Agència
de Gestió d'Ajuts
Universitaris
i de Recerca

Memòria justificativa de recerca de les convocatòries BCC, BE, BP, CTP-AIRE, DEBEQ, FI, INEFC, NANOS i PIV

La memòria justificativa consta de les dues parts que venen a continuació:
1.- Dades bàsiques i resums
2.- Memòria del treball (informe científic)

Tots els camps són obligatoris

1.- Dades bàsiques i resums

Nom de la convocatòria

FI

Llegenda per a les convocatòries:

BCC	Convocatòria de beques per a joves membres de comunitats catalanes a l'exterior
BE	Beques per a estades per a la recerca fora de Catalunya
BP	Convocatòria d'ajuts postdoctorals dins del programa Beatriu de Pinós
CTP-AIRE	Ajuts per accions de cooperació en el marc de la comunitat de treball dels Pirineus. Ajuts de mobilitat de personal investigador.
DEBEQ (Modalitat A3)	Beques de Cooperació Internacional i Desenvolupament
FI	Beques predoctorals per a la formació de personal investigador
INEFC	Beques predoctorals i de col·laboració, dins de l'àmbit de l'educació física i l'esport i les ciències aplicades a l'esport
NANOS	Beques de recerca per a la formació en el camp de les nanotecnologies
PIV	Beques de recerca per a professors i investigadors visitants a Catalunya

Títol del projecte: ha de sintetitzar la temàtica científica del vostre document.
Índexos indicadors de l'estat de l'ecosistema costaner: influència dels factors físico-químics en l'ecologia del plàncton

Dades de l'investigador o beneficiari

Nom	Cognoms
Estela	Romero Sotoca

Correu electrònic
estela@icm.csic.es

Dades del centre d'origen

Institut de Ciències del Mar (CMIMA-CSIC)
Pg. Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003 Barcelona

Agència
de Gestió d'Ajuts
Universitaris
i de Recerca

Número d'expedient
2008FIR 00006

Paraules clau: cal que esmenteu cinc conceptes que defineixin el contingut de la vostra memòria.
indicadors; ecosistema costaner; plàncton; Mediterrània NO; condicionants físico-químics

Data de presentació de la justificació
19/01/2009

Nom i cognoms i signatura
del/de la investigador/a

Visttiplau del/de la responsable de la
sol·licitud

Generalitat de Catalunya
Departament d'Innovació,
Universitats i Empresa

Resum del projecte: cal adjuntar dos resums del document, l'un en anglès i l'altre en la llengua del document, on s'esmenti la durada de l'acció

Resum en la llengua del projecte (màxim 300 paraules)

La tesi aborda l'estudi multiescala de la relació entre la variabilitat de la turbulència i els nutrients, i l'estructura i la dinàmica de l'ecosistema costaner en el Mediterrani noroccidental.
A partir d'experiments al laboratori i de diferents campanyes al mar, es pretén generar indicadors de funcionament de l'ecosistema planctònic sensibles a variacions hidrodinàmiques. L'efecte conjunt de la turbulència i els nutrients es preveu condicionat no únicament per la magnitud d'ambdues variables, sino també per la relació temporal entre els episodis de turbulència i els aports de nutrients. Per tal de tenir una casuística més àmplia de validació dels indicadors, s'han seleccionat tres àrees d'estudi properes a les desembocadures de rius amb aports de nutrients de concentracions relatives molt variables. La finalitat última del treball és millorar la comprensió del funcionament de l'ecosistema costaner en la interfase terra-mar per a una gestió més eficaç dels recursos.

Resum en anglès (màxim 300 paraules)

The PhD addresses the multiscale study of the variability of turbulence and nutrient load in relation to the structure and dynamics of the coastal ecosystem in the NW Mediterranean. We aim to derive indices of ecosystem function from laboratory experiments and sea surveys. The joint effect of turbulence and nutrient load on the dynamics of the coastal system is thought to be conditioned not only by the relative composition of different nutritive salts, but also by the temporal matching of turbulence and nutrient input events. To test the indices within a wider framework, we have selected field sites in the proximity of river discharges that present a range of nutrient load characteristics. The overall goal of the project is to better understand the functioning of the coastal ecosystem as a land-ocean interface for an optimised management of its resources.

Resum en anglès (màxim 300 paraules) – continuació -.

2.- Memòria del treball (informe científic sense limitació de paraules). Pot incloure altres fitxers de qualsevol mena, no més grans de 10 MB cadascun d'ells.

MEMÒRIA JUSTIFICATIVA DE RECERCA BECA FI

RESUM CATALÀ

La tesi aborda l'estudi multiescala de la relació entre la variabilitat de la turbulència i els nutrients, i l'estructura i la dinàmica de l'ecosistema costaner en el Mediterrani noroccidental. A partir d'experiments al laboratori i de diferents campanyes al mar, es pretén generar indicadors de funcionament de l'ecosistema planctònic sensibles a variacions hidrodinàmiques. L'efecte conjunt de la turbulència i els nutrients es preveu condicionat no únicament per la magnitud d'ambdues variables, sino també per la relació temporal entre els episodis de turbulència i els aports de nutrients. Per tal de tenir una casuística més àmplia de validació dels indicadors, s'han seleccionat tres àrees d'estudi properes a les desembocadures de rius amb aports de nutrients de concentracions relatives molt variables. La finalitat última del treball és millorar la comprensió del funcionament de l'ecosistema costaner en la interfase terra-mar per a una gestió més eficaç dels recursos.

RESUM ANGLÈS

The PhD addresses the multiscale study of the variability of turbulence and nutrient load in relation to the structure and dynamics of the coastal ecosystem in the NW Mediterranean. We aim to derive indices of ecosystem function from laboratory experiments and sea surveys. The joint effect of turbulence and nutrient load on the dynamics of the coastal system is thought to be conditioned not only by the relative composition of different nutritive salts, but also by the temporal matching of turbulence and nutrient input events. To test the indices within a wider framework, we have selected field sites in the proximity of river discharges that present a range of nutrient load characteristics. The overall goal of the project is to better understand the functioning of the coastal ecosystem as a land-ocean interface for an optimised management of its resources.

INTRODUCCIÓ

I. Definició del projecte

L'eutrofització costanera és avui en dia un fenòmen generalitzat degut a l'augment en l'aport de nutrients inorgànics als nostres litorals (Cloern 2001, Mackenzie *et al*. 2002). Una part creixent de la humanitat viu en zones costaneres i per tant aquesta influència sobre el funcionament de l'ecosistema tendeix a augmentar (Intergovernmental Panel on Climate Change 2001). Simultàniament, hi ha una creixent estabilització del litoral (deguda en part a la construcció de ports, dics i altres infrastructures), que disminueix notablement el moviment de les masses d'aigua a prop de la línia de costa, i que permet l'aparició de zones d'aigua confinades favorables pel desenvolupament d'espècies nocives. L'eutrofització i les proliferacions algals nocives (Garcés *et al*. 2001) causen una creixent alarma social i tenen repercussions econòmiques (turisme, pesqueries), de salut pública i de sostenibilitat ambiental. En aquest context, la interacció entre els factors turbulència-nutrients a la zona costanera és un camp d'estudi molt interessant, i pot ser clau per a millorar la nostra comprensió sobre el funcionament dels sistemes planctònics i derivar-ne mesures de gestió.

Paral.lelament, nombrosos estudis experimentals han evidenciat al llarg dels últims anys que els efectes de la turbulència sobre les comunitats planctòniques varien significativament en funció de la concentració de nutrients en el medi (Petersen *et al*. 1998, Arin *et al*. 2002, Peters *et al*. 2002, Maar *et al*. 2002). Tenint en compte aquests resultats, establim com a hipòtesi de partida per a la definició del projecte que els gradients en la concentració i composició relativa de nutrients al llarg d'una zona costanera influiran en la resposta de l'ecosistema envers la turbulència. En zones amb concentracions altes de nutrients, es prediu que la turbulència afavorirà els organismes osmotròfics més grans i

potenciarà la xarxa tròfica clàssica, mentre que en aigües oligotròfiques la turbulència pot produir canvis en l'estequiometria de la matèria orgànica particulada i un increment en la fracció d'organismes heteròtrofs.

D'altra banda, donada la complexitat d'interaccions entre els organismes i els múltiples efectes de la turbulència sobre la comunitat, inferir la resposta conjunta del sistema a partir de la suma dels efectes sobre organismes i processos individuals resulta particularment difícil; es fa necessària la definició d'índexs integradors del sistema, paràmetres que engloben diversos efectes i que, combinats, poden oferir un diagnòstic més clar sobre l'estat del sistema.

II. Objectius

La tesi està centrada en l'elaboració d'índexs que ens aportin informació ràpida i fiable sobre l'estat del sistema costaner i en l'estudi de la resposta d'aquests índexs a diversos paràmetres ambientals (essencialment, concentració de nutrients i turbulència), a fi de millorar la nostra comprensió sobre el funcionament de l'ecosistema litoral i gestionar d'una manera més eficaç els seus recursos.

De manera més específica, es pretén:

► Revisió i sistematització de dades procedents d'estudis experimentals i/o campanyes prèvies, aprofitant la llarga trajectòria en la investigació de la turbulència de petita escala a l'Institut de Ciències del Mar.

► Identificació de les variables físiques amb més influència sobre els organismes, i complementàriament, identificació dels grups d'organismes amb una resposta més sensible als canvis. Els indicadors d'estat han de donar informació sobre la complexitat del sistema, però per al seu ús pràctic, és imprescindible la simplicitat de càlcul. En aquest sentit, és fonamental destriar en primer terme quins factors expliquen la major part de la variabilitat de les dades, i quines variables presenten una resposta més sistemàtica i més sensible als canvis, perquè seran aquestes variables les que ens permetin detectar variacions subtils en el medi i preveure'n la resposta del sistema.

► Comparació entre la resposta de la comunitat planctònica en experiments amb microcosmos i les dades de mar obert. La majoria d'estudis experimentals sobre els efectes de la turbulència de petita escala es realitzen amb una turbulència de magnitud constant en el temps i de duració variable (habitualment, entre 3-6 dies); malgrat que generalment el valor absolut de la turbulència que s'aplica i la duració dels events són ajustats als valors reals que trobem al medi (Guadayol and Peters 2006), la turbulència a la zona costanera no és constant en el temps, i està molt determinada pel règim de vents, el trencament de les onades i fenòmens meteorològics variables, com les brises diàries o el pas de fronts. És interessant, en conseqüència, comparar fins a quin punt els resultats derivats d'experiments –que permeten simplificar els vectors ambientals- coincideixen amb els valors que se n'obtenen a les campanyes al mar i plantejar, en cas de trobar moltes divergències, quines de les variables prefixades als experiments amb microcosmos són susceptibles de modificar-se en futurs estudis.

► Aplicació i qualitat dels índexos; validació amb experiments i campanyes. Les premises teòriques derivades de la bibliografia i l'estudi estadístic de les dades ens han permès definir uns primers índexs, l'efectivitat dels quals caldrà validar sistemàticament amb els resultats de noves campanyes i experiments. D'entre els paràmetres potencialment vàlids com a indicadors, tanmateix, cal seleccionar aquells que siguin sintètics i fàcils d'obtenir, comprensibles per gestors no especialitzats, i útils en un rang ample de condicions ambientals (en el nostre cas, el ventall de condicions ambientals en què cal garantir la utilitat dels indicadors està referit a zones costaneres amb un gradient en la concentració de nutrients -aigües oligotròfiques o eutròfiques-, en la composició relativa d'aquests nutrients -variacions en el quocient amoni:nitrat, per exemple-, en la magnitud de la turbulència o en la duració dels episodis turbulents). Això exigeix l'establiment de criteris clars quant a l'anàlisi i els mètodes de càlcul de l'indicador (què cal i què no cal incloure?), els valors llindar a partir dels quals considerem importants els canvis en l'ecosistema (quina magnitud de l'indicador s'associa a cada estat del medi? quina variació cal detectar-ne per a considerar que es produeixen canvis lleus/greus?) i la variació dels indicadors en resposta als canvis ambientals (si augmenta la càrrega de nutrients, com s'espera que varïi el nostre indicador?).

III. Estat de l'art

D'entre els múltiples condicionants ambientals que modulen el funcionament dels ecosistemes planctònics, la turbulència ha estat una de les variables físiques estudiades al llarg dels últims anys. La vida del plàncton implica, per definició, suspensió i deriva a la columna d'aigua, de manera que les propietats hidrodinàmiques del medi aquàtic juguen un paper destacat en l'ecologia i la dinàmica de les comunitats planctòniques (Margalef 1978, Estrada and Berdalet 1997).

El rang d'escales en què opera la turbulència és ample. A gran escala, per exemple, la turbulència afecta un gran nombre de processos biològics, especialment aquells relacionats amb la distribució dels organismes a l'aigua; el seu efecte és clar en els afloraments -en què masses d'aigua profundes i riques en nutrients entren en contacte amb els organismes presents a les capes d'aigua més superficials-, en l'acumulació o dispersió de poblacions amb altes densitats de cèl.lules, o en l'advecció d'organismes cap a llocs diferents de les seves àrees de creixement i producció (Thomas *et al*. 1997, Peters and Marrasé, 2000).

A petita escala, els efectes de la turbulència sobre el plàncton constitueixen un camp d'estudi encara molt obert. En termes generals, la turbulència de petita escala pot accelerar els processos de captació de nutrients i les relacions tròfiques entre organismes, i produir per tant un increment en els fluxos de matèria i energia entre els diferents components de la comunitat planctònica. Els resultats experimentals han demostrat, per exemple, un augment en la probabilitat d'encontre entre depredadors i preses (Rothschild and Osborn 1988, Marrasé *et al*. 1990, Saiz *et al*. 1992, Peters and Gross 1994, Saiz and Kiørboe 1995), increments en els coeficients de difusió de nutrients dels organismes osmotròfics (Lazier and Mann 1989, Karp-Boss *et al*. 1996) i un paper fonamental de la turbulència en la formació i dissolució d'agregats i neu marina (Ruiz 1996, Kiørboe 1997).

Particularment suggestius són alguns estudis experimentals en què es planteja que la turbulència de petita escala afecta de manera diferencial a la comunitat planctònica en funció de la disponibilitat de nutrients en el medi. Així, en condicions d'excés de nutrients s'afavoreix el creixement dels osmòtrofs més grans, i el sistema tendeix a l'autotròfia (Arin *et al*. 2002, Alcaraz *et al*. 2002, Malits *et al*. 2004, Peters *et al*. 2004), mentre que amb limitació de nutrients la turbulència beneficia particularment els organismes heterotròfics (Peters *et al*. 2002), i trobem canvis en l'estequiometria de la matèria orgànica particulada (C:N, C:P) i en la quantitat total de carboni orgànic particulat (Maar *et al*. 2002).

Complementàriament a totes aquestes interaccions biològiques, la turbulència afecta fenòmens físics de coagulació i agregació de partícules (Kiørboe 1993, Colomer *et al*. 2005), de sedimentació de matèria orgànica particulada (Ruiz *et al*. 2004), de resuspensió de nutrients del fons marí i de transport de nutrients entre l'atmosfera i l'aigua. En conjunt, per tant, pot afavorir directament la producció de les algues més grans i afectar la dinàmica de tota la comunitat planctònica, a la vegada que comporta una entrada de nutrients en el sistema.

Els estudis previs suggereixen, en definitiva, la conveniència de considerar simultàniament la turbulència de petita escala i la càrrega de nutrients com a forçadors ambientals a l'hora d'entendre el funcionament global dels ecosistemes planctònics. En aquest sentit, considerar la turbulència com a forçador implica un avantatge logístic clar, ja que aquest paràmetre es pot derivar de sèries temporals de variables meteorològiques, com ara la intensitat del vent, que actualment estan disponibles arreu.
Malgrat la complexitat i la simultaneïtat d'efectes sobre els components biològics i les variables físiques, existeixen paràmetres químico-biològics (carboni orgànic particulat, biomassa autòtrofs respecte biomassa total, biomassa bacteriana respecte biomassa osmotròfica total, etc.) que reflexen la derivació del carboni orgànic cap a nivells tròfics superiors, o bé l'increment de la respiració i el desenvolupament de xarxes tròfiques microbianes, i que poden ser molt útils per a avaluar la resposta conjunta de la comunitat envers els canvis en la turbulència o en la concentració de nutrients. Són, de fet, paràmetres susceptibles de convertir-se en indicadors d'estat, índexos integradors de la funcionalitat del sistema amb un interès pràctic evident, no només des d'un punt de vista estrictament científic sinó amb una clara visió de futur quant a la gestió costanera.

En sistemes oligotròfics com el Mediterrani noroccidental –amb una climatologia caracteritzada per precipitacions irregulars i fortes tempestes-, i especialment en zones costaneres densament poblades –com succeeix al litoral català-, la variabilitat temporal d'ambdós factors (turbulència i nutrients, s'entén) és molt acusada, i sovint comporta pics intermitents de producció primària. Més enllà dels canvis immediats en el sistema, aquests pics són essencials per entendre, almenys parcialment, el desenvolupament de xarxes tròfiques més complexes i/o l'aparició de proliferacions algals massives.

En aquestes circumstàncies, és possible identificar variables d'estat sensibles a la càrrega de nutrients i a la turbulència de petita escala? Es poden inferir tendències en la resposta conjunta de la comunitat planctònica? Es compleixen en mar obert les tendències que apunten els treballs experimentals? La tesi té la intenció de donar resposta a aquestes tres preguntes, i de definir uns primers indicadors d'estat que ens permetin caracteritzar el funcionament l'ecosistema.

METODOLOGIA i PLA DE TREBALL

I. Esquema general

La variabilitat de la turbulència i la càrrega de nutrients i la seva relació amb els canvis en la comunitat planctònica s'han estudiat per mitjà de dues aproximacions:

1. Campanyes de mar obert, en tres emplaçaments de la costa catalana propers a la desembocadura de rius i sotmesos a un aport molt variable de nutrients.

A banda de la importància evident de la càrrega absoluta de nutrients en l'aigua per al creixement dels organismes, els estudis experimentals demostren variacions en la comunitat planctònica en funció de la disponibilitat relativa dels diferents nutrients (nitrat, amoni, fosfat, silicat). La influència antropogènica sobre les aigües litorals comporta normalment l'entrada d'amoni (zones urbanes), nitrat (regions agrícoles) i fosfat, i llurs proporcions varien al llarg de la línia de costa (Taula 1). Els nostres tres punts de mostreig (Fig. 1) pretenen recollir aquesta variabilitat: el litoral barceloní –desembocadura del Llobregat-, està majoritàriament carregat d'amoni; a la desembocadura de la Tordera és majoritari el nitrat, encara que en concentracions relativament baixes; a les aigües del Delta de l'Ebre també és majoritari el nitrat, però en concentracions substancialment més altes, procedent de la fertilització de conreus. La comparació creuada entre els tres emplaçaments ens permet avaluar les interaccions entre la turbulència i la font de nitrogen (els enriquiments induïts als experiments de microcosmos es fan tradicionalment amb nitrat com a única font de nitrogen), i comprovar en quina mesura l'abundància majoritària d'amoni o nitrat influeix en la distribució d'espècies –d'acord amb els plantejaments de Dortch (1990), l'amoni és un compost de més fàcil assimilació que el nitrat per part d'alguns organismes, i aquestes diferències poden determinar canvis en la composició de la comunitat-.

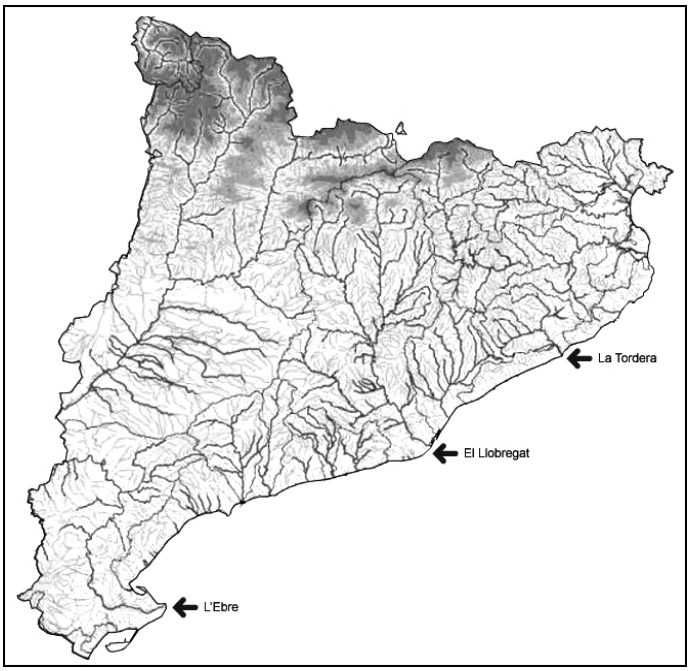

Fig. 1. Mapa de la zona costanera catalana amb els tres punts de mostreig previstos a l'estudi.

Les zones d'estudi s'han seleccionat també per la seva importància estratègica quant a la correcta gestió dels recursos: en el riu Llobregat és fonamental el control de la contaminació per residus urbans i la qualitat de l'aigua, l'Ebre té un interès clar en temes d'aqüicultura, i la regió de la Tordera, amb la Costa Brava i la costa del Maresme, és un destí d'importància turística evident.

Durant les campanyes es mostrejà de manera intensiva la zona d'estudi, amb tres o quatre sortides diàries per a la recollida de mostres (9:00, 12:00, 15:00 i 18:00 hores). Aquesta freqüència de mostreig ens permet estimar, en cas que existeixin, les variacions en el sistema degudes a la brisa diària. Es van fer perfils verticals amb un CTD i un espectroradiòmetre, i es van agafar mostres per a la determinació de paràmetres químics (nutrients, matèria orgànica particulada) i biològics (clorofil.la a, bacteris, picofitoplàncton, flagel.lats autotròfics i heterotròfics). Les campanyes tenien una duració d'una setmana, de manera que es pogués obtenir informació dels paràmetres d'interès durant, almenys, un pas de front meteorològic (els fronts estan associats a canvis en la intensitat de la turbulència, i és per tant molt interessant veure els seus efectes sobre les variables del sistema).

Taula 1. Dades de la zona costanera catalana (en promig) pel període 1994-2001. Concentracions en µmol L^{-1}, excepte la clorofil.la *a* (µg L^{-1}). Font: Programa de Vigilància i Control de la Qualitat de les Aigües Litorals. Conveni ACA-CMIMA (CSIC).

Paràmetre	Tordera	Llobregat	Ebre
clorofil.la *a*	0.60	4.67	3.33
NO_3^-	4.66	2.31	4.63
NO_2^-	0.16	0.38	0.36
NH_4^+	0.52	3.48	1.23
PO_4^{3-}	0.21	0.55	0.07
SiO_4^-	4.16	2.36	4.37

2. Experiments de laboratori amb aigües costaneres. Les campanyes de mar obert són essencials per a garantir la validesa dels índexs, però la convergència de factors ambientals en les dades *in situ* fa sovint molt difícil destriar les variables amb més pes sobre la comunitat. Els experiments de laboratori són òptims, en aquest sentit, per a simplificar els condicionants físics, i ajuden a entendre els efectes per separat de cada factor (turbulència/no turbulència, enriquiments amb amoni, enriquiments amb nitrat). Per aquesta raó, simultàniament als mostreigs al mar es van portar a terme experiments amb microcosmos, en què es combinava l'efecte de la turbulència de petita escala amb diferents proporcions en la càrrega de nitrat i amoni en l'aigua.

Els experiments han seguit la metodologia emprada fins ara pel grup d'investigació dintre del qual es desenvolupa la tesi, i això ha permès la comparació directa amb els resultats d'estudis anteriors. A grans trets, els experiments es van realitzar amb microcosmos de metacrilat de 15 L, que s'omplien amb aigua de mar filtrada per 200 µm i es mantenien durant 4 dies en cambres experimentals (Fig. 2). Les condicions de llum, temperatura i el cicle dia:nit s'ajustaven a les corresponents per cada època de l'any. La meitat dels contenidors eren sotmesos a turbulència constant amb un sistema de reixetes d'oscil.lació vertical (Peters *et al*. 2002), i l'altra meitat es mantenien quiets. L'addició de nutrients es feia en una única dosi a l'inici dels experiments.

Els microcosmos es mostrejaven diàriament per a l'anàlisi dels diferents paràmetres d'estudi. A fi de separar els efectes directes de la turbulència sobre l'activitat dels organismes d'aquells deguts simplement a la resuspensió de material, el darrer dia d'experiment tots els microcosmos s'agitaven enèrgicament durant uns minuts (assegurant-se que el material dipositat al fons es resuspengués) i es tornaven a mostrejar.

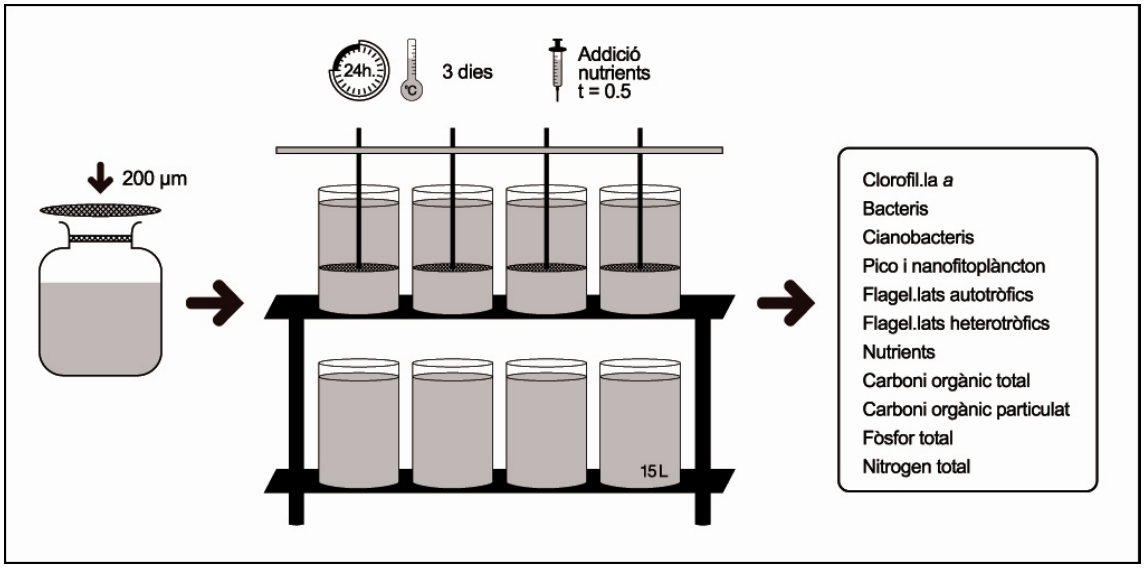

Fig. 2. Sistema experimental i variables biològiques i físico-químiques que s'analitzaven durant els experiments.

II. Mètodes estadístics

El càlcul d'índexos s'ha fet, en tots dos casos (dades experimentals i dades procedents de campanyes), a través de l'estudi estadístic de les variables mesurades. S'han fet servir, entre d'altres:

► regressions simples i múltiples per a trobar relacions entre les variables ambientals, o combinacions entre paràmetres biològics i els elements forçadors;

► mètodes d'anàlisi de sèries temporals (anàlisi de Fourier i correlacions creuades) per a extreure'n patrons estacionals i retards en la resposta dels organismes;

► anàlisi de conglomerats (cluster analysis) i anàlisi de components principals (PCA) per a identificar les variables més significatives d'entre el total;

► anàlisis de variança i covariança (sobretot en l'estudi dels resultats experimentals) per a estimar la contribució per separat de turbulència i càrrega de nutrients sobre les variables d'estudi, i per a determinar possibles sinèrgies.

III. Mètodes d'anàlisi específics

La consecució del treball ha exigit fet servir molts tipus de variables biològiques, químiques i físiques, i s'han hagut d'aprendre nombroses tècniques d'anàlisi. En la majoria dels casos s'han seguit protocols tècnics establerts a la literatura. De manera resumida:

Variables biològiques

► Clorofil.la *a* (total i fraccionada). Es mesura per fluorimetria, d'acord al procediment descrit per Yentsch & Menzel (1963).

► Bacteris. La concentració i el tamany promig de les cèl.lules es determinen per citometria de flux (Gasol & del Giorgio 2000).

► Cianobacteris, pico i nanofitoplàncton. Com pels bacteris heterotròfics, la concentració i el tamany promig de les cèl.lules es determinen per citometria de flux (Gasol & del Giorgio 2000).

► Nanoflagel.lats autotròfics i heterotròfics. Filtració, tinció i recomptes amb el microscopi d'epifluorescència seguint la metodologia descrita per Porter & Feig (1980).

► Microfitoplàncton. Cambres de sedimentació (50 cm^3) i recomptes al microscopi invertit (Utermöhl 1958). Els organismes es classifiquen fins a la categoria taxonòmica més baixa possible.

Variables químiques

► Nutrients inorgànics (nitrat, nitrit, amoni, fosfat i silicat). Les concentracions de nutrients inorgànics es determinen amb un autoanalitzador Alliance Evolution II seguint els mètodes de Grasshoff *et al.* (1999) amb petites modificacions.

► Carboni orgànic total, nitrogen total. Anàlisi per acidificació í oxidació a 680ºC amb un analitzador automàtic (Shimadzu Total Organic Carbon Analyzer).

► Carboni i nitrogen orgànic particulat. Les mostres es recullen sobre filtres muflats a 450ºC i es mesuren amb un analitzador Perkin Elmer 2400 CHN. Un estàndard d'acetanilida es fa servir diàriament durant les anàlisis. La precisió del mètode per a carboni i nitrogen és de ±0.3 µmol C L^{-1} i ±0.1 µmol N L^{-1}, respectivament.

► Fòsfor total. Es determina per oxidació humida i colorimetria (Grasshoff *et al*. 1999). Les lectures es fan a 880 nm amb un espectrofotòmetre CaryWin UV.

► Fòsfor orgànic particulat. El material particulat es recull per filtració i la concentració de fòsfor en els filtres es determina, com en el cas del fòsfor total, per oxidació humida i colorimetria (Grasshoff *et al*. 1999).

Variables físiques

► Meteorològiques: hem processat fonamentalment dades de pressió, temperatura, precipitació, irradiància, velocitat i direcció del vent. Sèries temporals de quatre anys de dades. Origen de les dades: Estació meteorològica de la platja de Bogatell (Agència Estatal de Meteorologia), Observatori Fabra (Meteocat), Estació de Malgrat de Mar (Meteocat) i Estació dels Alfacs, al Delta de l'Ebre (Meteocat).

► Oceanogràfiques: s'han fet servir també sèries temporals (3-4 anys) de dades oceanogràfiques, fonamentalment alçada d'ona, alçada màxima d'ona, alçada significativa i temperatura de l'aigua. Origen de les dades: boia del Port de Barcelona (Puertos del Estado), boia del Llobregat (xarxa de boies de la Generalitat de Catalunya) i boia de Blanes (xarxa de boies de la Generalitat de Catalunya).

IV. Pla de treball

L'esquema general plantejat per la tesi s'ha desglossat en 4 activitats principals, totes elles acomplertes:

Activitat 1. Campanyes de mostreig al mar.

Les campanyes de mostreig a mar obert han estat de 2 tipus:

► Campanyes intensives, amb mostreigs d'alta freqüència. S'han portat a terme 3 campanyes intensives: dues al litoral barceloní (novembre del 2005, abril del 2006), i una al Delta de l'Ebre (octubre de 2007). Dissortadament, les limitacions econòmiques del projecte van impedir que es portés a terme una quarta campanya al nostre darrer punt d'interès, a les proximitats de la Tordera (Blanes). Les anàlisis comparatives per aquesta localització van fer-se amb dades bibliogràfiques, donada la llarga trajectòria d'estudi en aquesta zona pels grups de l'Institut de Ciències del Mar.

► Campanyes de mostreig mensual en una localització fixa. Tant els estudis de la literatura com la trajectòria de recerca del nostre grup d'investigació han permès constatar la importància de l'estacionalitat a les aigües de la costa catalana. En aquest sentit, a fi de complementar les dades de les campanyes intensives i de posar en context la magnitud de la variabilitat horària, vàrem decidir portar a terme mostreigs mensuals. Per qüestions logístiques (facilitat de transport i processament de les mostres, col.laboració entre diversos grups de l'ICM), es va triar com a localització preferent la costa barcelonina. Des de la tardor de 2005 -enguany més de

3 anys de dades- es mostreja un punt en què hi ha instal.lat un sensor de turbulència, a 3m de fondària, i que està inclòs a la zona mostrejada durant les campanyes intensives (de manera que les comparacions són directes). Com en el cas d'aquestes campanyes, durant els mostreigs mensuals es recullen mostres d'aigua per a l'anàlisi de nutrients i la caracterització del plàncton. Les dades mensuals ens permeten tenir un registre temporal llarg de les diferents variables, establir un rang de valors promig anuals i tenir una referència per a avaluar fins a quin punt les variacions diürnes modifiquen la comunitat planctònica.

Activitat 2. Experiments al laboratori, amb enriquiments induïts i turbulència.

Paral.lelament a les campanyes s'han realitzat dos experiments de microcosmos en què vàrem afegir nitrat i amoni en proporcions similars a les que trobem als tres punts de refèrencia establerts per la costa catalana. A l'experiment de la tardor (novembre 2005) les addicions de nutrients es van fer amb una relació nitrat:amoni d'aproximadament 6:1 i 1:3 (amb una càrrega total del nutrient majoritari de 7µM, fosfat i silicat afegits en concentracions Redfield respecte d'aquest valor), mentre que durant el segon experiment (abril 2006) vàrem fixar les ratios nitrat:amoni en 4:1 i 1:4 (càrrega màxima de 4 µM pel nutrient majoritari, fosfat i silicat afegits en concentracions Redfield). La metodologia general dels experiments i les variables analitzades estan resumides al capítol d'esquema general.

Activitat 3. Estudi de la variabilitat derivada de fenòmens puntuals: deposició atmosfèrica i tempestes de pols.

► L'estudi de les dades de nutrients inorgànics procedents de la primera campanya intensiva, i la poca coincidència entre la seva dinàmica temporal i els canvis en les masses d'aigua van suggerir la idea que els aports atmosfèrics a les aigües costaneres de Barcelona jugaven un paper més destacat del previst inicialment. Amb la intenció d'estimar de forma aproximada el flux de nutrients que podia arribar al mar per deposició seca, vàrem encetar una sèrie d'experiments en què analitzàvem el canvi diari en les concentracions de nutrients inorgànics dissolts en aigua de mar. Vàrem col.locar pots amb diferents volums d'aigua de mar filtrada al terrat de l'Institut (Fig. 3) i analitzàvem les variacions diàries en la concentració de nitrat, nitrit, silicat, fosfat i amoni dels tubs exposats respecte d'uns controls tapats. Les mesures de deposició seca van incorporar-se de forma rutinària durant la segona campanya intensiva. Els resultats d'aquestes proves demostren que, malgrat l'extrema variabilitat diària i espacial que s'hi troba, la contribució atmosfèrica en la concentració de nutrients sovint no és negligible (particularment en zones costaneres properes a grans nuclis urbans, com en el cas de Barcelona).

Fig. 3: Sistema de pots amb diferents relacions superfície:volum per al càlcul de la deposició seca. Van fer-se proves amb diferents tipus d'aigua (filtrada, autoclavada i aigua de mar artificial) i diferents tipus de pots, i va estimar-se el nombre mínim de pots necessaris per a obtenir la mínima variabilitat en les anàlisis.

► En aquesta línia d'estudi de la influència de fenòmens puntuals sobre la dinàmica del plàncton convé destacar la participació en l'experiment Sahara Dust (que estudia els efectes sobre la producció oceànica dels episodis de pols sahariana). L'arribada de pols sahariana és freqüent a la Mediterrània, donada la proximitat amb el continent africà, i els efectes de la pols sobre l'estructura i la dinàmica de les comunitats planctòniques són encara poc coneguts. Alguns estudis evidencien una estimulació dels organismes autotròfics més petits (diversos grups de cianobacteris i petits flagel.lats) mentre que en altres treballs es demostren increments en l'activitat bacteriana.

L'experiment es va portar a terme durant el maig del 2006 i va fer-se en col.laboració amb investigadors del Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer, França. El disseny experimental va ser semblant al de la resta d'experiments (exposat anteriorment). Les particularitats es detallen a l'apartat de Resultats. Al marge de l'interès *per se* que té l'estudi de la deposició de partícules de pols sobre els oceans, en el marc general de la tesi aquestes dades poden servir per a definir la resposta dels indicadors durant events puntuals d'entrada de nutrients (continguts a la pols), i poden relacionar-se amb les entrades de nutrients procedents d'aigües fluvials i amb les proves de deposició atmosfèrica que hem portat a terme.

Activitat 4. Comparació amb índexos desenvolupats per altres regions.

Malgrat que la tesi està molt emmarcada en la zona costanera de la Mediterrània NO, la derivació d'índexs té una vocació d'ús més general, i en aquest sentit és força interessant veure fins a quin punt els nostres paràmetres indicadors són vàlids en altres zones i en quina mesura els esforços que s'han portat a terme en altres regions per a obtenir paràmetres semblants són adequats per a les nostres aigües. L'estada de recerca amb el grup del Prof. Paul Tett (octubre 2006- febrer 2007) va ser molt útil en aquest aspecte: ens va permetre aplicar tècniques d'aquest grup a les nostres dades i comparar ambdues aproximacions. Els detalls de la recerca amb el grup escocès s'expliquen més endavant, a l'apartat de Resultats.

RESULTATS

Per tal de seguir una seqüència lògica i facilitar la lectura dels resultats, aquest apartat s'ha dividit en 4 parts directament relacionades amb les 4 activitats de recerca, i que han de constituir els diferents capítols de la tesi. En tots els casos s'inclou una síntesi breu dels principals resultats.

I. Experiments al laboratori: com respon la comunitat planctònica als canvis en la turbulència i la càrrega de nutrients?

Com s'argumenta en la descripció de l'esquema general de la tesi, malgrat que a vegades és difícil extrapolar els resultats dels experiments de laboratori als sistemes naturals, l'experimentació al laboratori ens permet simplicar les condicions ambientals, regulant la variabilitat dels vectors del nostre interès i mantenint fixos la resta de paràmetres. Ens dóna una bona estima, per tant, de quines són les variables biològiques amb més resposta als canvis ambientals. Convé remarcar que juntament als dos experiments realitzats durant la tesi amb les aigües costaneres de Barcelona, per als estudis estadístics vam comptar amb les dades d'experiments similars que s'havien portat a terme a l'Institut amb aigua de la Badia de Blanes.

Teníem 6 tractaments (tots ells amb 2 rèpliques, Taula 2) per experiment, i per a l'anàlisi conjunta dels resultats, donada la variabilitat de les condicions inicial, les dades van estandarditzar-se respecte dels valors a temps inicial (de manera que estudiem les variacions relatives i podem comparar entre experiments). Els efectes s'estudien sempre en relació a les categories de tractament: C-A-N (amb o sense nutrients), T-S (amb o sense turbulència), i s'inclou també com a variable categòrica l'experiment (variable categòrica que integra factors molt dispars: temperatura, hores de llum, concentració de nutrients, composició inicial de la comunitat planctònica, etc.). En el cas de les variables analitzades únicament a temps inicial i final (donat que amb dades estandarditzades, cal eliminar en les comparacions el temps 0), es van fer servir ANOVAs factorials, que avaluen no només els efectes directes de turbulència, nutrients i experiment, sinó també les possibles interaccions. Per aquelles variables de les quals teníem dades diàries, s'han fet en canvi anàlisis de covariança (ANCOVA), en què el temps es considerava la covariable contínua.

Taula 2. Síntesi de condicions experimentals.

Tractament	Turbulència	Nutrients
CS	no	no
CT	sí	no
AS	no	addició amoni
AT	sí	addició amoni
NS	no	addició nitrat
NT	sí	addició nitrat

Cal puntualitzar que les assumpcions d'homocedasticitat i de normalitat en la distribució de les dades es van comprovar sempre prèviament a les anàlisis. L'anàlisi de covariança, d'altra banda, està pensat per a detectar de manera efectiva creixements o decreixements lineals respecte de la variable contínua, de manera que és freqüent fer-ne la transformació logarítmica dels paràmetres d'estudi (per veure exemples, consultar Thingstad et al. 2006). En el nostre cas, recordem que les anàlisis es fan sempre amb dades estandarditzades, i els experiments duren com a màxim 4 dies, de manera que tenim una única fase en la dinàmica dels organismes planctònics i l'aproximació de linealitat s'ajusta bé. Tanmateix, per garantir la correcció dels resultats es van fer anàlisis per duplicat (amb i sense logaritmes) de la majoria de variables, i els resultats obtinguts van ser, en tots els casos, els mateixos. El nivell de significació es va fixar en $p<0.05$. Totes les anàlisis estadístiques s'han fet amb el programa Statistica v.6 (StatSoft, Inc. 2001).

En els experiments fets amb aigua de Blanes, en què els enriquiments eren en forma de nitrat i amb una concentració de 4µM, tant pels flagel.lats autotròfics com pels heterotròfics les categories experiment, nutrients i turbulència, i les interaccions experiment-turbulència, experiment-nutrients són altament significatives, però la combinació nutrients-turbulència no presenta efectes diferencials. En el cas de la biomassa total (LIVC, és a dir el sumatori de la biomassa en C de bacteris, flagel.lats hetrotròfics i clorofil.la), totes les categories i les seves interaccions resulten significatives, però si ens mirem en canvi els efectes sobre la proporció de C viu respecte del C orgànic particulat total (LIVPROP), la turbulència en cap cas afecta significativament.
Els resultats per la fracció d'heteròtrofs (HETEROPROP) i de fitoplàncton petit (CHLAsmPROP) és ben similar: efecte estadísticament nul de la turbulència, i significatiu de l'experiment i els nutrients (i en el cas de la fracció d'heteròtrofs, també és significativa la combinació d'ambdós).

A la Taula 3 es presenten els resultats de les ANOVAs per les diverses variables.

En les anàlisis de covariança, a més de l'experiment, la turbulència i els nutrients s'inclou el temps com a variable contínua (covariable). Per clorofil.la a, bacteris, pico i nanoeucariotes, tant l'experiment com l'addició de nutrients són significatius, i també ho és el seu efecte conjunt. La turbulència, no obstant, és només significativa en el cas de la clorofil.la a i els bacteris (i no pas la seva interacció amb els nutrients o l'experiment). La ratio bacteris:osmòtrofs està afectada pel temps i per l'experiment, però ni turbulència ni nutrients resulten significatius. Quant a la matèria orgànica particulada, carboni, nitrogen i fòsfor presenten efectes clars per les quatre variables categòriques (experiment, nutrients, turbulència, temps), però únicament en el cas del fòsfor particulat és significativa la interacció experiment-nutrients.
La turbulència no afecta els quocients POC:PON, POC:POP, i només en el segon cas trobem efecte de l'addició de nutrients (que fa decréixer la ratio). A diferència de la resta de nutrients inorgànics, la concentració de nitrit està positivament afectada per la turbulència, i és indiferent a l'afegitó de nutrients. Les anàlisis de covariança estan sintetitzades a la Taula 4.

En els experiments amb addicions diferencials d'amoni o nitrat es van repetir molts d'aquests patrons: efecte significativament positiu de l'addició de nutrients i de la turbulència (per separat) sobre la concentració de clorofil.la *a*, alguns grups d'autòtrofs (fonamentalment, nanoflagel.lats) i la concentració de bacteris. Increment substancial (i estadísticament significatiu) de la matèria orgànica particulada amb l'afegitó de nutrients i la turbulència, però variacions negligibles dels quocients POC:PON, POC:POP.

Taula 3. Resum dels resultats en les anàlisis de variança per a les dades dels experiments de Blanes; en negreta s'indiquen les variables significatives (p-valor<0.05). Els guions indiquen variables extretes del model per la seva baixa significació.

	Paràmetres											
	ANAN		HNAN		LIVC		LIVPROP		HETEROPROP		CHLACsmPROP	
Variables	N=48	**R=0.994**	N=48	**R=0.992**	N=44	**R=0.994**	N=40	**R=0.994**	N=44	**R=0.988**	N=44	**R=0.893**
categòriques	df	p	df	p	df	p	df	p	df	p	df	p
intercept	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**
EXP	11	**0,0000**	11	**0,0000**	10	**0,0000**	9	**0,0000**	10	**0,0000**	10	**0,0001**
TURB	1	**0,0110**	1	**0,0116**	1	**0,0000**	-	-	-	-	-	-
NUTS	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0001**	1	**0,0097**
EXP*TURB	11	**0,0200**	11	**0,0483**	10	**0,0267**	-	-	-	-	-	-
EXP*NUTS	11	**0,0003**	11	**0,0001**	10	**0,0003**	9	**0,0000**	10	**0,0004**	10	0,2830
TURB*NUTS	1	0,5789	1	0,2592	1	**0,0005**	-	-	-	-	-	-

Taula 4. Resum dels resultats en les anàlisis de covariança per a les dades dels experiments de Blanes; en negreta s'indiquen les variables significatives (p-valor<0.05). Els guions indiquen variables extretes del model per la seva baixa significació.

	Paràmetres													
	CHLA		BACT		SYNE		PRO		PICO		NANO		BACTC:OSMOTRC	
Variables	N=304	**R=0.821**	N=292	**R=0.822**	N=292	**R=0.743**	N=181	**R=0.621**	N=292	**R=0.756**	N=292	**R=0.777**	N=292	**R=0.855**
categòriques	df	p	df	p	df	p	df	p	df	p	df	p	df	p
intercept	1	**0,0041**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	0,7225	1	0,1941	1	0,8850	1	**0,0000**
TEMPS	1	**0,0000**	1	0,9199	1	0,0949	1	**0,0008**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0097**
EXP	11	**0,0000**	11	**0,0000**	11	**0,0000**	6	0,7213	11	**0,0000**	11	**0,0000**	11	**0,0000**
TURB	1	**0,0007**	1	**0,0027**	1	0,0987	1	0,1456	-	-	-	-	1	0,1250
NUTS	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	0,1862	1	**0,0180**	1	**0,0000**	1	**0,0002**	1	0,2585
EXP*TURB	11	0,7537	11	0,9772	11	0,2140	6	0,3135	-	-	-	-	11	0,9969
EXP*NUTS	11	**0,0000**	11	**0,0000**	11	0,9337	6	0,0612	11	**0,0002**	11	**0,0194**	11	0,0772
TURB*NUTS	1	0,1077	1	0,1543	1	0,2934	1	0,2400	-	-	-	-	1	1,0000
EXP*TURB*NUTS	11	0,9914	11	0,9779	11	0,7048	6	0,2509	-	-	-	-	11	0,9973

	Paràmetres													
	TN		TP		POC		PON		POP		POC:PON		POC:POP	
Variables	N=119	**R=0.907**	N=279	**R=0.958**	N=183	**R=0.780**	N=194	**R=0.839**	N=274	**R=0.954**	N=182	**R=0.662**	N=152	**R=0.734**
categòriques	df	p	df	p	df	p	df	p	df	p	df	p	df	p
intercept	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0002**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0309**
TEMPS	1	**0,0008**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0262**	1	**0,0459**	1	**0,0000**
EXP	10	**0,0000**	10	**0,0000**	10	**0,0000**	11	**0,0000**	10	**0,0000**	10	**0,0000**	9	**0,0000**
TURB	1	**0,0001**	-	-	1	**0,0149**	1	**0,0046**	1	**0,0077**	-	-	-	-
NUTS	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0000**	1	**0,0079**	1	**0,0000**
EXP*TURB	10	0,1902	-	-	10	0,7317	11	0,8495	10	0,8443	-	-	-	-
EXP*NUTS	10	**0,0286**	10	**0,0000**	10	0,2098	11	0,1139	10	**0,0000**	10	0,9899	9	0,3429
TURB*NUTS	1	0,5050	-	-	1	0,2999	1	0,2010	1	0,1764	-	-	-	-
EXP*TURB*NUTS	10	0,7781	-	-	10	0,9357	11	0,9976	10	0,9978	-	-	-	-

Dissortadament, tampoc vàrem poder constatar difèrencies segons el tipus d'enriquiment: la comunitat planctònica creixia en tots els casos en què hi havia addició de nitrogen inorgànic, indiferentment de quin fos el compost de nitrogen afegit (amoni o nitrat). D'altra banda, les variacions en el fòsfor orgànic particulat semblen recollir de manera més fidel el creixement dels organismes.

En termes generals, doncs, l'addició de nutrients té efectes significatius sobre la majoria dels organismes (flagel.lats autotròfics i heterotròfics, bacteris, pico i nanoeucariotes i clorofil.la a) i també sobre l'estequiometria de la matèria orgànica particulada (baixen les ratios POC:POP, POC:PON). La comunitat respon a l'enriquiment amb un increment en la producció primària, i la corresponent incorporació de fòsfor i nitrogen. Ara bé, la font de nitrogen no sembla produir canvis substancials en l'estructura de la comunitat, ni quant a concentracions d'organismes ni quant als grups afavorits.

L'efecte de la turbulència és menys generalitzat: augmenten significativament la clorofil.la a, els flagel.lats autotròfics i els flagel.lats heterotròfics, i augmenten també els bacteris, com ja n'havien evidenciat alguns estudis previs (Peters et al. 1998, Peters et al. 2002, Malits et al. 2004). Malgrat ser en general excessivament petits com per rebre directament els efectes de la turbulència, és probable que se'n beneficiïn indirectament, com demostra el fet que la turbulència perdi significació si incloem com a covariables en les anàlisis els flagel.lats heteròtrofs i la clorofil.la a (dades no incloses). La relació bacteris:osmòtrofs, en canvi, no presenta efectes ni per turbulència ni per nutrients, potser perquè els increments de clorofil.la i bacteris són relativament similars.

La turbulència afecta els valors de carboni, nitrogen i fòsfor orgànic particulat, però no hi ha variacions significatives en els quocients POC:PON, POC:POP degudes a turbulència: s'afavoreix la incorporació de nutrients a la cèl.lula, però no es forcen canvis en l'estequiometria del material particulat. En alguns estudis anteriors, en canvi, el quocient C:N a la matèria orgànica particulada pujava amb turbulència (Arin et al. 2002, Maar et al. 2002). Únicament per la variable de C viu (biomassa total excepte zooplàncton) es troben efectes sinèrgics deguts a la interacció turbulència-nutrients, si bé en el cas de la clorofil.la a les dades crues apunten també aquesta tendència (no estadísticament significativa, tanmateix).

A excepció de l'efecte positiu de la turbulència sobre la concentració de nitrit (induïda possiblement per l'increment de la producció primària), les concentracions de nutrients inorgànics no varien significativament amb la turbulència.

Finalment, malgrat l'estandardització de les dades i l'anàlisi dels increments relatius, la categoria experiment resulta significativa en totes les variables, i posa de manifest la importància de les condicions inicials i l'estructura inicial de la comunitat en la resposta obtinguda. Al marge d'aquesta variabilitat en el plàncton, cal assenyalar que tant els efectes dels enriquiments induïts com els de la turbulència resulten estadísticament significatius al llarg de l'any, i confirmen per tant la conveniència del seu estudi com a possibles moduladors de la dinàmica planctònica.

II. Variabilitat del plàncton a la zona costanera: el gradient de condicions ambientals a prop de la costa, es reflecteix en la comunitat planctònica?

L'estudi minuciós dels resultats de les campanyes i la correlació amb les variables meteorològiques i físiques és el nucli del treball que s'està realitzant aquests darrers mesos. Donat el volum d'informació (a tall d'exemple, mencionar els tres anys de mostreigs mensuals, i les dades horàries d'onatge, temperatura, precipitació i vents corresponents a aquests més de 1000 dies), els resultats inclosos en aquesta memòria són encara parcials (estudiem conjuntament les campanyes intensives i els mostreigs mensuals, per exemple).

Grosso modo, per a detectar possibles correspondències entre les variables biològiques i els condicionants ambientals – físics i químics-, en primer terme es realitzen sistemàticament regressions simples entre totes les variables (en el cas que la relació entre alguns paràmetres no es presumeixi lineal, es fan les transformacions logarítmiques adients). Un cop examinats els primers resultats, i en funció de les relacions establertes, es proven regressions múltiples, que permeten avaluar a més a més la interacció entre diversos factors.
Finalment, atès que sovint la relació entre els organismes i les variables ambientals no és immediata, realitzem correlacions creuades amb diferents lapses temporals (fins a un màxim de 45 dies) entre les dades corresponents a clorofil.la a, bacteris, flagel.lats, nutrients inorgànics i matèria orgànica particulada, i la temperatura, precipitació, velocitat del vent i alçada d'ona significant.

Regressions simples. La clorofil.la *a* presenta correlacions significatives amb el fosfat inorgànic, el fòsfor orgànic particulat i el nitrit inorgànic. Especialment interessant és la correlació inversa amb la ratio silicat:nitrogen (Si:N), que en una anàlisi més exhaustiva per grups de fitoplàncton ens ha permès atribuir-la fonamentalment al grup de diatomees. Els bacteris van presentar únicament una relació directa amb el fòsfor orgànic particulat, i una inversa amb el nitrogen total, malgrat que van testar-se efectes lineals i no lineals amb les diferents variables. De fet, la concentració de bacteris al llarg de l'any és bastant constant (oscil.la sempre entorn a 10^6 cèl.lules ml^{-1}), de manera que trobar bones correlacions amb canvis relativament petits és difícil.

Avaluant la resposta del plàncton en base a grups funcionals i a relacions entre organismes (proporció de C heterotròfic respecte de la biomassa total, fitoplàncton petit, bacteris:osmòtrofs, fracció de C viu respecte del C orgànic particulat total), a banda de les correlacions més evidents –que podem inferir directament de les obtingudes amb cada variable per separat-, se'n troben algunes de noves. La ratio bacteris:osmòtrofs, per exemple, té una relació positiva significativa amb la concentració d'amoni, i en cap cas bacteris o clorofil.la a estan correlacionats amb aquest paràmetre. L'amoni està també positivament correlacionat amb la proporció d'heteròtrofs (C heterotròfic respecte del C viu total). El fitoplàncton més petit (flagel.lats autotròfics, cianobacteris, pico i nanoeucariotes respecte del total de clorofil.la a), al seu torn, presenta correlacions negatives amb el fosfat i amb la ratio POC:PON, i coeficients de correlació positius per a les regressions amb amoni, el quocient silicat:nitrogen i la temperatura.
A banda dels efectes entre les diverses variables biològiques, s'han estudiat possibles correlacions entre els nutrients inorgànics, la matèria orgànica particulada i els paràmetres físics. Així, a Blanes s'ha trobat una correlació positiva molt alta entre les concentracions de nitrat i silicat, i una relació negativa entre amoni i fosfat. Algunes anàlisis complementàries amb dades meteorològiques i l'estudi de les descàrregues fluvials més properes al punt de mostreig, han evidenciat la forta correlació entre els increments de nitrat i silicat i l'augment dels aports fluvials de la Tordera, i la coincidència sistemàtica d'aquestes descàrregues amb episodis de fortes pluges.

En la matèria orgànica particulada, el quocient C:N està inversament correlacionat amb l'amoni, mentre que la ratio C:P presenta una dependència positiva amb la variable silicat:nitrogen.

Regressions múltiples. Tot i que les regressions simples ens permeten identificar ràpidament possibles relacions entre les dades, sovint les variables presenten entre elles connexions més complexes, que impliquen els efectes creuats d'un o més factors. En aquestes circumstàncies, és necessari testar amb regressions múltiples els resultats obtinguts a partir de les correlacions variable a variable, i identificar-ne, en la mesura del possible, efectes sinèrgics no detectats amb les regressions simples.
Per la clorofil.la *a* es va plantejar una regressió múltiple amb nitrit, fosfat, la ratio Si:N i el fòsfor orgànic particulat, i van obtenir-se com a variables significatives totes excepte la ratio Si:N. Si en un segon pas eliminàvem el nitrit d'entre les variables d'estudi (car el suposem un subproducte de l'activitat fotosintètica), només els fosfats i el fòsfor orgànic particulat resultaven significatius. Incloent a la regressió nous factors (no significatius en les regressions simples), els resultats no variaven.

El procés d'anàlisi va ser similar per la resta de variables. En el cas dels bacteris, l'anàlisi conjunta de fòsfor orgànic particulat i nitrogen total va donar com a significatius tots dos factors ($R^2 = 0.68$), i cap de les altres variables combinades en regressions múltiples va oferir correlacions significatives. Quant a la fracció d'heteròtrofs, no varen aparèixer efectes creuats entre cap de les variables (PO_4, NH_4, Si:N) amb què sí presentava correlacions significatives per separat.

Lapses temporals. Com bé s'ha avançat a l'apartat de material i mètodes, la resposta dels organismes envers moltes variables ambientals no és pas immediata, i els canvis que generen certes variacions en el medi són únicament detectables amb un lapse temporal determinat. A fi d'avaluar en quina mesura estàvem perdent aquesta resposta tardana amb l'estudi de correlacions instantànies, vàrem efectuar correlacions creuades.

En base a aquestes correlacions creuades és molt notable la correlació positiva que existeix entre la velocitat del vent 8 dies abans dels mostreigs, i els valors de clorofil.la *a*, flagel.lats autotròfics, nitrat, nitrit i fosfat, i que coincideix amb correlacions inverses per nitrogen total, proporció d'heteròtrofs i la ratio silicat:nitrogen. Amb un lapse d'entre 3 i 6 dies, d'altra banda, la velocitat del vent presenta una bona correspondència amb el quocient nitrogen:fòsfor i el fòsfor total ($R = 0.89$ i 0.65, respectivament). Pel que fa a les precipitacions, el comportament de la majoria de variables és erràtic, si bé amb un lapse de 4-5 dies la precipitació integrada diària es correlaciona significativament amb les concentracions de nitrat, silicat, fòsfor total i la ratio N:P. Cap als 15 dies, la precipitació integrada diària està correlacionada amb la clorofil.la *a*, els bacteris, els flagel.lats autòtrofs i els heteròtrofs, i les concentracions de nitrit i nitrogen total.

Fruit de l'anàlisi estadística d'aquestes dades hem obtingut, doncs, uns resultats preliminars força interessants. Tot i llur divergència en la dinàmica temporal, per exemple, la clorofil.la a està positivament correlacionada amb el fosfat i el fòsfor orgànic particulat de manera simultània, tant a Blanes com a Barcelona. El fòsfor és un dels nutrients limitants del creixement del plàncton en el Mediterrani noroccidental (Lucea *et al.* 2005) de manera que és esperable que els organismes reaccionin ràpidament davant d'enriquiments puntuals. Assumint efectivament aquesta resposta ràpida, és coherent trobar una bona correlació entre la concentració de fosfat, la de clorofil.la a i el fòsfor orgànic particulat, i plantejar la conjunció dels tres factors com a indicativa de la ràpida incorporació del fòsfor per part dels organismes fitoplanctònics. D'altra banda, la concentració d'amoni sembla ser un perfecte indicador de la fracció de C heterotròfic, i les dinàmiques d'ambdues variables encaixen molt bé al llarg de l'any. A més, l'amoni està positivament correlacionat amb el quocient bacteris:osmòtrofs. Alguns estudis relacionen les concentracions altes d'amoni amb l'activitat dels bacteris i el reciclatge de nutrients un cop s'acaben els pics de creixement del fitoplàncton. Suposant certa aquesta premisa, l'increment de la concentració d'amoni es produïria en el moment en què també augmenten els organismes heteròtrofs (que depreden sobre el fitoplàncton). Respecte de l'estructura de la comunitat, els estudis realitzats a Blanes mostren una excel.lent correlació entre la concentració de diatomees i el quocient de silicat respecte de nitrogen dissolt (Guadayol 2007), i donen una pista sobre els canvis que podem trobar en les comunitats costaneres quan canvia la composició relativa d'aquests nutrients.

III. La variabilitat derivada de fenòmens puntuals: deposició atmosfèrica i tempestes de pols.

Deposició atmosfèrica. Com s'ha esmentat abans, les dades de nutrients inorgànics procedents de les campanyes i la poca coincidència entre la seva dinàmica temporal i els canvis en les masses d'aigua van suggerir la idea que els aports atmosfèrics a les aigües costaneres de Barcelona jugaven un paper més destacat del previst inicialment. De fet, les mesures de deposició atmòsfèrica que vàrem fer al llarg d'uns mesos ens han permès estimar quina quantitat de nutrients poden entrar diàriament a la columna d'aigua, i quina importància respecte dels nivells promig representen aquests increments. També s'ha estudiat la correlació entre episodis de deposició enregistrats *in situ* a la nostra àrea d'estudi i dades de models generals de vents i/o de models específics de deposició seca.

Els resultats d'aquest esforç han estat molt interessants: d'una banda, la validesa dels models generals de vents va quedar àmpliament confirmada (prenent com a referència events ben documentats d'arribada de pols sahariana a la costa catalana, vàrem comprovar que les trajectòries de vent que s'obtenien per aquelles dates amb els models generals passaven sempre pel desert africà); de l'altra, hem pogut constatar la forta variabilitat diària en els aports atmosfèrics (Fig. 4), i la importància d'aquestes entrades especialment en les espècies de nitrogen, que poden incrementar la seva concentració a l'aigua en gairebé un 70% (Taula 5).

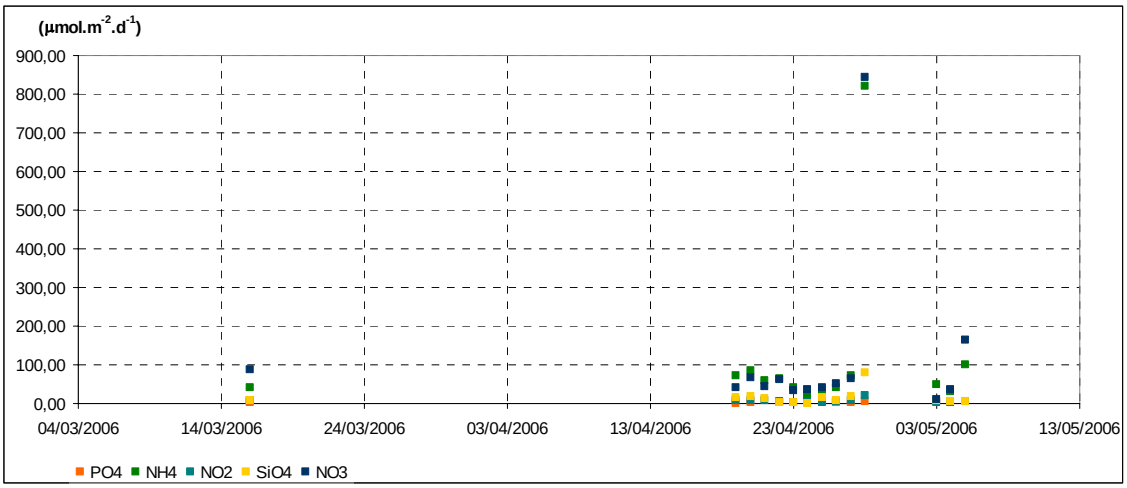

Fig. 4. Flux d'entrada de nutrients inorgànics per deposició seca a la costa de Barcelona (platja de la Barceloneta). Els valors fan referència a les concentracions d'aquests nutrients a l'aigua –per tant, dissolts i disponibles pels organismes planctònics. Com es pot veure a la gràfica, la variabilitat diària és molt alta, i per a obtenir bons valors promig del flux diari, mensual o anual cal una sèrie llarga de mesures.

Malgrat que l'estudi d'aquests fenòmens de deposició atmosfèrica no estava previst inicialment a la tesi, els resultats han estat àmpliament satisfactoris i s'han presentat a diversos congressos internacionals (pòster al Congrés Globec-Imber a València, presentació oral al congrés Imber-Loicz de Shanghai, tots dos al 2007).

Taula 5. Valors promig i màxims de deposició seca enregistrats al litoral barceloní (platja de la Barceloneta) per als diferents nutrients. Els alts valors de les desviacions estàndard deixen veure la forta variabilitat diària en els fluxes de deposició seca. Els percentatges d'increment a la columna d'aigua s'han calculat en base a dues situacions diferents: la primera, un dia de mostreig (5 novembre 2005) aleatori en què les concentracions de nutrients estaven en el promig habitual d'aquestes aigües, i la segona un dia en què les concentracions de nutrients dissolts enregistrades eren mínimes.

Dry deposition ($\mu mol.d^{-1}.m^{-2}$)	**PO_4**	**SiO_4**	**NO_3**	**NO_2**	**NH_4**
mean ± SD	3.06±1.67	9.32±6.88	62.03±36.07	5.34±2.53	52.32±25.72
max	6.73	97.57	907.13	26.46	927.66
Increase of nutrients in the water column (%)					
mean dry flux*	0.25	0.09	2.75	0.58	0.66
max dry flux**	1.53	1.08	67.01	22.05	13.03

* with regard to the concentration of nutrients in the water on 11/05/2005

** with regard to the minimum concentration of nutrients registered during the survey

Experiment amb pols sahariana. Molt valuós ha estat també l'experiment sobre els efectes de la pols del Sàhara en la comunitat planctònica mediterrània. L'arribada de pols és un episodi d'entrada puntual de nutrients, en molts casos tan important com les descàrregues dels rius. La pols transporta molts tipus de compostos, orgànics i inorgànics, i pot tenir efectes molt diversos sobre el metabolisme de la comunitat planctònica en funció del grup d'organismes que s'estimuli. Els nostres experiments van evidenciar l'alliberament d'amoni, fosfat i silicat (en quantitats per gram de pols de l'ordre dels valors publicats a la literatura). Donat que a la primavera -l'època escollida per realitzar l'experiment- el fòsfor acostuma a ser el nutrient limitant a les aigües de la badia de Blanes, vàrem postular que els efectes d'un enriquiment amb fòsfor serien similars als de l'entrada de pols, i per tant que el possible impacte de la pols sobre els organismes era fonamentalment degut al seu contingut en compostos de fòsfor. Tanmateix, els resultats van posar de manifest que el fòsfor no era l'únic factor limitant, i que si el quocient N:P de la pols és inferior a 16, el plàncton pot passar ràpidament a una limitació per nitrogen. A més, la resposta dels organismes va resultar ser variable en funció de la quantitat de pols afegida: amb una addició de pols de 50 $mg.L^{-1}$ i un enriquiment derivat de 0.15 µM de P, només vàrem estimular els organismes autòtrofics més petits, mentre que si s'afegien 500 mg de pols per litre (~ 1.5 µM de P) es donava una successió molt interessant d'organismes: primer augmentava la concentració de bacteris, que possiblement aprofitaven els nutrients inorgànics i la matèria orgànica associada a la pols, a continuació creixien els nanoflagel.lats heterotròfics, depredadors directes dels bacteris, i cap al tercer dia, aprofitant la remineralització de nutrients derivada de la mortalitat dels bacteris, trobàvem un pic d'organismes autotròfics, fonamentalment diatomees, que al cap de 2 dies deixaven pas a nanoflagel.lats i altres organismes fitoplanctònics més petits. Aquesta successió quedava reflectida, entre d'altres, en variables com la fracció de bacteris respecte d'osmòtrofs, i ens ha permès testar la validesa d'alguns indicadors derivats de les campanyes intensives.

El treball sobre els efectes de la pols sahariana està recollit en un article científic enviat a la revista Marine Ecology-Progress Series.

IV. Comparació amb índexos desenvolupats per altres regions.

El grup de recerca de la Universitat de Napier forma part del consell científic del Regne Unit per al desenvolupament d'eines de diagnosi de l'eutrofització costanera, i treballa en l'elaboració d'índexos de la comunitat que puguin utilitzar-se per a avaluar l'estat de l'ecosistema (Tett *et al*., 2007). Malgrat les diferències evidents quant a les condicions hidrodinàmiques i a les propietats de les masses d'aigua entre la Mediterrània i les costes britàniques, l'aplicació d'eines comunes i la comparació de resultats és un exercici molt interessant en l'estratègia general d'obtenir paràmetres indicadors vàlids en un rang ample de condicions ambientals.

El treball de recerca a Escòcia es va centrar fonamentalment en dos aspectes:

Càlculs de *l'eficiència de producció primària* (*q*), és a dir, l'increment en la concentració de clorofil.la *a* que se n'obté a partir d'un determinat increment de nutrients (nitrogen inorgànic dissolt, silicat o fòsfor). Aquest paràmetre recull la relació que hi ha entre l'entrada de nutrients en el sistema i la formació de biomassa fitoplanctònica, i és important per a predir rangs de creixement dels organismes i per a estimar els efectes de l'eutrofització. De fet, el paràmetre *q* no presenta un valor constant al llarg del temps i l'espai, i les seves variacions són funció (i per tant, informen) de l'estructura de la comunitat i del seu estat ecofisiològic. És una variable fonamental en els models biogeoquímics que desenvolupa el grup del Prof. Tett.

L'*índex de comunitat fitoplanctònica (*Phytoplankton Community Index, PCI), en què s'estudien les variacions en l'estructura de la comunitat a mig i llarg termini, i es determina en quina mesura els canvis són o no atribuïbles a la variació estacional natural. Pel càlcul de l'índex es poden fer servir diferents paràmetres –en realitat, qualsevol que es consideri significatiu per a descriure la comunitat-, si bé al Regne Unit s'ha fet servir fonamentalment amb abundàncies de diferents grups d'organismes. Cal puntualitzar que els grups no corresponen a les tradicionals divisions per família, genère o espècie, sino que s'estableixen d'acord a unes característiques generals més relacionades amb el paper dels organismes al medi: tipus de nutrient que consumeixen, metabolisme –autòtrofs, heteròtrofs, mixòtrofs-, comportament –pelàgics o bentònics-, etc.

Per al càlcul de *l'eficiència de producció primària* (*q*) es van fer dues aproximacions. Amb les dades de campanyes al mar, i de forma semblant a l'estudi de Gowen *et al*. (1992), es va mirar directament si existia alguna correlació entre la concentració de nutrients inorgànics i la concentració de clorofi.la *a*. En els casos en què aquesta correlació era significativa, ajustàvem una recta, i el pendent de la mateixa s'assumia com l'eficiència de producció primària.

Les dades dels experiments, molt més nombroses, van permetre'ns un tractament de les dades més detallat. En primer terme, *q* es va calcular com la variació de clorofil.la *a* respecte de la variació de nutrients entre els temps inicial i final dels experiments; un cop obtinguts aquests valors d'eficiència, categoritzàvem les dades per estacions de l'any i per tractament experimental (amb o sense turbulència, amb o sense nutrients) i avaluàvem les diferències (anàlisi de variança per grups, diagrames de caixes). En segon lloc, es van calcular les variacions de clorofil.la respecte de nutrients diàries, i es va fer també l'estudi per tractaments i l'anàlisi de variança. Finalment, es van fer regressions entre les dades diàries de nutrients (no variacions) i les dades diàries de clorofil.la *a* (no variacions), i els pendents s'assumien com l'eficiència de producció (Fig. 5). Les regressions es van calcular tant amb totes les dades (tots els tractaments) com per cada tractament per separat, i es van fer anàlisis de variança dels pendents per a saber si també d'aquest manera era possible detectar diferències en el creixement de la comunitat en funció de la càrrega de nutrients o de la turbulència a què havia estat sotmesa.

Per al càlcul de l'*índex de la comunitat fitoplanctònica* es va fer servir un procediment matemàtic particular ('convex hull'). A grans trets, l'estat de l'ecosistema és definit per dues variables d'estudi: per exemple, abundància de diatomees vs. abundància dinoflagel.lades autotròfiques. S'estableixen unes condicions de referència (a partir de les dades d'anys previs, o de dades procedents d'emplaçaments en què se suposa poca contaminació). En un gràfic de la variable 1 vs. la variable 2, les variacions estacionals durant aquests anys de referència defineixen un espai determinat (que es calcula amb l'algoritme convex hull). Si superposem al gràfic les dades actuals, alguns dels nous punts cauen fora del nostre espai de referència i alguns cauen dintre dels límits establerts. Calculem la quantitat de punts nous que cauen fora, i els punts que hi són a dins. La fòrmula matemàtica de l'índex és: PCI = (nous punts fora del cercle de referència) / (total nous punts). Tot i que encara està per refinar, si el valor del PCI<0.4 es considera que hi hagut canvis substancials en el

sistema. En el nostre cas particular, les dades de Blanes són els valors que prenem per a les condicions de referència (13 dades mensuals), i el promig diari de les dades de les campanyes de Barcelona és el que considerem estat actual.
En absència de dades pels diferents grups de fitoplàncton (que són les que fa servir el grup receptor), fem servir com a variables d'estat la concentració clorofil.la *a*, bacteris, *Synechococcus* i picoeucariotes.

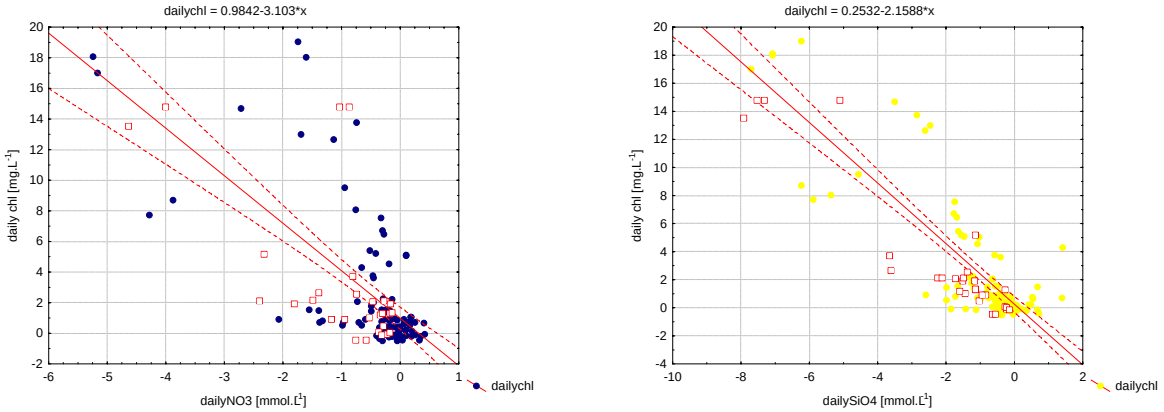

Fig. 5. Exemple de regressions per al càlcul de les eficiències en la producció de clorofil.la (*q*) a partir de nitrat (a l'esquerra) i silicat (a la dreta).

Aquestes noves aproximacions, han donat bona resposta amb les dades de la Mediterrània?
En els càlculs d'eficiència de producció primària les regressions amb dades directes de campanyes van ser poc significatives, en bona part degut a la variabilitat de les dades (dos emplaçaments diferents, diferents èpoques de l'any). L'única correlació significativa es va donar entre la clorofil.la i el nitrogen inorgànic dissolt, però donat que el nombre de dades amb què comptàvem era petit, van preferir-se les dades obtingudes a partir dels experiments.
Entre les diverses fòrmules aplicades a les dades dels experiments, els valors d'eficiència més encertats van considerar-se els que provenien de les regressions entre les concentracions directes de clorofil.la i nutrients, i no pas els que s'obtenien de les ratios entre variacions. El càlcul de l'eficiència és significatiu, en tot cas, només amb determinats nutrients, i això ens dóna idea de la seva importància pel creixement dels organismes. El paràmetre *q* va considerar-se un bon predictor pel nitrat, el nitrogen inorgànic dissolt i pel silicat, i es van obtenir valors comparables als descrits per Edwards *et al*. (2003): en promig, *q* ~ 3,10 µg chl.(µmol NO_3)$^{-1}$, *q* ~ 2,16 µg chl.(µmol SiO_4)$^{-1}$. Tanmateix, l'eficiència de producció només canvia significativament segons el tractament pel nitrat i el nitrogen inorgànic dissolt. El fòsfor és extraordinàriament variable, i els càlculs de *q* van suggerir que la seva concentració és poc correlacionable amb la biomassa d'organismes, com ja s'havia observat en els estudis anteriors. És un element molt làbil i malgrat que la seva concentració ha de superar cert llindar per tal que els organismes prol.liferin, el seu potencial de creixement de la biomassa és més predictible amb altres compostos esmentats. El treball deixa oberta la questió sobre el cicle del fòsfor i la seva absorció o alliberament per part dels diferents organismes, i és un dels aspectes en què estem treballant conjuntament tots dos grups.

El treball amb els índexos ha estat més aproximatiu (l'índex PCI està encara en fase de validació i millora), però molt interessant. La varietat de la comunitat planctònica al mar del Nord és menor, i l'índex es calcula amb organismes que predominen al llarg de tot l'any. Al mediterrani els organismes dominants varien substancialment, i vàrem haver d'aplicar paràmetres diferents. Comparativament, tanmateix, es va veure que l'índex pot funcionar amb organismes molt dispars, i que la combinació de diferents índexos simultàniament ofereix resultats valuosos. Els càlculs van indicar certes variacions en la ratio bacteris:fitoplàncton entre Blanes i Barcelona, i un decreixement del contingut de carboni a les poblacions de fitoplàncton.

REFERÈNCIES

Alcaraz, M., C. Marrasé, F. Peters, L. Arin and A. Malits. (2002). Effects on turbulence conditions on the balance between production and respiration in marine planctonic communities. Mar. Ecol. Prog. Ser., 242: 63-71.

Arin, L., C. Marrasé, M. Maar, F. Peters, M.M. Sala and M. Alcaraz. (2002). Combined effect of nutrients and small-scale turbulence in a microcosm experiment. I. Dynamics and size distribution of osmotrophic plankton. Aquat. Microb. Ecol., 29: 51-61.

Cloern, J. E. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. Mar. Ecol. Prog. Ser., vol. 210: 223-253.

Colomer, J., Peters; F. i Marrasé, C. (2005). Experimental analysis of coagulation of particles under low-shear flow. Water Research. Vol. 39. Núm. 13: 2994-3000.

Dortch, Q. – 1990. The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 61: 183-201.

Edwards, V.R., Tett, P., & Jones, K.J. (2003). Changes in the yield of chlorophyll a from dissolved available inorganic nitrogen after an enrichment event -applications for predicting eutrophication in coastal waters. Continental Shelf Research, 23: 1771-1785.

Estrada, M. and E. Berdalet. – 1997. Phytoplankton in a turbulent world. *Sci. Mar*., 61 (Suppl.1): 125-140.

Garcés, E., Masó, M., Vila, M., Camp, J. (2001). HABs events in the Mediterranean: are they increasing? GOOS News. 11: 9-11.

Gasol, J.M. and P.A. del Giorgio. – 2000. Using flow cytometry for counting natural planktonic bacteria and understanding the structure of planktonic bacterial communities. Sci. Mar., 64: 197-224.

Gowen, R.J., Tett, P. & Jones, K.J. (1992). Predicting marine eutrophication: the yield of chlorophyll from nitrogen in Scottish coastal phytoplankton. Marine Ecology - Progress Series, 85: 153-161.

Grasshoff, K., M. Ehrhardt and K. Kremling. – 1999. Methods of seawater analysis. Verlag Chimie, Weinheim.

Guadayol Ò. – 2007. Influence of turbulence variability on osmotrophic plankton dynamics in a coastal area. Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Guadayol, Ò. and F. Peters. – 2006. Analysis of wind events in a coastal area: a tool for assessing turbulence variability for studies on plankton. *Sci. Mar.,* 70 (1): 9-20.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). Climate change 2001: Synthesis report. Summary for policymakers. http://www.ipcc.ch/pub/SYRspm.pdf

Karp-Boss, L., E. Boss and P.A. Jumars. – 1996. Nutrient fluxes to planktonic osmotrophs in the presence of fluid motion. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev*., 34: 71-107.

Kiørboe, T. (1993). Turbulence, phytoplankton cell size, and the structure of pelagic food webs. Advances in Marine Biology, vol. 29: 1-72.

Kiørboe, T. – 1997. Small-scale turbulence, marine snow formation, and planktivorous feeding. *Sci. Mar.*, 61 (suppl. 1): 141-158.

Lazier, J.R.N. and K.H. Mann. – 1989. Turbulence and the diffusive layers around small organisms. *Deep-Sea Res*., 36: 1721-1733.

Lucea, A., C.M. Duarte, S. Agustí and H. Kennedy. – 2005. Nutrient dynamics and ecosystem metabolism in the Bay of Blanes (NW Mediterranean). *Biogeochemistry*, 73: 303-323.

Maar, M., L. Arin, R. Simó, M.M. Sala, F. Peters and C. Marrasé. (2002). Combined effect of nutrients and small-scale turbulence in a microcosm experiment. II. Dynamics of organic matter and phosphorus. Aquat. Microb. Ecol., 29: 63-72.

Mackenzie, F. T.; Ver, L. M.; Leman, A. – 2002. Century-scale nitrogen and phosphorus controls of the carbon cycle. Chem. Geol., vol. 190: 13-32.

Malits, A; Peters, F; Bayer-Giraldi, M; Marrase, C; Zoppini, A; Guadayol, O; Alcaraz, M. (2004). Effects of small-scale turbulence on bacteria: a matter of size. Microbial ecology [Microb. Ecol.]. Vol. 48, no. 3: 287-299.

Margalef, R. – 1978. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanol. Acta*, 1: 493-509.

Marrasé, C., J.H. Costello, T. Granata and J.R. Strickler. – 1990. Grazing in a turbulent environment: energy dissipation, encounter rates, and efficacy of feeding currents in *Centropages hamatus*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 87: 1653-1657.

Peters, F. and T. Gross. – 1994. Increased grazing rates in response to small-scale turbulence. *Mar. Ecol. Prog. Ser.,* 115: 299-307.

Peters, F., C. Marrasé, J.M. Gasol, M.M. Sala and L. Arin. – 1998. Effects of turbulence on bacterial growth mediated through food web interactions. *Mar. Ecol. Prog. Ser*., 172: 293-303.

Peters, F. and C. Marrasé. – 2000. Effects of turbulence on plankton: an overview of experimental evidence and some theoretical considerations. *Mar. Ecol. Prog. Ser*., 205: 291-306.

Peters, F., C. Marrasé, H. Havskum, F. Rassoulzadegan, J. Dolan, M. Alcaraz and J.M. Gasol (2002). Turbulence and the microbial food web: effects on bacterial losses to predation and on community structure. J. Plankton Res., 24: 321-331.

Peters, F., Hannah, C., Fennel, W., Osborn, T.R., Werner, F. (2004). Report of the first Workshop on Future Directions in Modelling Physical Biological Interactions. International Council for the Exploration of the Sea. ICES CM 2004/C:02.

Petersen, J.E., L.P. Sanford and W.M. Kemp. – 1998. Coastal plankton responses to turbulent mixing in experimental ecosystems. Mar. Ecol. Prog. Ser., 171: 23-41.

Porter, K.G. and Y.S. Feig. – 1980. The use of DAPI for identification and enumeration of bacteria and blue-green algae. *Limnol. Oceanogr*., 25: 943-948.

Rothschild, B.J. and T.R. Osborn. – 1988. Small-scale turbulence and plankton contact rates. J. Plankton Res., 10: 465-474.

Ruiz, J. – 1996. The role of turbulence in the sedimentation loss of pelagic aggregates from the mixed layer. J. Mar. Res., 54: 385-406.

Ruiz, J., Macias, D., Peters, F. (2004). Turbulence increases the average settling velocity of phytoplankton cells. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA [Proc. Natl. Acad. Sci. USA]. Vol. 101, no. 51: 17720-17724.

Saiz, E., M. Alcaraz and G.A. Paffenhöfer. – 1992. Effects of small-scale turbulence on feeding rate and gross-growth efficiency of three Acartia species (Copepoda: Calanoida). J. Plankton Res., 14: 1085-1097.

Saiz, E. and T. Kiørboe. – 1995. Predatory and suspension feeding of the copepod Acartia tonsa in turbulent environments. Mar. Ecol. Prog. Ser., 122: 147-158.

Tett, P., Gowen, R., Mills, D., Fernandes, T., Gilpin, L., Huxham, M., Kennington, K., Read, P., Service, M., Wilkinson, M. & Malcolm, S. (2007). Marine Pollution Bulletin, 53, 282-297.

Thingstad, T.F., C.S. Law, M.D. Krom, R.F.C. Mantoura, P. Pitta, S. Psarra, F. Rassoulzadegan, T. Tanaka, P. Wassmann, C. Wexels Riser and T. Zohary. – 2006. Response to comment on "Nature of phosphorus limitation in the ultraoligotrophic Eastern Mediterranean". Science, 312: 1748d.

Thomas, W.H., C.T. Tynan and C.H. Gibson. – 1997. Turbulence-phytoplankton interrelationships. Prog. Phycol. Res., 12: 283-324.

Utermöhl H (1958) Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. Mitt Int Ver Limnol 9:1-38.

Yentsch, C.S. and D.W. Menzel. – 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. Deep-sea Res., 10: 221-231.