



UNIVERSITAT DE BARCELONA

GRC Geociències Marines
Departament d'Estratigrafia,
Paleontologia i Geociències Marines

FLUXOS BIOGEOQUÍMICS I BALANÇ DE CARBONI A LA MAR D'ALBORÁN (MEDITERRÀNIA OCCIDENTAL)

Anna Sànchez Vidal
memòria de Tesi Doctoral

octubre 2004



UNIVERSITAT DE BARCELONA



PROGRAMA DE DOCTORAT DE CIÈNCIES DEL MAR
Adscrit al Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona
Bienni 1999-2001

**FLUXOS BIOGEOQUÍMICS I BALANÇ DE CARBONI
A LA MAR D'ALBORÁN (MEDITERRÀNIA OCCIDENTAL)**

*BIOGEOCHEMICAL FLUXES AND CARBON BUDGET
IN THE ALBORAN SEA (WESTERN MEDITERRANEAN)*

Memòria presentada per **Anna Sànchez Vidal**
per a optar al grau de Doctora per la Universitat de Barcelona

Tesi realitzada sota la direcció del Dr. Antoni Calafat Frau
al Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines

Barcelona, Octubre 2004

La doctoranda,

El director de la Tesi,

Anna Sànchez Vidal

Antoni Calafat Frau

Aquest treball ha estat possible gràcies al suport econòmic d'una beca predoctoral de Formació de Personal Investigador de l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) de la Generalitat de Catalunya (2000-2003) i una beca de col·laboració en projectes d'investigació de la Universitat de Barcelona (2004). La recerca ha estat lligada als projectes MTP II-MATER ("Mediterranean Targeted Project-II MAss Transfer and Ecosystem Response", ref. MAS3-CT96-0051) i ADIOS ("Atmospheric Deposition and Impact of pollutants, key elements and nutrients on the Open Mediterranean Sea", ref. EVK3-CT-2000-00035) de la Comissió Europea, i al projecte "Barium fluxes in the Alboran Sea (SW Mediterranean): Elemental tracers as proxies of productivity and environmental processes" de la National Science Foundation dels Estats Units (ref. NSF #OCE-0136853). La Direcció General de Recerca de la Generalitat de Catalunya ha finançat al Grup de Recerca Consolidat en Geociències Marines a través del seu programa de Grups de Recerca d'Excel·lència (ref. 2001 SGR-00076) i de la Xarxa Temàtica "Barcelona Consortium on Marine Geosciences" (ref. 2003 XT-0025).

Il·lustració de la portada: Imatge de l'extrem occidental de la mar Mediterrània obtinguda amb el sensor SeaWiFS al maig del 1999. La gradació de color va dels més freds (blaus i verds) als més càlids (grocs, taronges i vermells) i reflecteix concentracions creixents de clorofil·la *a* i, indirectament, la productivitat biològica de les aigües. Font: pàgina web de la Marine Environment Unit of the Space Applications Institute (Joint Research Centre, European Commission, <http://www.me.sai.jrc.it>).

*A la meva terra,
i a la meva gent*

Agraïments

Un cop acabada la tesi és el moment d'agrair a molta gent la gran ajuda i suport rebut durant aquests anys, sense els quals aquest volum no hauria estat possible...

En primer lloc agrair al director d'aquesta tesi, en Toni Calafat, la tasca de direcció realitzada durant els darrers 5 anys. Gràcies per la teva confiança i sobretot pel bon humor, per saber escoltar i per donar-me ànims quan més negre ho veia tot... tens el do de que quan un entra al teu despatx amb el cap fet un embolic en surt amb les idees més clares! És un plaer treballar amb tu...

A en Miquel Canals agrair-li que m'acollís al GRC Geociències Marines, un món ple de geòlegs però que mica en mica es va emplenant d'altres tipus de fauna... ambientòlegs, "marinos", enginyers... gràcies per confiar també en els que venim de fora! Gràcies Miquel pel suport econòmic, logístic, per portar-me al cul del món i pel teu grandios treball de correcció dels articles.

A en Joan Fabrés, per ensenyar-me tot el que sé del món de les trampes de sediment, per dur a terme la recollida de mostres, posar en marxa el laboratori, i cedir-me el mar d'Alboran oriental... aquesta tesi no hagués estat possible sense la teva gran feina!

Thanks to Robert Collier from the College of Oceanic and Atmospheric Sciences at the Oregon State University for the barium project, the barium analysis and the barium lessons... Thanks to Andy Ungerer and Bobby Conard for their help in sample preparation and ICP-AES/MS analyses. Lots of thanks to Jack, Jan and Stacie, for their sweet hospitality during my first visit to Corvallis: I'll never forget you. Finally, thousands and thousands of thanks to the Collier family for taking care of me... Elise, Pat, Bob and Mary: love from the other side of the world!

A tots aquells que vau participar a les campanyes MATER durant els anys 1997-1998: Joan, Toni, Miquel Àngel, Pere, etc. Moltes mercès per preparar els fondejos i fer infinitat de nusos i patir el que vareu patir a la mar d'Alborán... Aquí hi ha part dels resultats; espero que cregueu que va valer la pena! A les tripulacions dels vaixells oceanogràfics Garcia del Cid i Hespérides, i als tècnics de la UTM, gràcies per la vostra dedicació durant les campanyes MATER (i les que han seguit...). També als nombrosos companys de viatge pels mars i oceans del món, i sobretot als participants de les campanyes RECS pel bon ambient gaudit mentre cercàvem gambes...

Mil gràcies a la Montse Guart, per ajudar-me amb el processat de les mostres i a fer boletes, per ser la millor tècnica de laboratori que podríem tenir i ser una bona amiga... Als Serveis Científico-tècnics de la Universitat de Barcelona, molt especialment al personal de les unitats d'Anàlisi Elemental Orgànica (Isidre, Pilar i Anna), d'Espectroscòpia d'Emissió Òptica (Eli i Silvia) i al Laboratori Químic (Santi i Paco). Gràcies per analitzar milers de mostres i estar sempre disposats a donar un cop de mà davant qualsevol problema...

Als becaris i no becaris del GRC GM, gràcies per ser com sou (perquè sou uns animals, perquè sou es meus germans, perquè sou tan irreals, vos estim a tots igual (sic)...), pel bon ambient i pel bon rotllo, pels cafès i per la *chouffe*, per les crisis dels divendres i les baralles amb l'aire condicionat... i mil coses més que ara no vénen al cas: Galderic, David, Diana, Txau, Joan, Verónica, Sara, Pedro, Roger, Isa, Camino, Gema, Leo, Ben, Viktor, Angelo... I als que han marxat: Ana, tiet Jersi, Nuna, Víctor, Rainer... A la Teresa, per remenar la paperassa millor que ningú. A en Jose Luis, per tenir cura dels iMacs i els equips i del gran geomar... i que no els hi falti mai de res. A en Pau, la Maite, La Mercè i la Núria de Secretaria per la seva eficiència amb gestions i tràmits diversos.

A tots aquells que feu que durant el cap de setmana me n'oblidi de que Barcelona existeix i que de dilluns a divendres hi estic fent una tesi: a la kolla i a les *magnífiques* pels llarguíssims cafès, pels vuleius, pels sopars, per la festa... gràcies de tot cor, sou tant maques!. A les Gàrgoles de Foc per fer que els estius siguin una canya, i pel viatge amb vaixell més distret que he tingut mai (duc el dimoni dins jo!). A en Simu, per ser un bon amic. A l'amanida tèbia amb formatge de cabra de can Berni i a les canyes del Passeig. A en Pere. A l'Estany i als Pirineus.

No em podria deixar en Tumet, el més maco del món sencer..

I finalment voldria agrair infinitament a la meva família la seva gran feina... Als avis Vidal, per intentar entendre el que faig i estimar-me tant. A la Marta, merci per acollir-me al teu pis i per cuidar-me tant! A Laia, per ser la millor germana petita del món!. Gràcies a les dues per creuar l'Atlàntic i venir a passar el Nadal amb mi! A la Maria, per fer costat al pare i a totes nosaltres en tot... I finalment, al meu pare preferit, en Manel, per animar-me i recolzar-me amb tot el que faig, i per estar al meu costat... sempre orgullós de la seva filla mitjana... en fi... gràcies per tot!



Ha estat llarg i dur, però crec que ha valgut la pena....

A totes aquelles persones que, d'una manera o altra, han compartit amb mi aquest camí... **Gràcies!!!**

ÍNDIX

Agraïments	1
Índex	3
Resum	7
Abstract	9
Objectius i presentació de la Tesi	11
CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ	15
1.1. El paper dels oceans en el cicle del carboni.....	15
1.2. El segrest de CO ₂ a llarg termini: de les aigües superficials als sediments profunds	18
1.2.1. La producció i exportació de carboni orgànic a les aigües superficials.....	18
1.2.2. Els processos que afecten al carboni orgànic particulat en el seu viatge a través de la columna d'aigua.....	20
1.2.3. La preservació del carboni orgànic als sediments profunds i el paper del bari biogènic	24
1.3. Àrea d'estudi: la mar d'Alborán	26
1.3.1. Oceanografia física	26
1.3.2. Producció primària	29
1.4. Metodologia	32
1.4.1. Disseny de l'experiment	32
1.4.2. Mètodes analítics	33
1.4.3. Eines de suport (I): les imatges de satèl·lit	35
1.4.4. Eines de suport (II): dades meteorològiques i hidrològiques	36
1.5. Referències	37
CAPÍTOL 2. PARTICLE FLUXES IN THE ALMERIA-ORAN FRONT: CONTROL BY COASTAL UPWELLING AND SEA-SURFACE CIRCULATION	43
<i>Sanchez-Vidal, A., Calafat, A., Canals, M., Fabres, J., 2004. Journal of Marine Systems, 52: 89-106.</i>	
Abstract.....	44
2.1. Introduction	45
2.2. Methods	46
2.2.1. Sediment trap and current meter array	46
2.2.2. Analytical methods.....	47

2.2.3. Remote sensing.....	48
2.3. Results	48
2.3.1. Particle fluxes	48
2.3.2. Current meter data	52
2.3.3. Sea surface events from satellite data.....	53
2.4. Discussion.....	56
2.4.1. Biological and physical control on particle fluxes	56
2.4.2. Vertical transfer of a spring bloom.....	60
2.4.3. Allochthonous inputs and the role of advection	61
2.4.4. Export of organic carbon production and seasonality	63
2.5. Conclusions	65
2.6. References	67

CAPÍTOL 3. PARTICLE FLUXES AND ORGANIC CARBON BALANCE ACROSS THE EASTERN ALBORAN SEA (SW MEDITERRANEAN SEA)..... 71

Sanchez-Vidal, A., Calafat, A., Canals, M., Frigola, J., Fabres, J., 2004. Continental Shelf Research.

Abstract.....	72
3.1. Introduction	73
3.2. Methods	74
3.2.1. Mooring description and sample collection.....	74
3.2.2. Sample treatment and analytical procedures	75
3.3. Results	76
3.3.1. Atmospheric and oceanographic conditions.....	76
3.3.2. Temporal variability of particle fluxes	78
3.3.3. Annual fluxes.....	80
3.4. Discussion.....	83
3.4.1. Biological and physical processes influencing particle fluxes to upper depths.....	83
3.4.2. Variability in transfer to middle and near bottom depths	85
3.4.3. Organic carbon balance	87
3.5. Conclusions	93
3.6. References	95

CAPÍTOL 4. COMPOSITION AND SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF PARTICLE FLUXES IN THE WESTERN ALBORAN GYRE, MEDITERRANEAN SEA	99
<i>Fabres, J., Calafat, A., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., Heussner, S., 2002. Journal of Marine Systems, 33-34: 431-456</i>	
Abstract.....	100
4.1. Introduction	101
4.2. Study area	103
4.2.1. Physiography	103
4.2.2. Physical oceanography	103
4.2.3. Sources of particles.....	104
4.3. Material and methods	105
4.3.1. Sediment traps and data recovery.....	105
4.3.2. Sample treatment and analytical procedures	107
4.3.3. Current meter data and hydrological profiles	108
4.3.4. Seawifs satellite images and fluvial discharge time series	109
4.4. Results and discussion	109
4.4.1. Hydrodynamic conditions	109
4.4.2. Spatial distribution of mean composition and fluxes of settling particles.....	111
4.4.3. Temporal evolution of total mass and major constituents fluxes	117
4.4.3.1. Temporal evolution of fluxes to mid water depths.....	121
4.4.3.2. Temporal evolution of fluxes to near-bottom waters	125
4.5. Conclusions	128
4.6. References	130
CAPÍTOL 5. PARTICULATE BARIUM FLUXES ON THE CONTINENTAL MARGIN: A STUDY FROM THE ALBORAN SEA (WESTERN MEDITERRANEAN)	137
<i>Sanchez-Vidal, Collier, R.W., A., Calafat, A., Fabres, J., Canals., M., 2004. Marine Chemistry.</i>	
Abstract.....	138
5.1. Introduction	139
5.2. Material and methods	139
5.2.1. Moorings and sample collection.....	140
5.2.2. Analytical methods.....	142

5.3. Results	142
5.3.1. Terrigenous Ba input and Ba/Al ratio.....	142
5.3.2. Fluxes of bio-Ba through the water column	144
5.3.3. The composition and accumulation rate of surface sediments	147
5.4. Discussion.....	147
5.4.1. Spatial distribution of bio-Ba fluxes over the Alboran Sea.....	147
5.4.2. Mechanisms of bio-Ba formation	150
5.4.3. Bio-Ba and export production	152
5.5. Conclusions	153
5.6. References	154
CAPÍTOL 6. RESUM DELS RESULTATS I DISCUSSIÓ	159
6.1. Distribució espacial i evolució temporal dels fluxos de partícules a la mar d'Alborán.	159
6.2. Balanç de carboni a la mar d'Alborán oriental	165
6.3. El bari biogènic com a indicador de productivitat a la mar d'Alborán.....	168
6.4. Referències	172
CAPÍTOL 7. CONCLUSIONS.....	175

RESUM

La producció primària del fitoplàncton marí transforma CO₂ i nutrients de l'aigua de mar en matèria orgànica. Encara que la majoria del carboni contingut a la matèria orgànica és reciclat prop de la superfície dels oceans, una part s'enfonsa cap a aigües profundes i és convertit altre cop en CO₂ per l'acció dels bacteris marins, i només un 0,1% arriba als fons oceànics i és emmagatzemat als sediments, restant aïllat de l'intercanvi actiu amb l'atmosfera. L'eficiència d'aquest procés, anomenat bomba biològica oceànica, no depèn només de l'absorció de CO₂ atmosfèric, sinó dels processos que afecten al flux de material que acompanya al carboni en el seu viatge al llarg de la columna d'aigua. Aquest flux també transporta cap als sediments profunds altres indicadors de processos biogeoquímics que tenen lloc a les aigües superficials, indicadors que poden ser d'especial importància per a reconstruir les condicions ambientals i llurs possibles causes de variació en el passat.

El primer gran experiment de fluxos de partícules a la mar d'Alborán ha aportat informació molt rellevant sobre l'origen i els processos de transferència de material particulat, així com sobre l'eficiència de la bomba biològica en aquesta àrea situada a cavall entre la mar Mediterrània i l'oceà Atlàntic. L'anàlisi combinat de les dades de fluxos de partícules obtingudes en cinc estacions durant gairebé un any (de juliol de 1997 a maig de 1998), juntament amb dades de corrents, hidrologia, meteorologia i imatges de satèl·lit (clorofil·la i temperatura de l'aigua superficial) del sud de la península Ibèrica, ha permès determinar els tres principals processos que controlen l'arribada de material particulat al fons marí.

- L'entrada de grans quantitats de carboni orgànic i òpal al fons és controlada per la circulació de les masses d'aigua superficials (girs d'Alborán i Front d'Almeria-Orà), la qual determina el desenvolupament de comunitats fitoplanctòniques riques en diatomees i la sedimentació massiva d'agregats orgànics. La influència d'aquestes estructures hidrològiques provoca que l'eficiència de la bomba biològica a la zona sigui la més elevada de les enregistrades a la mar Mediterrània, amb valors del 0,5-0,9% del carboni produït per fotosíntesi a les aigües superficials transferit verticalment i emmagatzemat als sediments profunds a més de 2000 metres.

- El material terrígen és introduït principalment per la descàrrega dels rius situats al sud de la península Ibèrica. La transferència quasi directa del material fi aportat per aquests rius cap al fons de la mar d'Alborán oriental a través de canyons submarins, i la circulació superficial de les masses d'aigua en direcció sud-est, nodreixen d'abundant material litogènic tota la zona. L'efecte llast, proporcionat per aquestes partícules litogèniques i per partícules

de carbonat de calci en períodes d'elevada productivitat, impedeix el procés natural de formació de bari biogènic en els agregats de matèria orgànica, element utilitzat tradicionalment com a indicador de processos biològics tant en temps recents com passats.

- La batimetria irregular de la mar d'Alborán afavoreix l'existència de processos laterals de transferència de material i la presència de capes nefeloides intermèdies i de fons, riques en material litogènic i carbonat resuspesos per acció dels corrents. En moments d'elevada productivitat aquestes aportacions laterals són també riques en carboni orgànic, constituint una de les fonts més importants de carboni cap als sediments profunds. L'existència d'aportacions laterals de bari biogènic a la zona més propera al marge continental ibèric i la diferència notable entre els valors enregistrats en zones de marge continental i en ambients d'oceà obert qüestiona l'ús del bari biogènic com a indicador directe de productivitat primària a les aigües superficials.

ABSTRACT

Primary production of marine phytoplankton transforms CO₂ and nutrients from seawater into organic matter. Although most of it is recycled near the surface, a fraction sinks into the deeper waters and is converted back into CO₂ by marine bacteria, and only about 0.1% reaches the seafloor and is buried in the sediments. The efficiency of this process, known as the oceanic biological pump, does not depend only on the uptake of atmospheric CO₂ but on the processes controlling the flux of material accompanying carbon during its descent through the water column. This flux also transports other biogeochemical indicators of surface processes to the deep-sea sediments, which are determinant to reconstruct environmental conditions and its possible causes of variation in the past.

The first large particle flux experiment in the Alboran Sea has provided important information about the origin and transfer processes of particulate material and the efficiency of the biological pump in this key area between the Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean. The combined analysis of particle fluxes obtained from five stations over almost one year (from July 1997 to May 1998), together with current, hydrology and meteorology data and satellite images (chlorophyll and sea surface temperature) from the southern Iberian Peninsula reveals that three main processes control the arrival of particulate material to the deep-sea sediments.

- The arrival of particulate organic carbon and opal to the sea floor is controlled by sea surface circulation (Alboran gyres and Almeria-Oran Front) that allows the development of diatom-rich phytoplankton communities and the massive sedimentation of organic aggregates. The influence of these hydrological structures causes the efficiency values of the biological carbon pump to be amongst the highest recorded in the whole Mediterranean Sea, with 0.5-0.9% of the carbon fixed during photosynthesis transferred down to the sea floor and buried in the sediments at more than 2000 m of water depth.

- The arrival of terrigenous sediments to the deep Alboran Sea is closely linked to fluvial discharge from the southern Iberian Peninsula rivers. The almost direct transfer of the material delivered to the continental shelf to the deep basin through submarine canyons and the southeastward dominating circulation feed the area with abundant lithogenic material. The ballast effect of the lithogenic and carbonate particles may limit decomposition of organic matter aggregates and biogenic barium formation, traditionally used as a proxy for both modern and past biological processes.

- Irregularities in local bathymetry favour the existence of lateral transport processes and the formation of intermediate and deep nepheloid layers relatively rich in lithogenic and carbonate material resuspended by near-bottom currents. During high productivity events the advected material is also rich in organic carbon, representing the most important source of carbon to deep-sea sediments. Lateral transport of biogenic barium from the lower continental slope in the Western Alboran Sea to deeper areas, together with the clearly different relationship between biogenic barium and organic carbon in margin systems and open ocean systems, questions the use of biogenic barium as a productivity proxy.

OBJECTIUS I PRESENTACIÓ DE LA TESI

“La producció primària del fitoplàncton marí transforma CO₂ i nutrients de l’aigua de mar en matèria orgànica. Encara que la majoria del carboni contingut a la matèria orgànica és reciclat prop de la superfície dels oceans, una part s’enfonsa cap a aigües profundes i és convertit altre cop en CO₂ per l’acció dels bacteris marins, i només un 0,1% arriba als fons oceànics i és emmagatzemat als sediments, restant aïllat de l’intercanvi actiu amb l’atmosfera. ...”

Amb aquest paràgraf s’introdueix la Tesi Doctoral que duu per títol “Fluxos biogeoquímics i balanç de carboni a la mar d’Alborán (Mediterrània occidental)”. Per tal de determinar els processos que controlen la producció, sedimentació i emmagatzematge de carboni i altres elements en aquesta zona de la Mediterrània, i aconseguir una millor comprensió de la capacitat dels oceans per a controlar els nivells atmosfèrics de CO₂, s’han marcat els objectius següents:

- Estudiar la **distribució temporal i espacial** dels fluxos de partícules i la seva composició en elements majors (carboni orgànic, òpal, carbonat càlcic i material litogènic).
- Determinar l’**origen** i els **processos de transferència** d’aquest material a partir d’una anàlisi integrada de tots els factors que potencialment poden intervenir-hi: estructures hidrològiques a les aigües superficials, corrents a la columna d’aigua, i hidrologia i meteorologia a les àrees emergides properes.
- Caracteritzar la **bomba biològica** a la mar d’Alborán, quantificant el transport de carboni des de la superfície fins als sediments profunds. Aquesta quantificació permetrà establir un model conceptual dels processos determinants de la transferència de carboni.
- Determinar l’eficàcia del **bari biogènic com a indicador de productivitat** a partir de l’estudi de llur relació amb el carboni orgànic, per tal d’avaluar la seva utilitat per a reconstruir la producció exportada de carboni orgànic en el registre sedimentari.

La Tesi s’estructura en 7 capítols. El **Capítol 1** és una **introducció** als fluxos biogeoquímics i al paper dels oceans en el cicle del carboni. Es descriuen, a més, l’**àrea d’estudi**, el **disseny de l’experiment** i les **metodologies aplicades**. Les dades, llur anàlisi i interpretació es presenten en forma d’articles científics, els quals constitueixen el cos de la Tesi (Capítols 2-5):

En el **Capítol 2** es presenta la distribució vertical i l'evolució temporal dels fluxos de partícules (massa total i elements majors: material litogènic, carbonat de calci, carboni orgànic i òpal) mesurats mitjançant una línia de fondeig instrumentada (ALB4). La posició escollida per aquest fondeig, a l'extrem est de la mar d'Alborán oriental, és la més allunyada dels marges adjacents i, per tant, és potencialment la menys afectada per aportacions laterals de material. Amb aquest estudi es demostra i quantifica la influència de la variabilitat espacial i temporal de les estructures hidrològiques superficials a la mar d'Alborán sobre la quantitat i la composició dels fluxos de partícules.

Sanchez-Vidal, A., Calafat, A., Canals, M. i Fabres, J., 2004. Particle fluxes in the Almeria-Oran Front: control by coastal upwelling and sea-surface circulation (*Fluxos de partícules al Front d'Almeria-Orà: control per part de l'aflorament costaner i la circulació superficial de les masses d'aigua*). Journal of Marine Systems, 52: 89-106 (rebut el 29 de gener de 2003, acceptat el 14 de gener de 2004; doi:10.1016/j.jmarsys.2004.01.010)

En el **Capítol 3** s'integren els resultats de fluxos de partícules (massa total i elements majors: material litogènic, carbonat de calci, carboni orgànic i òpal) de tres línies de fondeig (ALB3, ALB4 i ALB5), amb l'objectiu d'entendre la distribució vertical, horitzontal i temporal dels fluxos de partícules a la mar d'Alborán oriental. A fi d'obtenir un millor coneixement del cicle del carboni i avaluar l'eficiència de la bomba biològica, hom estableix un balanç de carboni orgànic, tot i acotant la producció, transferència i enterrament de carboni orgànic al llarg d'un tall transversal que segueix el meridià 1,5° oest.

Sanchez-Vidal, A., Calafat, A., Canals, M., Frigola, J. i Fabres, J. Particle fluxes and organic carbon balance across the Eastern Alboran Sea (SE Mediterranean Sea) (*Fluxos de partícules i balanç de carboni al llarg de la mar d'Alborán oriental, Mediterrània occidental*). Continental Shelf Research (rebut el 7 d'octubre de 2003, revisat el 27 de juliol de 2004).

En el **Capítol 4** es presenta la distribució vertical i l'evolució temporal dels fluxos de partícules (massa total i elements majors) en dues línies de fondeig (ALB1 i ALB2) situades a la mar d'Alborán occidental. A l'ésser les estacions més properes al marge ibèric, hom ha intentat avaluar les diferents àrees font de les partícules sedimentants, tot i comparant els fluxos de partícules obtinguts amb el cabal dels rius i les imatges de concentració de clorofil·la *a*.

Fabres, J., Calafat, A., Sanchez-Vidal, A., Canals, M. i Heussner, S., 2002. Composition and spatio-temporal variability of particle fluxes in the Western Alboran Gyre, Mediterranean Sea (*Composició i variabilitat espacio-temporal dels fluxos de partícules al gir occidental d'Alborán, mar Mediterrània*). Journal of Marine Systems, 33-34: 431-456

(rebut el 12 de gener de 2001, acceptat l'1 de juny de 2001; doi:10.1016/S0924-7963(02)00070-2).

I en el **Capítol 5** hom presenta els fluxos de bari biogènic obtinguts en 3 estacions situades a la mar d'Alborán oriental i occidental (ALB1, ALB4 i ALB5). Amb els resultats obtinguts es raona entorn el significat de tots els processos citats en els anteriors articles (variabilitat hidrològica de les aigües superficials, àrees font de les partícules, eficiència de la bomba biològica) en la formació del bari biogènic i la seva relació amb el carboni orgànic en marges continentals. També es qüestiona l'ús del bari biogènic com a indicador directe de la productivitat primària a les aigües superficials.

Sanchez-Vidal, A., Collier, R.W., Calafat, A., Fabres, J. i Canals., M. Particulate barium fluxes on the continental margin: a study from the Alboran Sea (Western Mediterranean) (*Fluxos de bari particulat al marge continental: estudi de la mar d'Alborán, Mediterrània occidental*). Marine Chemistry (rebut el 18 de maig de 2004, acceptat el 30 de juliol de 2004; doi:10.1016/j.marchem.2004.07.004)

Finalment, els **Capítols 6 i 7** corresponen al **resum** dels principals resultats i discussions derivats dels quatre articles, i a la síntesi de les **conclusions** principals.

