

OBSERVANT EL MAR

EL PAPER DE LA INNOVACIÓ TECNOLÒGICA

Escrit per **Jaume Piera**

Unitat de Tecnologia Marina del Consell Superior d'Investigacions Científiques

La innovació tecnològica pot donar lloc a noves observacions sobre el mar que ens permetin respondre qüestions científiques encara no resoltes. En aquest article, es mostren exemples de recerca tecnològica a partir dels quals s'han desenvolupat nous instruments o mètodes d'anàlisi de dades. Alguns d'aquests exemples s'estan duent a terme actualment a la Unitat de Tecnologia Marina (UTM) del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC), que ha apostat per la innovació tecnològica com a via per a incrementar la capacitat d'observació en les diferents disciplines de les ciències marines.

Un dels requisits fonamentals en qualsevol ciència experimental és la reproductibilitat de l'observació dels fenòmens que estudia. Aquest requisit, necessari per poder contrastar qualsevol hipòtesi plantejada, és especialment difícil d'assolir en l'àmbit específic de les ciències marines. En general, l'observació de qualsevol fenomen en el mar és difícil de portar a terme. Ateses les condicions habituals en què es du a terme (sovint a baixes temperatures, pressions elevades i, evidentment, amb la ne-

cessitat d'utilitzar algun sistema artificial per respirar), l'observació directa és, en molts casos, excepcional, i sovint els resultats experimentals s'obtenen a partir de mètodes indirectes de mesura.

Per exemple, la resposta a una de les qüestions bàsiques en ecologia, «quina és la distribució espacial dels organismes en l'àrea d'estudi?», planteja uns reptes metodològics d'observació molt diferents depenent de si el medi és terrestre o marí. En el medi terrestre, podem obtenir una part important de la informació amb mètodes d'observació molt senzills: la simple passejada per l'àrea d'estudi o l'observació global del paisatge des d'algun punt elevat del territori, ens permeten fer-nos una idea força acurada de les propietats generals de l'organització i l'extensió de l'ecosistema. En el cas del medi marí, l'obtenció d'una informació semblant requereix, en la majoria dels casos, mètodes i recursos molt més complexos (imagineu-vos, per exemple, la dificultat de caracteritzar la distribució dels organismes bentònics en una determinada zona costanera, o bé la d'un ecosistema de grans profunditats).

Tot i que l'aparició de noves tècniques i sistemes d'instrumentació és important en qualsevol disciplina experimental, en el cas de les ciències del mar ha estat particularment clau per a obtenir les dades requerides en molts dels estudis que es porten a terme. Per aquest motiu, la innovació tecnològica dels instruments utilitzats té un paper tan important en l'estudi del medi marí.

DINS LA RECERCA DEL MEDI MARÍ

Àrees principals d'innovació

Dins l'àmbit de la recerca en tecnologies d'observació del mar podem destacar tres grans àrees d'innovació:

a) Instruments de mesura. En aquesta àrea s'inclouen els estudis per a dissenyar una nova instrumentació o millorar-ne la prestació (precisió, estabilitat o resolució).

b) Mètodes de tractament de les dades. A partir dels nous conceptes que es deriven de la recerca en diferents disciplines (matemàtica, estadística, processament del senyal o teoria de la informació), poden aparèixer noves tècniques que ens permetin obtenir més informació de les mesures dutes a terme.

c) Plataformes d'adquisició. L'objectiu que es planteja en aquesta àrea és millorar les plataformes convencionals (anàlisi de la hidrodinàmica dels vaixells de recerca per a reduir les interferències en la instrumentació acústica, per exemple) o la concepció de nous sistemes (boies o, fins i tot, submarins autònoms, dels quals veurem un exemple més endavant).

Per tal de concretar una mica més aquestes línies, veurem alguns exemples de la tecnologia que s'ha desenvolupat per respondre algunes preguntes que es generen en la recerca del mar.

EXEMPLE 1

Quina és la distribució espacial del zooplàncton?

Una línia de recerca a la Universitat de Florida del Sud

La distribució dels organismes zooplànctònics és força complexa, atès que la variabilitat espacial i temporal és molt elevada, ja sigui pels canvis del medi (corrents, marees, etc.) com per la capacitat de moviments dels organismes mateixos. Aquesta variabilitat fa inviable una descripció detallada de la distribució dels organismes basada en la recol·lecció de mostres i la identificació posterior de cadascuna d'aquestes al laboratori. Per aquest motiu, durant els darrers anys s'han fet esforços de recerca importants per obtenir sistemes que facilitin la identificació dels organismes i en permetin fer un seguiment amb molta més resolució.

Un dels projectes orientats a facilitar aquesta classificació és el Shadowed Image Particle Profiling Evaluation Recorder (SIPPER). Aquest projecte és una col·laboració entre diversos grups de recerca de la Universitat de Florida del Sud, que són clarament multidisciplinaris, ja que hi ha investigadors del Departament de Ciències Computacionals, del de Ciències Marines o del Centre de Tecnologia Oceànica, un dels centres associats a la Universitat. El projecte té per objectiu principal obtenir imatges de zooplàncton *in situ* de manera no invasiva, ja que no es requereix la recol·lecció de mostres.

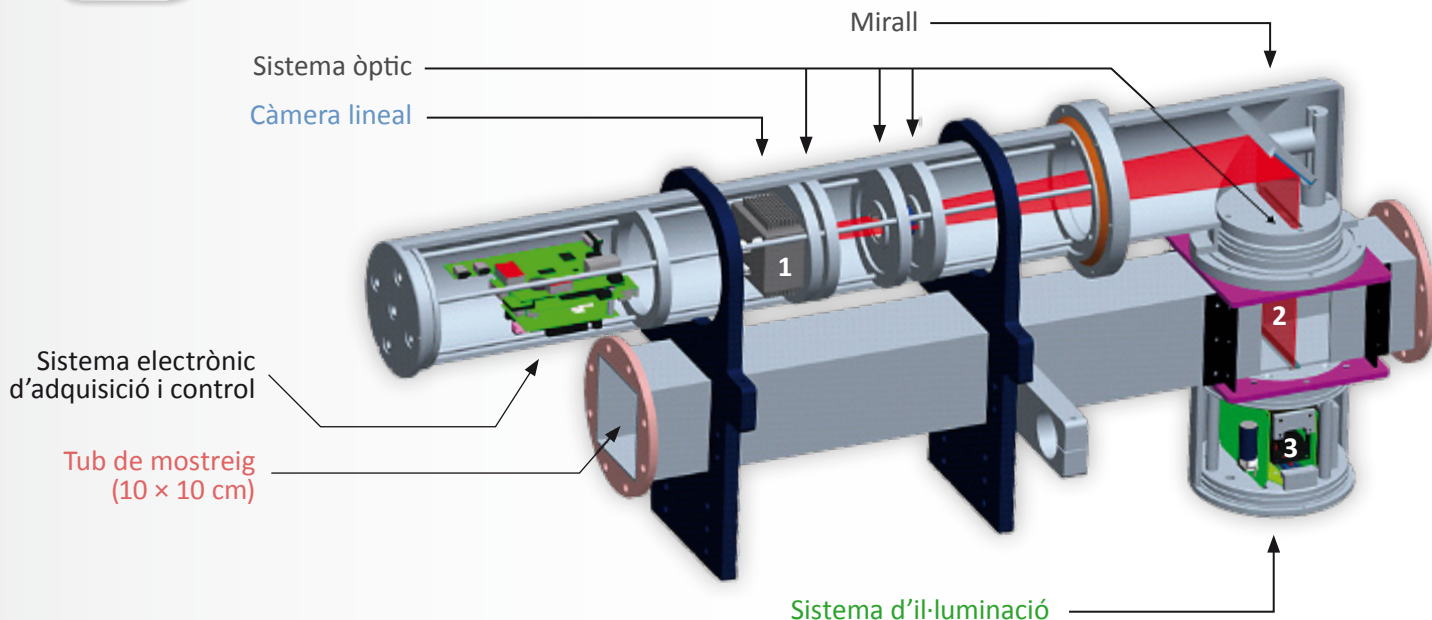
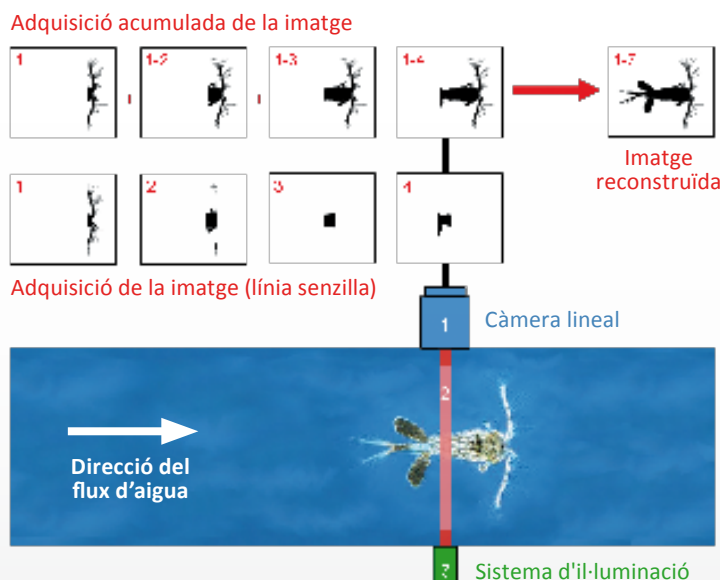


Figura 1. Esquema (a partir de la figura cedida per Andrew Remsen, College of Marine Science, Universitat de Florida del Sud) on es mostren les parts principals de l'instrument SIPPER. Els números en blanc (1. càmera lineal; 2. feix làser, i 3. font d'il·luminació) corresponen a les diferents parts que es referencien en la **figura 2**.

El SIPPER és un exemple de la innovació d'instrumentació oceanogràfica (Samson *et al.*, 2001). La **figura 1** correspon a un diagrama de l'instrument, on n'apareixen els dos components principals: un feix pla de llum làser i la càmera lineal que permet gravar cadascuna de les línies que compondran la imatge. En la **figura 2**, es representa esquemàticament com es genera una imatge: quan un organisme s'interposa entre el feix de llum i el receptor, s'activa el mecanisme de gravació. A mesura que va travessant aquest feix, es van adquirint diferents seccions òptiques de l'organisme, que, un cop combinades, permeten obtenir-ne la imatge final (anomenada en anglès *shadowgram*). Les imatges resultants proporcionen prou detalls per a poder determinar, en molts casos, la família a la qual pertany l'organisme i, fins i tot, en alguns és possible determinar-ne el gènere i l'espècie, fet que permet caracteritzar la regió estudiada amb una resolució taxonòmica considerable. Podem veure alguns exemples dels resultats que s'obtenen en la **figura 3**.

Figura 2. Exemple d'adquisició d'una imatge (1. càmera lineal; 2. feix làser, i 3. font d'il·luminació). Fotografia original d'*Oithona davisae*, d'Albert Calbet, del Grup d'Ecologia del Zooplàncton Marí de l'Institut de Ciències del Mar [ICM].



Multiplicar el potencial del SIPPER

Tot i que el SIPPER és un instrument molt valuós, el sistema és molt més potent si el combinem amb altres innovacions tecnològiques, tant de les plataformes on s'incorpora el dispositiu com dels mètodes per a processar la informació obtinguda. Una de les aplicacions amb més potencial és l'obtenció de mesures del SIPPER instal·lat en un vehicle submarí autònom. Aquests tipus de vehicles (**fig. 4**) es coneixen amb les sigles AUV (de l'anglès, *autonomous underwater vehicle*). Els vehicles autònoms es poden programar per fer diferents tipus de transsectes i poden tenir diferents graus d'autonomia (en alguns casos poden arribar a fer recorreguts de centenars de quilòmetres abans de retornar al punt d'origen). Un dels grans reptes tecnològics ha estat proporcionar-los la capacitat de situar-se amb precisió quan estan submergits (els sistemes de localització per satèl·lit com el GPS no es poden utilitzar sota l'aigua). A grans trets, les línies de recerca per estimar la localització dels AUV es basen o bé en el disseny de dispositius que estimen el moviment del vehicle i d'algorismes que permeten la reconstrucció de la seva trajectòria i posició (Stefan *et al.*, 2001; Chong-Moo *et al.*, 2005, entre d'altres), o bé en la creació de *mapes de concurrència*. El concepte de mapa de concurrència es va originar a partir dels sistemes de robots que havien de funcionar dins dels edificis (on tampoc no es pot utilitzar la localització per satèl·lit). La idea bàsica és intentar reproduir el mateix que faríem nosaltres quan explorem un lloc desconegut: ens fixem en punts de referència singulars a partir dels quals ens situem. En el cas del robot, cal que disposi d'un element que emuli la nostra vista (una càmera, per exemple) amb el qual es detecten elements singulars de l'entorn (en el cas dels robots dins un edifici, aquests elements singulars serien,

per exemple, els angles entre les parets i la presència d'una porta o d'una finestra). El robot és capaç d'identificar aquests elements singulars, situar-los en l'espai i crear-ne un mapa intern (el mapa de concurrència) a partir del qual és capaç de situar-s'hi. En el cas dels AUV, la recerca per obtenir mapes de concurrència utilitza càmeres subaquàtiques (García-Campos, 2001) o sonars (Tena-Ruiz *et al.*, 2004) com a instruments per a detectar els elements singulars del paisatge submarí.

Cal dir que actualment ja s'han assolit sistemes de localització amb errors de posicionament inferiors als 5 m en horitzontal i 0,1 m en vertical en qualsevol punt del recorregut. Malgrat això, els sistemes actuals són força cars i s'enfoca la recerca a desenvolupar-ne de nous amb la mateixa precisió, però amb un cost molt inferior.

En qualsevol cas, si es disposa dels recursos econòmics, avui ja es poden aconseguir sistemes combinats de SIPPER amb AUV que proporcionen les imatges obtingudes totalment georeferenciades: cada imatge d'un organisme pot tenir associades les coordenades x , y , z i l'instant t en què s'ha obtingut. Si tenim present que un sistema d'aquestes característiques pot proporcionar milers d'imatges en un interval de temps relativament breu (d'algunes hores fins a pocs dies d'observació), podem veure el potencial que pot tenir aquest sistema si es vol caracteritzar la distribució dels organismes zooplanctònics.

Tot i així, la restricció més important que hi hauria per a aplicar aquest sistema seria l'esforç humà necessari per a classificar les imatges. La línia de recerca del grup del Departament de Ciències Computacionals i Enginyeria de la Universitat de Florida del Sud està orientada a solucionar aquest problema. El resultat d'aquesta recerca ha donat lloc al programari denominat Plankton Image Classification and Extraction Software (PICES). Els fonaments matemàtics per a la classificació automàtica es basen en el *support vector machine* (SVM). La descripció de la metodologia emprada en aquesta classificació està fora de l'abast d'aquest article (per a més informació, consulteu Luo *et al.*, 2004), però cal esmentar que els resultats obtinguts són prou bons per a poder proporcionar una caracterització taxonòmica de les mostres a partir de la classificació automàtica. L'aplicació d'aquest sistema pot donar, en alguns casos, estimacions d'abundàncies molt superiors a les basades en els sistemes de xarxes de recollida, especialment pel que fa al zooplàncton gelatinós (Remsen *et al.*, 2004), que suggereix la importància d'utilitzar, si més no de manera complementària, sistemes basats en aquestes tecnologies.

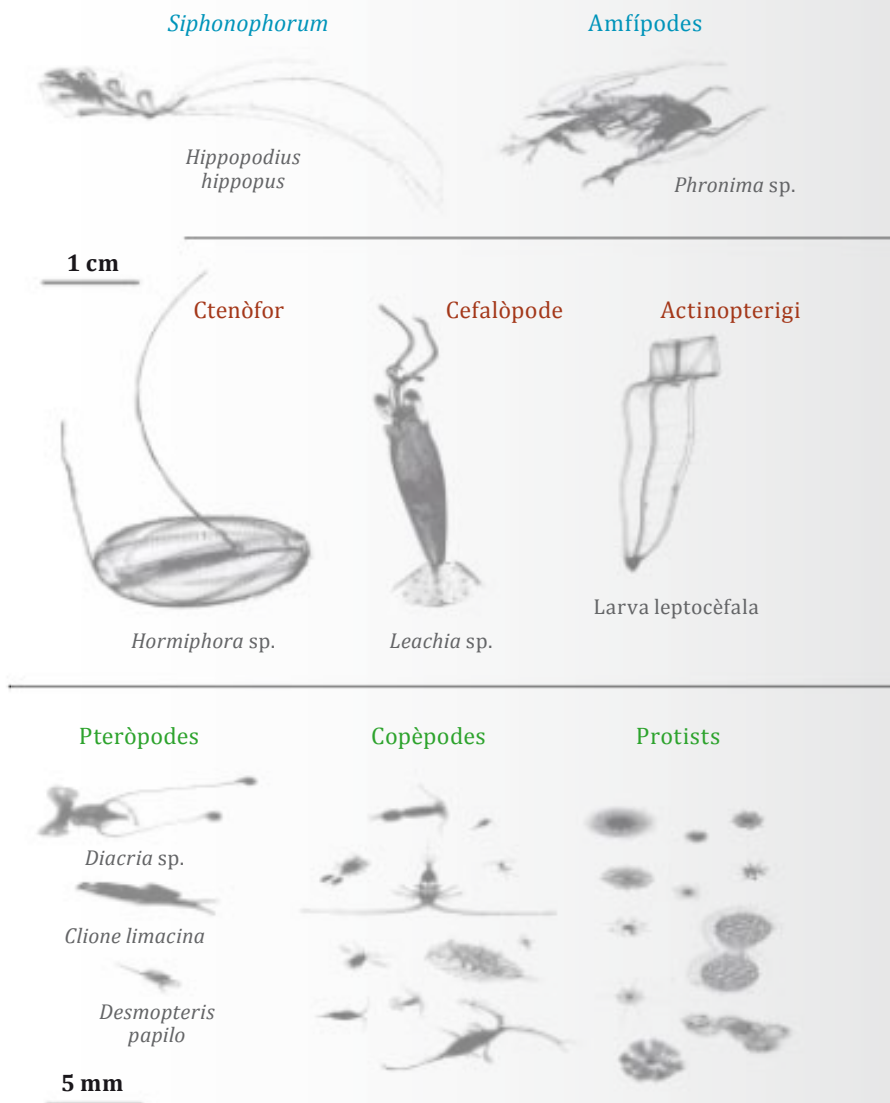


Figura 3. Selecció d'imatges obtingudes a partir de SIPPER en una campanya a l'oceà Pacífic. Fotografies d'Andrew Remsen.



Figura 4. Instal·lació del primer prototipus de SIPPER al vehicle submarí autònom Ocean Explorer, en una campanya realitzada prop de l'illa Lee Stocking a les Bahames. Fotografia de Jim Patten, del Centre de Tecnologia Oceànica de la Universitat de Florida del Sud.

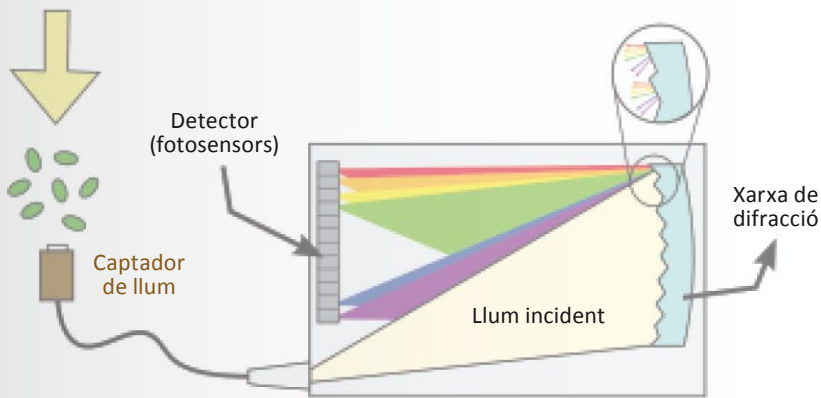


Figura 5. Esquema general d'obtenció d'una mesura hiperespectral. La llum captada pel receptor es descompon mitjançant la xarxa de difracció. Cada fotosensor capta llum d'una banda estreta de longitud d'ones. Atès que el nombre de sensors és elevat (actualment de centenars a milers) l'espectre de llum es pot obtenir amb una resolució espectral molt elevada.

Figura 6. Diagrama on es mostren els elements més importants per classificar cultius algal a partir de les dades hiperespectrals de fluorescència i l'anàlisi derivada dels mapes autoorganitzats. Els cultius s'han escollit com a representants de diferents grups taxonòmics (Am: *Alexandrium minutum*, Dinophyceae; Thwi: *Thalassiosira weissflogii*, Bacillariophyceae; Duna: *Dunaliella primolecta*, Chlorophyceae; Iso: *Isochrysis galbana*, Prymnesiophyceae; Pl: *Pleurochrysis elongata*, Prymnesiophyceae; Syn: *Synechococcus sp.*, Cyanophyceae; Ost: *Ostreococcus sp.*, Prasinophyceae).

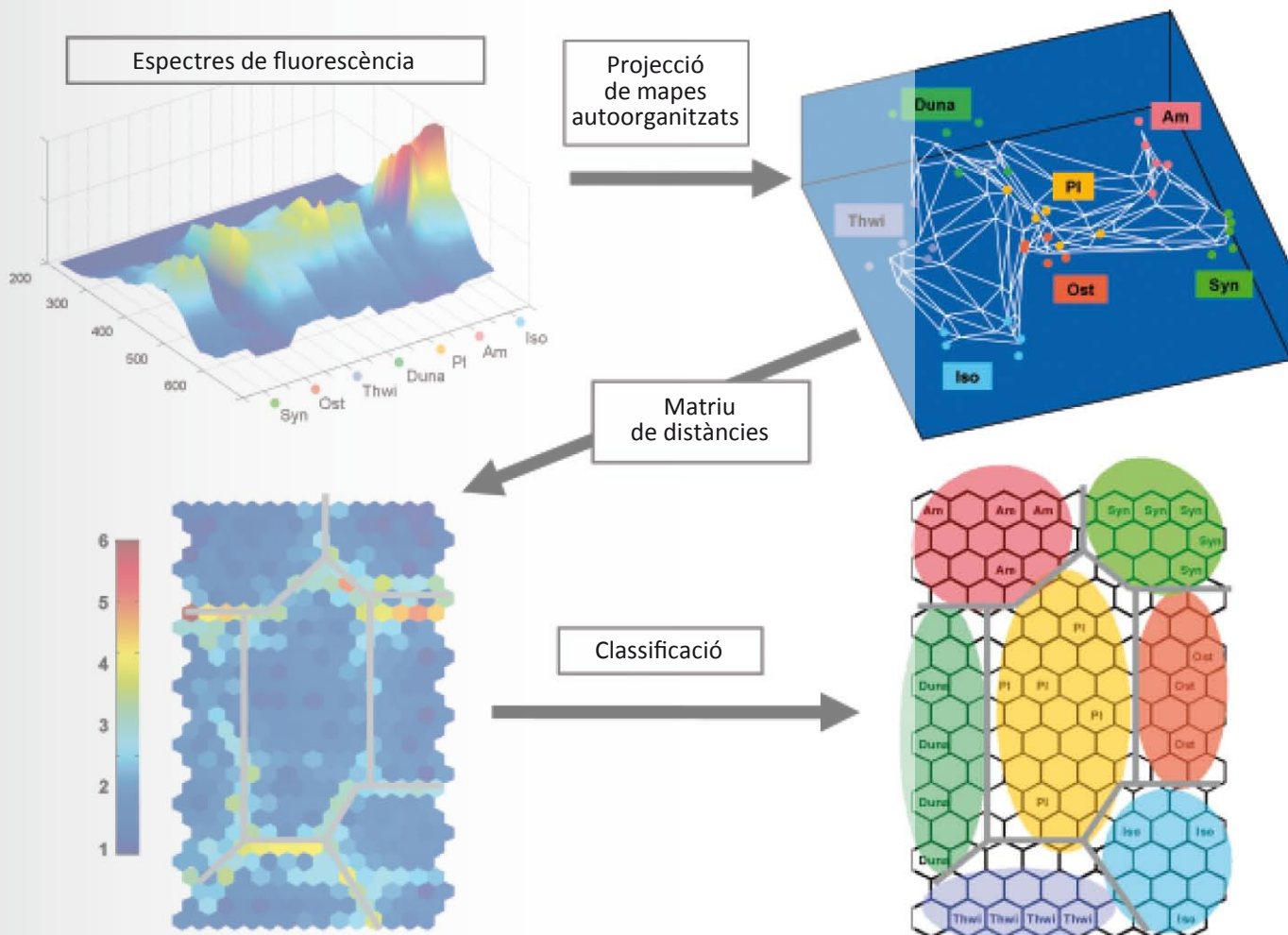
EXEMPLE 2

Quina és la distribució espacial del fitoplàncton?

Una nova línia de recerca a la UTM

Una pregunta semblant a l'anterior planteja nous reptes tecnològics a solucionar. En el cas del fitoplàncton també s'han plantejat solucions que es basen a adquirir i analitzar imatges (Sieracki *et al.*, 1998). A la UTM, però, on en els darrers anys s'ha iniciat una nova secció de recerca tecnològica, s'ha apostat per obrir una nova línia alternativa per a intentar aquest tipus de classificació. Aquesta línia es basa en l'anàlisi de mesures radiomètriques i, més concretament, en l'anàlisi de mesures hiperespectrals. El terme *hiper-espectral* fa referència a les dades de l'espectre lumínic amb una resolució molt elevada, des de centenars fins a milers de mostres per a cada espectre. El sistema d'adquisició d'aquest tipus de mesures s'esquematitza en la **figura 5**.

La identificació que es basa en aquest tipus de dades té pros i contres: d'una banda, la resolució taxonòmica que es pot assolir potencialment és relativament baixa (l'objectiu final és



poder identificar grans grups algal), però, de l'altra, les mesures òptiques no requereixen cap interacció física amb la mostra (es poden obtenir remotament) i permeten identificar els organismes sense modificar-ne la distribució espacial original. Aquesta característica és especialment important a l'hora d'estudiar interaccions dels organismes amb els processos hidrodinàmics a petita escala, on pot interessar conèixer la distribució d'organismes amb resolucions molt elevades (gairebé una dada cada pocs centímetres o, fins i tot, mil·límetres). Actualment, això només és possible amb aquest tipus d'instruments que acabem de comentar. A més, l'anàlisi de dades radiomètriques es pot utilitzar per a caracteritzar paral·lelament altres elements d'interès presents a l'aigua (com ara matèria orgànica dissolta o sòlids en suspensió), a la vegada que els resultats obtinguts es poden relacionar molt més fàcilment amb mesures complementàries a altres escales d'observació, especialment imatges de satèl·lit.

Línies d'innovació

Tot i que el grup de recerca s'ha format recentment, ja es poden destacar tres grans àrees en les quals s'han obtingut resultats relacionats amb aquesta línia d'innovació:

a) Sensors de baix cost i consum.

Actualment ja hi ha sensors hiperespectrals comercials, però el cost i el consum en restringeixen força l'ús en alguns estudis (especialment quan es plantejen mesures hiperespectrals en boies a la deriva o equips autònoms, on les restriccions de consum són molt elevades). L'equip de recerca ha dissenyat un sensor que permet obtenir mesures hiperespectrals amb un consum semblant al que tenen altres equips oceanogràfics estàndards (sensors de conductivitat o temperatura, per exemple).

b) Sensors hiperespectrals passius.

Aquest tipus de sensors utilitzen la llum solar com a font d'il·luminació. Actualment estem caracteritzant sensors comercials i se'n modelitza el comportament per obtenir-ne mesures subaquàtiques. L'objectiu és avaluar la capacitat que es tindrà per discriminar diferents grups d'organismes utilitzant la llum del sol com a font d'il·luminació.

c) Sensors hiperespectrals actius.

Aquest tipus de tècnica utilitza fonts de

llum pròpies i s'analitzen fonamentalment dades hiperespectrals de fluorescència. L'àrea de recerca en la qual es treballa actualment està enfocada en metodologies de classificació basades en mapes autoorganitzats (en anglès, *self organizing maps* [SOM]). A grans trets, un mapa autoorganitzat és un tipus de xarxa neuronal que permet representar mostres que tenen una dimensió molt elevada, com és el cas de les dades de fluorescència hiperespectral, en sistemes de dimensió molt més reduïda (normalment gràfics bidimensionals). En aquest cas, aquest tipus de representació pot permetre classificar les algues en grans grups. Tot i que la descripció detallada de la metodologia emprada en aquesta classificació també està fora de l'abast d'aquest article (per a més detalls, podeu consultar Aymerich *et al.*, 2008), en la **figura 6** es mostra un exemple gràfic dels procediments i dels resultats de classificació que s'han obtingut amb aquest tipus de tècniques.

En resum, en el primer exemple s'ha mostrat que la innovació instrumental (SIPPER) combinada amb la de plataformes d'observació (AUV) i els mètodes de processament de la informació (PICES), han proporcionat un nou sistema d'observació integrat, la informació del qual pot permetre encarar la recerca de la dinàmica espaciotemporal del zooplàncton des d'una perspectiva totalment nova. Anàlogament, l'aposta per la innovació tecnològica que la UTM porta a terme pot donar noves eines que permetin en el futur enfocar de manera semblant l'estudi dels organismes fitoplànctònics. |

Referències bibliogràfiques

- AYMERICH, I. [et al.] (2008). «A fast technique of phytoplankton fluorescence spectra classification based on the Self-Organizing Maps». *Appl. Spectrosc.* [En revisió]
- CHONG-MOO, L. [et al.] (2005). «Underwater Navigation System Based on Inertial Sensor and Doppler Velocity Log Using Indirect Feedback Kalman Filter». *Int. J. Offshore Polar Eng.*, 15 (2), p. 88-95.
- GARCIA-CAMPOS, R. (2001). *A proposal to estimate the motion of an underwater vehicle through visual mosaicking*. Universitat de Girona. [Tesi doctoral]
- LUO, T. [et al.] (2004). «Recognizing Plankton Images From the Shadow Image Particle Profiling Evaluation Recorder». *IEEE T Syst Man Cy B.*, 34 (4), p. 1753-1762.
- REMSEN, T. [et al.] (2004). «What you see is not what you catch: a comparison of currently collected net, Optical Plankton Counter, and Shadowed Image Particle Profiling Evaluation Recorder data from the northeast Gulf of Mexico». *Deep-Sea Res. Part I*, 51, p. 129-151.
- SAMSON, S. [et al.] (2001). «A system for high-resolution zooplankton imaging». *IEEE J. Oceanic Eng.*, 26 (4), p. 671-676.
- SIERACKI, CK [et al.] (1998). «An imaging-in-flow system for automated analysis of marine microplankton». *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 168, p. 285-296.
- STEFAN, B. [et al.] (2001). «Autonomous underwater navigation and control». *Robotica*, 19, p. 481-496.
- TENA-RUIZ, I. [et al.] (2004). «Concurrent mapping and localization using sidescan sonar». *IEEE J Oceanic Eng.*, 29 (2), p. 442-456.

Jaume Piera
(Barcelona, 1966)



És enginyer tècnic en telecomunicacions per l'EUETT (UPC, 1991), llicenciat en biologia per la UB (1998) i doctor en ciències ambientals per la UdG (2002). Professor lector a la UPC (2002 -2005), actualment és científic titular de la UTM (CSIC). Ha centrat la recerca en els sistemes d'instrumentació per a l'observació de processos a petita escala, i ha publicat sobre diferents disciplines (com ara l'ecologia, l'oceanografia física o la instrumentació). Actualment ha expandit la seva àrea de recerca a altres sistemes d'observació, com els observatoris submarins permanents o la instrumentació combinada amb la intel·ligència artificial.