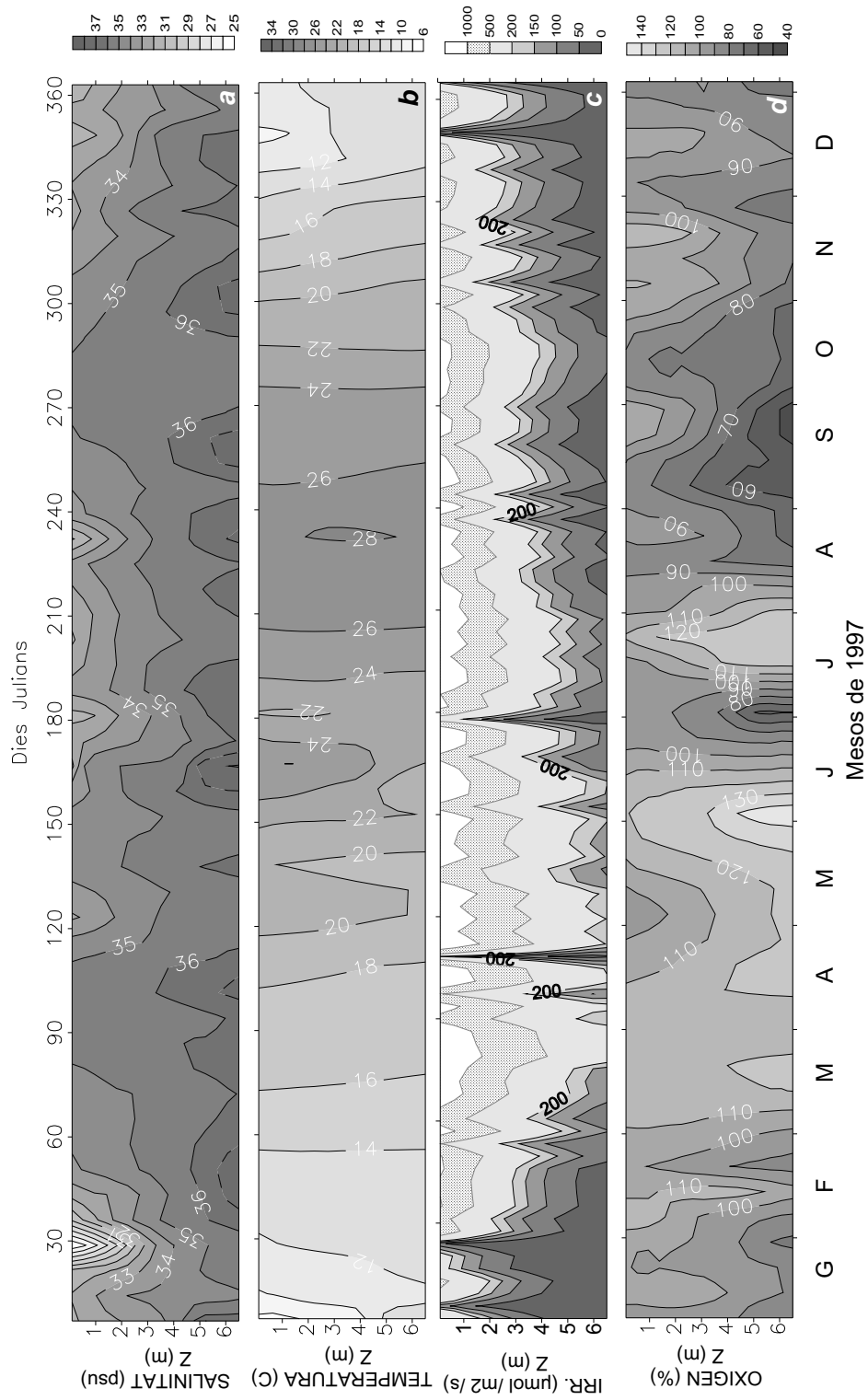


Figura 4.7. Perfils en fondària de (a) salinitat, (b) temperatura, (c) irradiància subaquàtica, i (d) oxigen dissolt, en el punt central dels Alfaacs al llarg de 1997. Dades de (a), (b) i (d) ja mostrades a la Figura 2.18, i les de (c) han estat calculades a partir de la metodologia explicada al Capítol 1. Les marques dels eixos d'abscisses corresponen a mesos de 30 dies.

Taula 4.10 Recull de productivitats del fitoplàncton (P_m^{Cla}), convertides¹ a mgO_2 ($mg\ Cl_a$)⁻¹ h⁻¹. Les produccions descrites en els treballs (Prod.) fan referència a produccions netes (N), brutes (B) o sense especificar en la referència (“?”), així com també ha passat amb la descripció del metodologia, que no ha pogut ser esbrinada en tots els casos (“?”).

Llocs	P_m^{Cla}	Prod.	Mètode	Font
Ordre de magnitud general per a la productivitat màxima	25-50	N	Bibliog	Thomann i Mueller 1987
Diversos	0.53-45.3			Lalli i Parsons 1993
Canal de la Mànega (<i>sobre (sota picnoclina)</i>)	5.07-15.2 0.53	N N		Pingree <i>et al.</i> 1975
Canal de Santa Bàrbara, CA., Badia de San Francisco, CA.,	5.01-65.3 5.2-10.5	N-B	¹⁴ C, 2 h	Harding <i>et al.</i> 1982a Cloern 1979
Cubeta de Bedford, Nova Escòcia, Canadà	3.8-33.5 5.4-22.3		¹⁴ C, 3 h	Harrison i Platt 1980 Côté i Platt 1983
Badia Chesapeake, E.U.A.	2.67-32.0 5.34-18.7	N-B N	¹⁴ C, 2 h ¹⁴ C, 4-6 h	Harding <i>et al.</i> 1985 Boynton <i>et al.</i> 1997
Badia Narragansett, R.I., E.U.A.	9.5			Durbin <i>et al.</i> 1975
Tancs de cultiu. Rhode Island, E.U.A.	7.39-15.6 5.29-11.7	N	Canvi diari, mesocosmos O ₂ -Winkler	Bender <i>et al.</i> 1987
Strangford Lough, Irlanda del Mar del Nord	0.75-69.9 2.73-122			Savidge 1988 Riegman i Colijn
Estuari de Schelde, Països Riu Choptank, subestuari de la badia de Chesapeake, E.U.A.	1.71-64.2 1.7-14.8	N	¹⁸ O	Kromkamp i Peene Lewitus i Kana 1995
Estuari de Tagus, Portugal, U.E.	32.6-123.9	N	O ₂ -Winkler	Macedo <i>et al.</i> 1998
Badia dels Alfacs, Espanya, U.E. Total la badia; (<i>només cubeta</i>)	1.87-13.0 (1.87-5.12)	N-B	¹⁴ C, 2 h	Delgado 1986
A partir de canvis diaris de concentració d'O ₂ . Només cubeta.	21-43 (38) ² 23.8 - 66.8 20.3 - 63.8	CNP ³ B ⁴ N	canvi diari <i>in situ</i>	Aquesta tesi

¹ Els valors en $\text{mg C (mg Cl a)}^{-1} \text{h}^{-1}$ s'han convertit assumint que tot l'oxigen produït en la producció primària ha comportat fixació de carboni, i per tant, s'ha multiplicat pel factor 32/12 de la relació estequiomètrica de entre els C-CO₂ i l'O₂ de la fotosíntesi, sempre que no s'indiqués altre mètode.

² Valor estimat a partir de la regressió lineal amb tots el punts vàlids.

³ Per a aquest càlcul es va prendre que el tot l'increment observat en la concentració d'oxigen en un dia és degut només a la producció del fitoplàncton; és a dir, que FOD_{hid} i FOD_{vent} són menyspreables respecte la producció del plàncton.

⁴ Per al càlcul de la velocitat de canvi de la producció bruta (PPB_{pic}) ja s'ha inclòs l'efecte de l'hidrodinamisme i del vent a més de la respiració del plàncton.

Estimes de la respiració del plàncton

S'ha observat que el mètode de la DBO₅ per calcular un valor de referència de respiració de la columna d'aigua, assumint velocitat de consum d'oxigen constant¹⁰ (Taula 4.3, mitjana de 0.015 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹), dóna una resultat que no dista gaire del decreixement d'oxigen nocturn mitjà de la columna d'aigua (Taula 4.2, mitjana de 0.022 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹). D'aquests dos, el mètode de les incubacions de DBO dóna valors aproximats de respiració, mentre que el segon mètode mesura directament el canvi de concentració d'oxigen a causa de la respiració planctònica nocturna més a causa del flux d'oxigen mediat pel vent i per l'hidrodinamisme, i en alguns estudis ha estat pres com la respiració del plàncton (Petersen *et al.* 1998, Caffrey 2003). Si bé no s'ha pogut mesurar la respiració amb detall, s'ha pogut comprovar que el mètode emprat d'assignar la DBO_n a la respiració dóna resultats del mateix ordre de magnitud als que provenen de les mesures directes de davallades nocturnes d'oxigen dissolt a la columna d'aigua (fonamentalment per respiració planctònica, però no només), en la línia d'altres treballs en sistemes marins costaners (Witek *et al.* 1999). Per aquesta raó, s'assumeix la validesa del mètode emprat en aquesta tesi per deduir el valor de la respiració planctònica en la badia dels Alfacs.

Flux d'oxigen a causa del vent

La badia generalment exporta oxigen cap a l'atmosfera, en petites quantitats quan no hi ha vent, i amb fluxos majors quan el vent actua. Els resultats obtinguts de velocitat de canvi d'oxigen a causa de l'intercanvi amb l'atmosfera (Taula 4.4) s'assemblen molt a les estimes d'altres treballs en badies estuarianes, com la badia d'Uranouchi, al Japó (plana 330), en que s'estima que un 60% de l'oxigen produït marxa cap a l'atmosfera entre primavera i tardor (Munekage 1992). Altres estudis similars fets a la badia de Narragansett (EUA) van mostrar, a partir també d'un model de caixes, que variacions en la velocitat d'intercanvi gasós aire-mar tenen un efecte molt petit (<10%) sobre la concentració d'oxigen dissolt de la capa superficial del seu sistema, i que això no tenia cap efecte significatiu sobre l'oxigen de la capa profunda (Kester *et al.* 1996).

Més enllà de les estimes puntuals fetes (Taula 4.4), podem fer una aproximació al flux anual causat pel vent (FOD_{vent}) basant-nos en la distribució de valors de concentració superficial d'oxigen dissolt i en la distribució de velocitats del vent, per a una salinitat i temperatura de l'aigua donades (Figura

¹⁰ Com en cap de les nostres incubacions de DBO₅ no es va esgotar l'oxigen dissolt, cap mostreig de DBO va coincidir amb blooms de fitoplàncton, i quedava molt carboni orgànic en finalitzar les incubacions, vam assignar el valor horari de DBO a la respiració planctònica, considerant un consum constant al llarg dels cinc dies.

4.8). Si agafem aigua de 35 psu de salinitat i 20 °C com una possible de referència a partir dels valors observats al llarg de l'any (Figura 4.7a, b, respectivament), els valors de FOD_{vent} es situen entre propers a zero quan només hi ha un 101 % de saturació d'oxigen a l'aigua, i els 4.6 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$ quan l'oxigen estigués a 140 % de saturació (com va haver de mitjana a l'estació Cua superficial els estius de 1997 i 1998, dades no mostrades) i el vent bufés a 10 $m\ s^{-1}$, una velocitat del vent que és poc freqüent, però que s'ha donat en alguns casos (Figura 4.9).

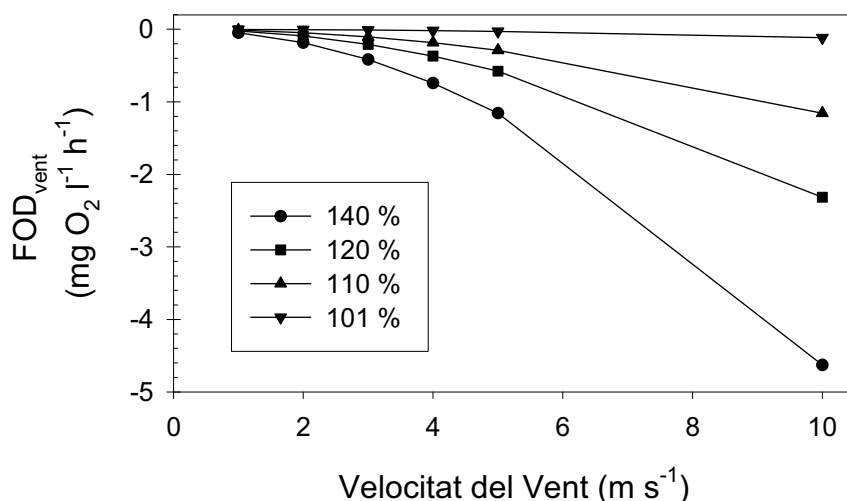


Figura 4.8. Flux d' O_2 de l'aigua a l'aire en funció de la velocitat del vent ($m\ s^{-1}$) i per varies sobresaturacions d'oxigen dissolt, considerant fixes salinitat a 35 psu i temperatura de l'aigua a 20 °C. Mètode de càlcul explicat al text. Valors negatius de FOD_{vent} indiquen sortida d'oxigen cap a l'atmosfera.

La moda de la distribució d'intensitat de vent al Delta de l'Ebre es situa en el rang de 1 a 1.5 $m\ s^{-1}$ de velocitat (Figura 4.9), per a tot l'any 1997 com a referència. Això provoca que ens haguem de centrar en la franja dels 1 a 3 $m\ s^{-1}$ del gràfic anterior (Figura 4.8), atès que durant tot l'any 1997 més del 50 % del temps el vent bufa entre aquestes intensitats, i les saturacions d'oxigen superficials es troben entre el 90 % i el 110 % la major part del temps (Figura 4.7d). És a dir, que el vent al llarg de tot 1997 estaria extraient entre 0.001 i 0.1 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$, en funció de si l'oxigen es troba un 1% de saturació per sobre de l'equilibri i els vents són suaus (valors mínims de flux de sortida) o de si l'oxigen es troba un 10% de saturació per sobre de l'equilibri i els vents són propers als 3 $m\ s^{-1}$. En el cas de les situacions de dèficit d'oxigen, els fluxos serien els equivalents a les mateixes quantitats de dèficit, però de signe contrari, segons la fórmula emprada (eq. <4.4>).

Consum d'oxigen i canvis en les concentracions de carboni.

El consum d'oxigen és explicat majoritàriament per consum de COP, i el COD sembla més refractari, menys a finals d'estiu, en que la matèria orgànica sembla ser més refractària (atès que el consum de COP no està relacionat significativament amb el consum d'oxigen de l'aigua). I es que la matèria orgànica present en ambients aeròbics, com és el cas general de la columna d'aigua de la badia dels Alfacs, sol consistir majoritàriament de compostos refractaris no aptes per l'assimilació dels consumidors (Degens i Mopper 1976).

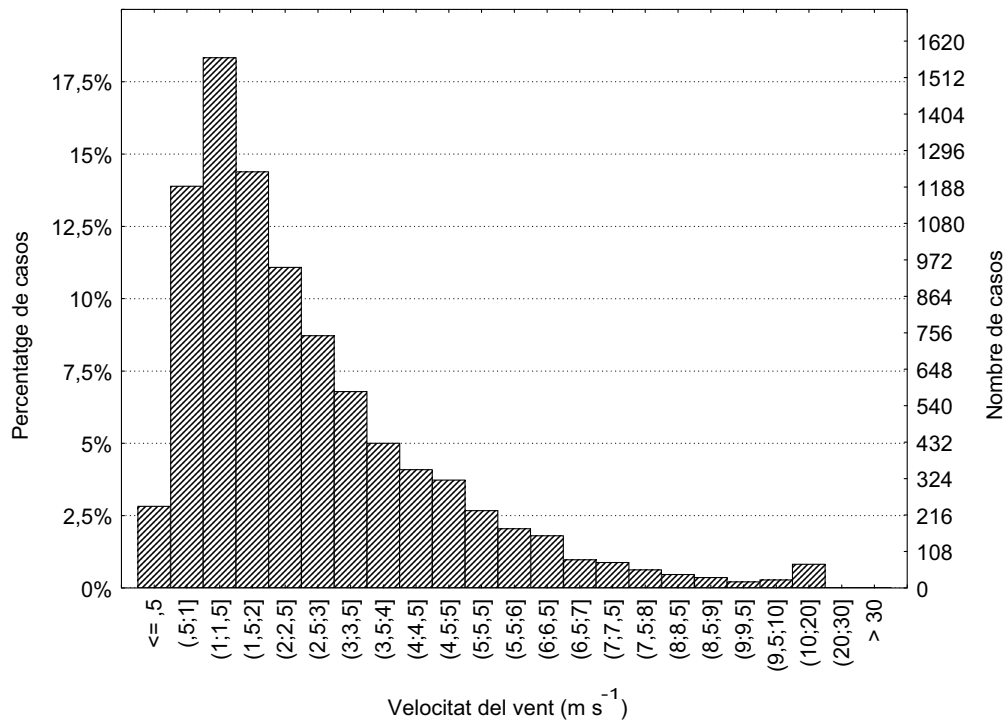


Figura 4.9. Distribució de la velocitat del vent al Delta de l'Ebre. 1997. Les dades són mitjanes horàries de l'estació meteorològica Amposta-DARP.

A més, la relació estequiomètrica molt inferior a la unitat entre els consums d'oxigen i carboni (0.44 mols O₂ respirats per mol C orgànic consumit el gener a 15 °C, i 0.48 a 23°C, i 0.02 a setembre a 15 °C, dades no mostrades) indica que aquesta matèria orgànica és poc consumida per respiració aeròbica a l'hivern, i molt menys a finals d'estiu (en el cas de compostos similars a la glucosa donaria una relació estequiomètrica d'O₂:C_{orgànic} d'1, i per compostos refractaris s'esperaria que aquest valor fos superior). Així, es va donar consum de carboni orgànic en absència d'oxigen (a causa de possibles microgradients), al menys, parcialment.

El cas de l'estació *Cua* presenta algunes singularitats: per un costat la comentada per al gener de 1997, i per l'altre, la de setembre de 1998, en que *Cua superficial* i *Cua fons* van ser els únics compartiments amb salinitats inferiors a 35.5 psu, i concentracions de COD *in situ* de més del doble que els altres compartiments (Taula 4.6). Aquests valors notablement aïllats de la resta en la Figura 4.2 serien fàcils d'explicar sota dues condicions: (1) si el COD procedís en aquest cas dels canals de desguàs dels arrossars i fos altament refractari, és generaria una demanda bioquímica d'oxigen molt inferior a l'esperable, o (2) el COD fos consumit per organismes anaeròbics, que tot i semblar difícil a la columna d'aigua, poden haver-hi microgradients en partícules detritiques, l'interior de les quals pot ser proper a l'anòxia (J. Romero, *com. pers.*)

Fitoplàncton detrític

El material orgànic particulat de la badia sembla estar format en general per fitoplàncton, tal i com es dedueix de la correlació positiva entre el carboni orgànic particulat i la concentració de clorofil·la a (Figura 4.3a). Gran part d'aquest fitoplàncton estaria inactiu, com indica la correlació negativa entre l'oxigen dissolt i la concentració de Clorofil·la a (Figura 4.3f). Ara bé, aquesta visió basada en les mitges anuals no es reproduïx a cada estació climatològica. Durant l'estiu el 54% de la variància de les dades de COP és explicat per les concentracions de clorofil·la a. No obstant, no hi ha correlació entre la clorofil·la a i la concentració d'oxigen dissolt (Figura 4.3i), indicant o bé la presència de clorofil·la detrítica (per exemple, aportada pels canals de desguàs) o bé, entrades d'oxigen no degudes a producció de fitoplàncton.

Pel contrari, a l'hivern tota la clorofil·la a sembla estar activa, com ho indica la correlació positiva amb la concentració d'oxigen dissolt a l'hivern ($r^2=0.731$, $p<0.05$, Figura 4.3g), encara que en aquest moment hi ha força carboni que no és fitoplàncton, com ho indica l'absència de correlació significativa entre el COP mesurat i la clorofil·la a (Figura 4.3b). En les altres estacions climatològiques, la manca de correlació estadísticament significativa ens podria estar indicant que hi ha quantitat variable de COP no fitoplanctònic, a la vegada de que hi ha una proporció de clorofil·la a fotosintèticament no massa activa.

Així, els resultats d'aquest treball estarien indicant que si bé els valors de producció i productivitat de la clorofil·la a estimats en aquest treball són alts en el context de la literatura científica, força sovint el fitoplàncton de la badia dels Alfacs tindria una part important detrítica i per tant, fotosintèticament no massa activa.

Bibliografia

- Bender, M., *et al.*, 1987. A comparison of four methods for determining planktonic community production. *Limnol. Oceanogr.*, 32 (5): 1085-1098.
- Boynton, W. R., *et al.*, 1997. "Interactions between physics and biology in the estuarine turbidity maximum (ETM) of Chesapeake Bay, USA (no citar sense consentiment de l'autor!!!)", a *International Council for the Exploration of the Sea*, 28. ICES, Copenhagen Denmark.
- Boynton, W. R., *et al.*, 1996. A comparative analysis of eutrophication patterns in a temperate coastal lagoon. *Estuaries*, 19 (2B): 408-421.
- Caffrey, J. M., 2003. "Production, respiration and net ecosystem metabolism in U.S. estuaries", a *Coastal Monitoring Through Partnerships*, 207-219.
- Camp, J., *et al.*, 1991. Production-consumption budget in an estuarine bay: how anoxia is prevented in a forced system. *Oecologia aquatica*, 10 145-152.
- Cloern, J. E., 1979. "Phytoplankton ecology of the San Francisco Bay System: The status of our current understanding", a *San Francisco Bay: The urbanized estuary*, 247-264. Allen Press, Kansas.
- Cole, J. J., *et al.*, 1991. Phytoplankton primary production in the tidal, freshwater Hudson River, New York (USA). *Verh. Int. Verein. Limnol.*, 24 1715-1719.
- Cole, J. J., *et al.*, 1992. Can phytoplankton maintain a positive carbon balance in a turbid, freshwater, tidal estuary? *Limnol. Oceanogr.*, 37 1608-1617.
- Collos, Y., *et al.*, 1993. Chemical, isotopic and enzymatic monitoring of free and enclosed seawater: Implications for primary production estimates in incubation bottles. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 93 49-54.
- Côté, B. i Platt, T., 1983. Day-to-day variations in the spring-summer photosynthetic parameters of coastal marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 28 (2): 320-344.
- D'Avanzo, C., *et al.*, 1996. Ecosystem Production and Respiration in response to Eutrophication in Shallow Temperate Estuaries. *Marine Ecology Progress Series*, 141 263-274.
- Degens, E. i Mopper, K., 1976. "Factors controlling the distribution and early diagenesis of organic material i marine sediments", a *Chemical Oceanography*, 6, 59-113. Ed. Academic,

- Delgado, M., 1986. Ecología de diatomeas costeras. Relación Pláncton-Bentos. Doctoral, 261 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- Durbin, E. G., *et al.*, 1975. Seasonal studies on the relative importance of different size fractions of phytoplankton in Narragansett Bay (USA). *Marine Biology*, 32 271-287.
- Falck, E., 1999. On the behaviour of oxygen in the euphotic zone of the Nordic Seas and on carbon and nutrients in the Northeast Water Polynya mixed layer. Dr. Scient Thesis, pp., *Department of Geophysics*, University of Bergen.
- Falck, E. i Gade, H. G., 1999. Net community production and oxygen fluxes in the Nordic Seas based on O₂ budget calculations. *Global Biogeochem. Cycles*, 13 1117-1126.
- Falkowski, P. G., 1980. "Light-shade adaptation in marine phytoplankton", a *Primary Productivity in the Sea*, 99-119. Plenum Press, New York.
- Geel, C., 1997. Photosystem II electron flow as a measure for phytoplankton Gross Primary Production. Ph. D. Thesis, 109 pp., *Department of Plant Physiology*, Wageningen Agricultural University.
- Grande, K. D., *et al.*, 1991. A comparison of net and gross rates of oxygen production as a function of light intensity in some natural plankton populations and in a *Synechococcus* culture. *Journal of Plankton Research*, 13 (1): 1-16.
- Hagy, J. D., *et al.*, 2000. Estimation of Net Physical Transport and Hydraulic Residence Times for a Coastal Plain Estuary Using Box Models. *Estuaries*, 23 (3): 328-340.
- Hamilton, D. i Herzfeld, M., 2001. Computational Ecosystem Dynamics Model (CAEDYM). An ecological water quality model designed for coupling with hydrodynamic drivers:
- Harding, L. W., *et al.*, 1987. Adaptative responses of photosynthesis in phytoplankton: specificity to time-scale of change in light. *Biol. Oceanogr.*, 4 403-437.
- Harding, L. W., Jr., *et al.*, 1985. Photosynthesis patterns in Chesapeake Bay phytoplankton: Short and long-term responses of P-I curve parameters to light. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*. 26 (1-2): 99-111.
- Harding, L. W., Jr., *et al.*, 1982a. Diel oscillations of the photosynthesis-irradiance (P-I) relationship in natural assemblages of phytoplankton. *Mar. Biol.*, 67 (2): 167-178.

- Harding, L. W., Jr., *et al.*, 1982b. Primary production as influenced by diel periodicity of phytoplankton photosynthesis. *Mar. Biol.*, 67 (2): 179-186.
- Harding, L. W. J., *et al.*, 1986. Phytoplankton production in two east coast estuaries: photosynthesis-light functions and patterns of carbon assimilation in Chesapeake and Delaware Bays. *Est. Coast. Shelf Sci*, 23 773-806.
- Harrison, W. G. i Platt, T., 1980. Variations in assimilation number of coastal marine phytoplankton: effects of environmental co-variables. *Journal of Plankton Research*, 2 249-260.
- Hearn, C. J. i Robson, B. J., 2001. Inter-annual variability of bottom hypoxia in shallow mediterranean estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 52 (5): 643-657.
- Howarth, R. W., *et al.*, 1996. Metabolism and organic carbon fluxes in the tidal, freshwater Hudson River. *Estuaries*, 19 (4): 848-865.
- Inoue, H., 1974. Environmental structure of dissolved oxygen in the cultured regions of yellowtail. *Environ. Eng. in the Agriculture and Fisheries Field*, 289-336 (in Japanese).
- Jähne, B., 2001. "Air-Sea Gas Exchange", a *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 1, 122-131. Academic Press, San Diego, USA.
- Jørgensen, B. B. i Richardson, K., 1996. Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. *Coastal and Estuarine Studies*, 52: 273.
- Jørgensen, B. B. i Sørensen, J., 1985. Seasonal cycles of O₂, NO₃⁻ and SO₄²⁻ reduction in estuarine sediments: The significance of an NO₃⁻ reduction maximum in spring. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 24 65-74.
- Kemp, W. M. i Boynton, W. R., 1980. Influence of Biological and Physical Processes on dissolved oxygen dynamics in an Estuarine System: Implications for Measurement of Community Metabolism. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 2 407-431.
- Kemp, W. M., *et al.*, 1992. Seasonal depletion of oxygen from bottom waters of Chesapeake bay: Roles of benthic and planktonic respiration and physical exchange processes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 85 (1-2): 137-152.
- Kester, D. R., *et al.*, 1996. Modeling, measurements, and satellite remote sensing of biologically active constituents in coastal waters. *Marine Chemistry*, 53 131-145.

- Kromkamp, J. i Peene, J., 1995. Possibility of net phytoplankton primary production in the turbid Schelde Estuary (SW Netherlands). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 121 249-259.
- Lalli, C. M. i Parsons, T. R., 1993. Biological oceanography: an introduction:
- Lee, J. H. W., *et al.*, 1991. Dissolved oxygen variations in marine fish culture zone. *Journal of Environmental Engineering*, 117 (6): 799-815.
- Lewitus, A. J. i Kana, T. M., 1995. Light respiration in six estuarine phytoplankton species: contrast under photoautotrophic and mixotrophic growth conditions. *J. Phycol.*, 31 754-761.
- Liss, P. i Merlivat, L., 1986. "Air-sea gas exchange rates: introduction and synthesis", a *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*, 113-127. D Reidel, Dordrecht, Utrecht.
- Macedo, M. F., *et al.*, 1998. Dynamic behaviour of photosynthesis-irradiance curves determined from oxygen production during variable incubation periods. *Marine Ecology Progress Series*, 165 31-43.
- Marino, R. i Howarth, R. W., 1993. Atmospheric oxygen exchange in the Hudson River: Dome measurements and comparison with other natural waters. *Estuaries*, 16 (3 PART A): 433-445.
- Munekage, Y., 1992. Application of a two-layer box model to dissolved oxygen budget in Uranouchi Bay. *Coast. Eng. Japan*, 35 (1): 129-145.
- Nixon, S. W., 1986. "Nutrient dynamics and the productivity of marine coastal waters", a *Marine Environment and Pollution*, 97-115. The Alden Press, Oxford.
- Nixon, S. W., *et al.*, 1986. Nutrients and the productivity of estuaries and coastal marine ecosystems. *J. Limnol. Soc. S. Afr.*, 12 (1/2): 43-71.
- Norro, A. i Frankignoulle, M., 1996. Biogeochemical box modelling at small scale application to the inorganic carbon cycle in the Bay of Calvi. *Ecological Modelling*, 88 101-112.
- Odum, H. T., 1956. Primary production in flowing waters. *Limnol. Oceanogr.*, 1 102-117.
- Officer, C. B., 1980. "Box model revisited", a *Estuarine and wetland processes: with emphasis on modelling*, 65-114. Plenum Press, New York.
- Olesen, M., *et al.*, 1999. Influence of nutrients and mixing on the primary production and community respiration in the Gulf of Riga. *Journal of Marine Systems*, 23 (1-3): 127-143.

- Parsons, T. R., 1963. Suspended organic matter in seawater. *Progress in Oceanography*, 1 205-239.
- Pastres, R., *et al.*, 1997. Local sensitivity analysis of a distributed parameters water quality model. *Reliability Engineering and System Safety*, 57 21-30.
- Petersen, J. E., *et al.*, 1998. Coastal plankton responses to turbulent mixing in experimental ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 171 23-41.
- Peterson, B. J., 1980. Aquatic primary productivity and the ^{14}C - CO_2 method: a history of the productivity problem. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 11 359-385.
- Pingree, R. D., *et al.*, 1975. Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the approaches to the English Channel. *Nature*, 258 (5537): 672-677.
- Prézelin, B. B., 1981. "Light reactions in photosynthesis", a *Physiological Bases of Phytoplankton Ecology*, 210, 1-43. *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci.*,
- Riegman, R. i Colijn, F., 1991. Evaluation of measurements and calculation of primary production in the Dogger Bank area (North Sea) in summer 1988. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 69 125-132.
- Savidge, G., 1988. Influence of inter- and intra-daily light-field variability on photosynthesis by coastal phytoplankton. *Mar. Biol.*, 100 127-133.
- Skjelvan, I., *et al.*, 2001. Oxygen fluxes in the Norwegian Atlantic Current. *Marine Chemistry*, 73 (3-4): 291-303.
- Slawyk, G., *et al.*, 1984. Comparison of radioactive and stable isotope tracer techniques for measuring photosynthesis: ^{13}C and ^{14}C uptake by marine phytoplankton. *J. Plankton Res.*, 6 249-257.
- Steeman-Nielsen, E., 1952. The use of radioactive carbon (^{14}C) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 18 117-140.
- Stigebrandt, A., 1991. Computations of oxygen fluxes through the sea surface and the net production of organic matter with application to the Baltic and adjacent seas. *Limnol. Oceanogr.*, 36 (3): 444-454.
- Svendsen, H., 1997. Physical oceanography and marine ecosystems: Some illustrative examples. *Sci. Mar. Barc.*, 61 (suppl. 1): 93-108.

- Swaney, D. P., *et al.*, 1999. A novel approach for estimating ecosystem production and respiration in estuaries: Application to the oligohaline and mesohaline Hudson River. *Limnol. Oceanogr.*, 44 (6): 1509-1521.
- Tans, P. P., *et al.*, 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 247 1431-1438.
- Thomann, R. V. i Mueller, J. A., 1987. "Dissolved oxygen", a *Principles of surface water quality modelling and control*, 261-384. Harper & Row, New York.
- UNESCO, 1973. International oceanographic tables, 2:
- Valiela, I., 1995. Marine Ecological Processes:
- Wanninkhof, R., 1992. Relationship between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97 (C5): 7373-7382.
- Welch, H. C., 1968. Use of modified diurnal curves for the measurement of metabolism in standing water. *Limnol. Oceanogr.*, 13 679-687.
- Witek, Z., *et al.*, 1999. Primary production and decomposition of organic matter in the epipelagic zone of the Gulf of Gdansk, an estuary of the Vistula. *Ices Journal of Marine Science*, 56 3-14.
- Wolf, D. K. i Thorpe, S. A., 1991. Bubbles and the air-sea exchange of gases in near-saturation conditions. *J. Mar. Res.*, 49 435-466.
- Yentsch, C. S., 1980. "Light attenuation and phytoplankton photosynthesis", a *The Physiological Ecology of Phytoplankton*, 95-125. University of California, Berkeley.
- Yentsch, C. S. i Menzel, D. W., 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Research*, 10 221-231.