

CLIMA, ECOSISTEMI MARINI E ADATTAMENTO

NEGLI ULTIMI 10-15 ANNI LE TEMPERATURE DELL'ACQUA DI MARE SI SONO ALZATE CON UNA VELOCITÀ MAI REGISTRATA IN PRECEDENZA, CON CAMBIAMENTI SU HABITAT, ECOSISTEMI E ORGANISMI. ACIDIFICAZIONE, RIDUZIONE DI OSSIGENO, ALTERAZIONI NELLA PRODUZIONE DI CARBONIO ORGANICO HANNO IMPLICAZIONI IMPORTANTI SULLA VITA DEI MARI.

I cambiamenti climatici in corso hanno la potenzialità di alterare gli ecosistemi oceanici in tempi molto più rapidi dei cambiamenti che avvengono negli ecosistemi terrestri con effetti diversi nelle diverse aree del globo. Gli oceani giocano un ruolo fondamentale nello scambio di CO₂ con l'atmosfera e, fin dai tempi preindustriali, gli oceani hanno assorbito circa la metà delle emissioni di CO₂ di origine antropica. Allo stato attuale, i cambiamenti globali hanno provocato una diminuzione del pH medio delle acque superficiali dell'oceano di 0.1 unità rispetto alla situazione pre-industriale e si prevede una diminuzione di 0.4 unità entro l'anno 2100 nonostante la regolamentazione industriale sulle emissioni di gas (Caldeira & Wickett 2003).

I cambiamenti climatici globali influenzano tutti i livelli dell'organizzazione ecologica, oltre che nella struttura e funzionamento degli ecosistemi, e possono avere effetti completamente differenti se si considerano singole specie, oppure fasi diverse del ciclo vitale di un organismo piuttosto che popolamenti su scala di habitat o di ecosistema. Risulta quindi difficile fare previsioni accurate di cambiamenti ecologici futuri per livelli complessi di biodiversità. Bisogna inoltre sottolineare il fatto che l'enorme varietà di processi e risposte legati ai cambiamenti climatici interagisce con altri disturbi antropici e gli effetti sinergici che ne derivano sono poco prevedibili e difficili da gestire. Ci sono ormai evidenze che mari posti alla stessa latitudine possono mostrare risposte differenti ai cambiamenti climatici globali in quanto differiscono ampiamente sia per le caratteristiche abiotiche (profondità, salinità e correnti) e sia per quelle biotiche (biogeografia, biodiversità e rete trofica; Philippart et al. 2011). Gli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini sono



FOTO: EYAL KAPLAN

visibili attraverso le variazioni della temperatura e della disponibilità delle risorse, mediante fenomeni di acidificazione e deossigenazione, con conseguenti eventi di ipossia e/o anossia. Queste alterazioni delle normali condizioni ambientali influenzano l'abbondanza, la diversità e la distribuzione spaziale delle specie, in particolare quelle endemiche, e possono favorire l'ingresso di specie invasive con possibili conseguenze sul funzionamento degli ecosistemi.

Nel corso degli ultimi 10-15 anni, le temperature dell'acqua di mare si sono alzate con una velocità mai registrata in precedenza e hanno provocato la rapida riduzione della copertura di ghiaccio nell'Artico, la riduzione del volume di ghiaccio in Antartide, lo scioglimento dei ghiacciai, l'aumento del livello del mare, l'aumento della frequenza di eventi estremi come tempeste, precipitazioni intense e uragani (Solomon et al. 2007; Ipcc 2007; Hoegh-Guldberg & Bruno 2010). Le variazioni di temperatura non riguardano solo le caratteristiche ambientali degli oceani (le correnti, la stratificazione della

colonna d'acqua e i cicli biogeochimici), ma anche la produzione primaria, i tassi metabolici, di crescita, fertilità e mortalità degli organismi (McGowan et al. 1998), le dinamiche delle popolazioni con conseguenze sulla distribuzione anche biogeografica delle specie. I cambiamenti si verificano nei singoli individui, nelle popolazioni (in termini sia di storia vitale sia di distribuzione geografica) e nelle comunità (composizione in specie e loro turnover nello spazio), oltre che nella struttura e funzionamento degli ecosistemi (McCarty 2001; Pörtner 2002; Beardall & Raven 2004). Tra gli effetti dell'aumento della temperatura degli oceani possiamo anche includere le variazioni dell'areale di distribuzione delle specie dovute sia a fattori diretti (stress termico) sia indiretti (cambiamento regime idrologico e correnti): tali variazioni comportano tipicamente uno spostamento di specie temperate verso latitudini più alte, con possibili estinzioni locali in quelle aree dove l'espansione verso latitudini maggiori è limitata dalla presenza di barriere fisiche (Hickling 2006; Pearson 2006). I cambiamenti che derivano dagli *shift* di

temperatura sono particolarmente rilevanti da un punto di vista ecologico, poiché la temperatura è un fattore in grado di influenzare la biodiversità su larga scala spaziale (Worm & Lotze 2009; Tittensor et al. 2010). Alcune specie di invertebrati bentonici sono molto più vulnerabili rispetto ad altre per la loro ridotta capacità di adattarsi ai cambiamenti che hanno luogo negli ambienti in cui vivono (Przeslawski et al. 2008). I cambiamenti ambientali influenzano processi ecologici importanti come la dispersione larvale, il successo della sopravvivenza delle nuove progenie, la struttura e composizione delle comunità, la diffusione e presenza di specie invasive che sono trasportate da attività antropiche in regioni biogeografiche nelle quali non erano presenti (Occhipinti-Ambrogi 2007; Przeslawski et al. 2008). Inoltre l'effetto combinato dell'aumento della temperatura con altri fattori di stress (come acidificazione, deossigenazione e distruzione degli habitat), può facilmente modificare la distribuzione delle specie e determinare una riorganizzazione delle comunità portando in alcuni casi a una riduzione della diversità (Thomas et al. 2004; Pound et al. 2006; Mora et al. 2011). La diminuzione del pH provoca il fenomeno dell'acidificazione degli oceani che ha effetti diretti sul metabolismo degli organismi e sulla loro capacità di usare l'energia per l'accrescimento e la riproduzione (Jager 2012). In particolare, l'acidificazione degli oceani può interferire con la formazione di strutture calcaree sia in organismi planctonici microscopici (coccolitofori, foraminiferi e pteropodi) sia in un'ampia gamma di organismi bentonici (ad esempio molluschi, echinodermi, crostacei, briozoi, policheti serpulidi, spugne e coralli). Inoltre la diminuzione del pH può potenzialmente alterare anche le dinamiche biogeochimiche del carbonio organico e di altre sostanze nutritive negli ecosistemi marini. La maggiore dissoluzione di carbonato di calcio lungo la colonna d'acqua, può ridurre il contributo di CaCO_3 al carbonio presente nei sedimenti di mare profondo (Passow 2004), causando una maggiore re-mineralizzazione di carbonio organico in acque poco profonde e una diminuzione dell'efficienza di assorbimento di CO_2 negli ecosistemi marini.

Un'altra grave conseguenza dei cambiamenti climatici è la diminuzione del contenuto di O_2 disciolto negli oceani (Keeling et al. 2010; Gruber 2011). Il riscaldamento globale può aumentare la stratificazione della colonna d'acqua e ridurre la solubilità dell' O_2 , determinandone una drastica riduzione (Sarmiento et al. 1998; Keeling & Garcia



2002), con importanti conseguenze sulla componente biotica (Coma et al. 2009). I cambiamenti globali hanno accentuato il fenomeno della deossigenazione e hanno contribuito all'estensione delle zone di minimo di ossigeno (*Oxygen Minimum Zone*, Omz) su scala globale, provocando severe conseguenze sui cicli biogeochimici del carbonio, azoto, e di molti altri elementi (P, Fe, Mn ecc.) (Helly & Levin 2004; Vaquer-Sunyer & Duarte 2008). La maggior parte degli organismi non hanno problemi con l' O_2 , purché le concentrazioni siano abbastanza elevate per garantire loro la sopravvivenza. Tuttavia, una volta che l' O_2 scende sotto una certa soglia, l'organismo soffre di una varietà di stress, che possono portare addirittura alla morte dell'individuo, se le concentrazioni rimangono basse per tempi troppo lunghi (condizioni di ipossia). Le soglie di tolleranza alle condizioni di ipossia variano notevolmente tra i taxa marini, in generale pesci e crostacei tendono a essere più sensibili rispetto ad altri gruppi (Vaquer-Sunyer & Duarte 2008). I cambiamenti climatici globali possono anche alterare la produzione di carbonio organico sulla superficie degli oceani, e questo cambiamento influenza con un effetto a cascata i diversi livelli della rete trofica sia pelagica sia bentonica. L'aumentata stratificazione della colonna d'acqua, dovuta al riscaldamento superficiale in alcune regioni oceaniche, può ridurre considerevolmente il rimescolamento della colonna d'acqua con effetti importanti sulla distribuzione dei nutrienti, sulla produzione primaria superficiale e sull'export di produzione agli ambienti bentonici (Bopp et al. 2001; Danovaro et al. 2001). Nel caso di una riduzione della quantità di

cibo che raggiunge il fondo la risposta del benthos si manifesta con una significativa riduzione dell'abbondanza e della biomassa di tutte le componenti bentoniche (dai procarioti alla megafauna), spesso associati a una alterazione della biodiversità e si possono osservare cambiamenti nella struttura di comunità (Smith et al. 2008; Danovaro et al. 2004). Il cambiamento globale può avere importanti implicazioni anche sugli stock ittici, come conseguenza della diversa disponibilità delle loro potenziali fonti di cibo (ad esempio riduzione dell'abbondanza dello zooplankton per i giovanili di pesci; Hays et al. 2006).

Strategie di adattamento

La Convenzione quadro delle Nazioni unite sul cambiamento climatico (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, Unfccc), entrata in vigore il 21 marzo del 1994, ha come obiettivo "la stabilizzazione delle concentrazioni atmosferiche dei gas serra ad un livello tale da prevenire pericolose interferenze delle attività umane con il sistema climatico". Questo livello di stabilizzazione deve essere raggiunto in un periodo di tempo tale da permettere agli ecosistemi di adattarsi in modo naturale ai cambiamenti climatici e attraverso l'adozione di misure che riducano gli impatti negativi di tali cambiamenti sia sugli ecosistemi sia sui sistemi sociali. In questo contesto, dunque, le misure di adattamento sono definite come le risposte antropiche al cambiamento climatico atte a limitarne gli effetti negativi su infrastrutture e sistemi naturali (Julius & West 2007). Una prima azione necessaria è il

miglioramento dello stato e della resilienza dei sistemi marini, data la loro profonda influenza sugli aspetti sociali ed economici delle nostre società. Tuttavia non è pensabile intervenire senza un'opportuna pianificazione spaziale marina per la gestione sostenibile dei beni e dei servizi ecosistemici.

Per poter affrontare il tema della vulnerabilità degli ecosistemi marini ai cambiamenti globali è importante:

- identificare specie chiave nei diversi sistemi e le fasi del ciclo vitale ritenute più suscettibili alle condizioni che stanno cambiando

- includere, nell'analisi della vulnerabilità, le interazioni fra le diverse specie e le diverse componenti del sistema studiato. Questo approccio integrato, che vede studi descrittivi condotti su ampia scala spaziale affiancati a studi sperimentali e modelli che incorporano budget energetici, può senz'altro contribuire all'identificazione delle condizioni abiotiche che sono in grado di influenzare in modo rilevante processi ecologici chiave.

Nel contesto degli ecosistemi marini, le strategie di adattamento possono essere individuate anche attraverso la creazione di nuove aree marine protette (Amp) o l'implementazione di aree già esistenti, in corrispondenza di zone prestabilite caratterizzate da un alto tasso di biodiversità. Lo scopo di un'area marina protetta è quella di garantire che le variabili chiave, che stanno alla base della funzionalità ecosistemica, si mantengano all'interno di parametri sostenibili.

L'efficacia di questa misura dipende dall'individuazione preventiva dei criteri in grado di attribuire una priorità alla valenza ecologica dell'area da proteggere, senza perdere di vista l'importanza degli aspetti socio-economici. Successivamente è necessaria l'inclusione delle aree marine protette in network di ampia scala in modo da favorire l'interazione e la connettività tra i diversi ecosistemi marini (Roberts et al. 2003).

Occorre considerare che, oltre all'alterazione dei parametri climatici, gli ecosistemi marini sono sottoposti a pressioni dirette di origine antropica, per cui l'adattamento ai cambiamenti in atto richiede azioni volte a diminuire, ad esempio il sovra-sfruttamento degli stock ittici e i fenomeni di alterazione e/o contaminazione (Madwdsley et al., 2009). Certamente, il processo di adattamento risulta complesso in quanto coinvolge fattori non necessariamente di natura ecologica, ma anche politico-economica. Lo dimostra l'analisi dei costi di un possibile "non adattamento" che spesso

superano quelli legati alle attività di riduzione del rischio (Ipcc, 2007). Alla base del processo di individuazione delle corrette strategie adattative risiede una profonda conoscenza degli ecosistemi e delle loro specificità. Ottenere un'adeguata base conoscitiva è possibile attraverso le attività di monitoraggio a lungo termine sia su scala locale che globale. La raccolta e integrazione di tutte le informazioni sulle condizioni ambientali presenti e passate di una determinata area, permette di identificarne i livelli di rischio, di suscettibilità e la soglia di adattamento delle singole specie presenti al suo interno. Infine, occorre mettere in relazione le informazioni ricavate dalle attività di monitoraggio con le attività antropiche e con i cambiamenti climatici in atto nelle aree di studio.

Tra i vari strumenti che permettono una valutazione integrata degli ecosistemi vi sono sicuramente i Sistemi informativi geografici (*Geographic Information System*, Gis). Da alcuni anni lo strumento Gis viene applicato per la pianificazione spaziale marina e per la gestione su base ecosistemica, nonché nell'ambito delle strategie adattative ai cambiamenti climatici. A titolo esemplificativo, con questo strumento è possibile sia simulare i potenziali impatti dovuti all'aumento del livello del mare sulle coste e nelle zone umide, sia correlare e visualizzare le diverse tipologie di impatto (*shift* di temperatura o acidificazione degli oceani). È inoltre possibile individuare

gli indicatori sullo stato di conservazione di un ecosistema, collegando a cascata diversi modelli di analisi (dove i risultati di un modello rappresentano gli input per il modello successivo).

Oggi questo strumento riveste un ruolo essenziale, perché le tecniche sviluppate a supporto della pianificazione spaziale marina partono proprio dall'analisi della distribuzione spaziale degli habitat marini, delle risorse e delle pressioni umane, note o previste/ipotizzate, al fine di consentire l'identificazione delle soluzioni gestionali più adeguate (Tunisi, 2012). Il Gis può senza dubbio contribuire all'applicazione di approcci gestionali basati sulla valutazione integrata degli ecosistemi marini, realizzata in modo da disporre di elementi conoscitivi utili ai *decision maker* nella scelta di differenti alternative gestionali (Dovere, 2008; Agardy et al, 2011). È dunque auspicabile che questo strumento venga sempre più utilizzato per promuovere politiche di gestione sostenibile del territorio e di adattamento ai cambiamenti globali.

Roberto Danovaro, Cristina Gambi, Beatrice Gatto, Eleonora Gioia, Lorenzo Sangelantoni, Fausto Marincioni

Dipartimento Scienze vita e ambiente, Università Politecnica delle Marche, Ancona



FOTO: ZANRHA

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Agardy T, Davis J, Sherwood K, Vestergaard O., 2011, *Taking Steps toward Marine and Coastal Ecosystem-Based Management- An Introductory Guide*, UNEP Regional Seas Reports and Studies, 189: 68 pp.
- Beardall J, Raven JA, 2004, "The potential effects of global climate change on microalgal photosynthesis, growth and ecology", *Phycologia*, 43(1), 26-40.
- Bopp L, Monfray P, Aumont O, Dufresne J-L, Le Treut H, Madec G, Terray L & Orr JC, 2001, "Potential impact of climate change on marine export production", *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 81-99.
- Caldeira K & Wickett ME, 2003, "Anthropogenic carbon and ocean pH", *Nature*, 425, 365.
- Coma R, Ribes M, Serrano E, Jiménez E, Salat J, Pascual J, 2009, "Global warming-enhanced stratification and mass mortality events in the Mediterranean", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 106, 6176-6181.
- Danovaro R, Dell'Anno A, Fabiano M, Pusceddu A & Tselepidis A, 2001, "Deep-sea ecosystem response to climate changes: the eastern Mediterranean case study", *Trends in Ecology and Evolution*, 16, 505-510.
- Danovaro R, Dell'Anno A, Pusceddu A, 2004, "Biodiversity response to climate change in a warm deep sea", *Ecology Letters*, 7(9), 821-828.
- Douve F., 2008, "The importance of marine spatial planning in advancing ecosystem-based sea use management", *Mar. Policy*, 32: 182-191.
- Gruber N, 2011, "Warming up, turning sour, losing breath: ocean biogeochemistry under global change", *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 369, 1980-1996.
- Hays GC, Richardson AJ & Robinson C, 2006, "Climate change and marine plankton", *Trends in Ecology and Evolution*, 20(6), 337-344.
- Helly JJ, Levin LA, 2004, "Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins", *Deep-Sea Research, Part I* 51,1159-1168.
- Hickling R, Roy DB, Hill JK, Fox R & Thomas CD, 2006, "The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards", *Global Change Biology*, 12, 450-455.
- Hoegh-Guldberg O & Bruno JF, 2010, "The impact of climate change on the world's marine ecosystems", *Science*, 328, 1523-528.
- IPCC, 2007, *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jager T, 2012, "Bad habits die hard; the NOEC's persistence reflects poorly on ecotoxicology", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31, 228-229.
- Julius, S. H., & J. M. West. 2007. "Preliminary review of adaptation options for climate-sensitive ecosystems and resources", synthesis and assessment product 4.4. U.S. Climate Change Science Program, Washington, D.C. Available from <http://www.climatechange.gov/Library/sap/sap4-4/default.php> (accessed November 2013).
- Keeling RF & Garcia H, 2002, "The change in oceanic O₂ inventory associated with recent global warming", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(12), 7848-53.
- Keeling RF, Körtzinger A & Gruber N, 2010, "Ocean Deoxygenation in a Warming World", *Annual Review of Marine Science*, 2, 199-229.
- Madwdsley J.R., O'Malley R., & Ojima D. S., 2009, *Conservation Biology*, Volume 23, No. 5, 1080-1089 C _2009, Society for Conservation Biology.
- McCarty JP, 2001, "Ecological consequences of recent climate change", *Conservation Biology*, 15, 320-331.
- McGowan JA, Cayan DR & LeRoy MD, 1998, "Climate-ocean variability and ecosystem response in the Northeast Pacific", *Science*, 281, 210-217.
- Mora C., Aburto-Oropeza, O., Ayala-Bocos, A., Ayotte, P.M., Banks, S., Bauman, A.G., Beger, M., Bessudo, S., Booth, D.J., Brokovich, E., Brooks, A., Chabanet, P., Cinner, J.E., Cortés, J., Cruz-Motta, J.J., Cupul-Magaña, A., DeMartini, E.E., Edgar, G.J., Feary, D.A., Ferse, S.C.A., Friedlander, A.M., Gaston, K.J., Gough, C., Graham, N.A.J., Green, A., Guzman, H., Hardt, M., Kulbicki, M., Letourneur, Y., Lpez-Pérez, A., Loreau, M., Loya, Y., Martinez, C., Mascareñas-Osorio, I., Morove, T., Nadon, M.-O., Nakamura, Y., Paredes, G., Polunin, N.V.C., Pratchett, M.S., Reyes Bonilla, H., Rivera, F., Sala, E., Sandin, S.A., Soler, G., Stuart-Smith, R., Tessier, E., Tittensor, D.P., Tupper, M., Usseglio, P., Vigliola, L., Wantiez, L., Williams, I., Wilson, S.K., Zapata, F.A. 2011, "Global human footprint on the linkage between biodiversity and ecosystem functioning in reef fishes", *PLoS Biology*, 9(4) e1000606.
- Occhipinti-Ambrogi A, 2007, "Global change and marine communities: Alien species and climate change", *Marine Pollution Bulletin*, 55, 342-352.
- Passow U, 2004, "Switching perspectives: Do mineral fluxes determine particulate organic carbon fluxes or vice versa?", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5,Q04002.
- Pearson RG, 2006, "Climate change and the migration capacity of species", *Trends in Ecology and Evolution*, 21, 111-113.
- Philippart CJM, Anadón R, Danovaro R, Dippner JW, Drinkwater KF, Hawkins SJ, Oguz T, O'Sullivan G & Reid PC, 2011, "Impacts of climate change on European marine ecosystems: Observations, expectations and indicators", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400, 52-69.
- Pörtner H-O, 2010, "Oxygen and capacity limitation of thermal tolerance: a matrix for integrating climate-related stressor effects in marine ecosystems", *Journal of Experimental Biology*, 213, 881-893.
- Pound JA, Bustamante MR, Coloma LA, Consuegra JA, Fogden MPL, Foster PN, La Marca E, Masters KL, Merino-Viteri A, Puschedorf R, Ron SR, Sanchez-Azofeifa GA, Still CJ & Young BE, 2006, "Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming", *Nature*, 439, 161-167.
- Przeslawski R, Ah Yong S, Byrne M, Worheide G & Hutchings P, 2008, "Beyond corals and fish: the effects of climate change on noncoral benthic invertebrates of tropical reefs", *Global Change Biology*, 14, 2773-2795.
- Roberts C. M., Andelman S., Branch G., Rodrigo H. Bustamante R.H., Castilla, J.C., Dugan J., Benjamin S., Halpern B.H., Lafferty K.D., Leslie H., Lubchenco J., Mcardle D., Possingham H.P., Ruckelshaus M., & Warner R.R., 2003, "Ecological criteria for evaluating candidate sites for marine reserves", *Ecological Applications*, 13(1) Supplement, 2003, pp. S199-S214 q 2003 by the Ecological Society of America.
- Sarmiento JL, Hughes TMC, Stouffer RJ & Manabe S, 1998, "Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming", *Nature*, 393, 245-49.
- Smith CR, De Leo FC, Bernardino AF, Sweetman AK & Martinez Arbizu P, 2008, "Abysal food limitation, ecosystem structure and climate change", *Trends in Ecology and Evolution*, 23,518-528.
- Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, 2007, *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Thomas CD, Cameron A, Green RE, Bakkenes M, Beaumont LJ, Collingham YC, Erasmus BFN, Ferreira de Siqueira M, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, van Jaarsveld AS, Midgley GF, Miles L, Ortega-Huerta MA, Peterson AT, Phillips OL & Williams SE, 2004, "Extinction risk from climate change", *Nature*, 427, 145-148.
- Tittensor DP, Mora C, Jetz W, Lotze HK, Ricard D, Vanden BE & Worm B, 2010, "Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa", *Nature*, 466, 1098-1101.
- Tunesi L, 2012, "The role of mapping for the integrated assessment of marine ecosystems", *Biol. Mar. Mediterr.*, 19 (1): 66-78.
- Vaquer-Sunyer R & Duarte CM, 2008, "Thresholds of hypoxia for marine biodiversity", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 105,15452-57.
- Worm B & Lotze HK, 2009, *Climate and Global Change: Observed Impacts on Planet Earth* (ed. Letcher, T.) 263-279 (Elsevier).