

# Bimestrale di Scienze darwin

NUMERO 47

EURO 6,50

## DESERTI DI GHIACCIO

La ricerca ai poli ci ha svelato non solo  
la storia climatica del pianeta ma anche  
l'esistenza di forme di vita estreme

SPED. ABB. POST. 45% - ART. 2, C. 20/B, L. 662/96 FILIALE DI VERONA - GENNAIO / FEBBRAIO 2012

### RICERCA

*Il profilo bibliometrico  
è uno strumento utile  
per valutare la produttività  
ma cela innumerevoli insidie*

**ARCHEOLOGIA**  
IL VINO PIÙ ANTICO  
DEL MEDITERRANEO

**ENERGIA**  
QUALE STRADA  
PER LA FUSIONE?

**COSMOLOGIA**  
LA CHIAVE  
DEL REBUS

[www.darwinweb.it](http://www.darwinweb.it)

## Direzione

Gianfranco Bangone, Gilberto Corbellini

## Editor-at-large

Anna Meldolesi

## Per questo numero si ringraziano

Oliva Menozzi, Vittorio Crobu,  
Donata Francese

## Redazione

via A. Kircher 7 - 00197 Roma  
telefono 06 8091271

Email: redazione@darwinweb.it

Web [www.darwinweb.it](http://www.darwinweb.it)

webmaster Luca Floris

## Board editoriale

Umberto Veronesi, IEO Milano  
Lucio Pinto, Fondazione Tronchetti Provera  
Alberto Costa, ESO Milano  
Giulio Cossu, Ist. San Raffaele, Milano  
Alberto Mantovani, Ist. Humanitas, Milano  
Rino Rappuoli, Novartis Vaccines, Siena  
Roger Pielke Jr, CIRES, Boulder  
Alberto Diaspro, Istituto Italiano  
di Tecnologia, Genova  
Giuseppe Macino, Sapienza, Università  
di Roma  
Fiorenzo Conti, Università di Ancona  
Luigi Guzzo, Oss. Astronomico di Brera  
Mario Clerici, Università di Milano  
Giulio Taroni, University of Wisconsin  
Daniel Kevles, Yale University  
Andrea Bonaccorsi, Scuola Superiore  
S. Anna, Pisa  
Edoardo Boncinelli, Univ. Vita-Salute,  
Milano  
Michele Boiani, Max Planck Institute  
Pietro Corsi, Oxford University

## Progetto grafico

Andrea Mattone

## Coordinamento grafico e impaginazione

Fabio Rizzo

## Editore

Editoriale Darwin S.r.l.  
Consiglio di amministrazione  
Emanuele Bevilacqua (presidente)  
Gianfranco Bangone  
Anna Meldolesi

## Sede legale

Via Latina 20 - 00179 Roma

## Promozione,

## marketing & pubblicità

Francesco Barbieri  
339 8396938

## Stampa

Arti Grafiche Boccia SpA - Salerno

## Distribuzione edicola

Press Di, Segrate, Milano

## Abbonamenti:

Telefono: 199 111 999 Fax: 030 319 8412

## Customer service estero:

tel 030 319 8354 - 02 66814363

Mail: abbonamenti@mondadori.it

## Servizio arretrati:

Telefono: 199 162171 Fax 02 92109002

Iscrizione al Tribunale di Roma

n. 226/2004 del 27/5/2004

## Direttore responsabile

Emanuele Bevilacqua

## Foto di copertina

Il Canale Neumayer in Antartide  
Glenn Grant/NSF

Copyright: le condizioni di utilizzo  
dei materiali contenuti in questa rivista  
sono concordate con i detentori.  
Se ciò non fosse stato possibile  
l'editore si dichiara disposto  
a riconoscere tali diritti.

## SOMMARIO



Questa rivista è pubblicata  
da Editoriale Darwin S.r.l  
con il sostegno della



Fondazione Silvio Tronchetti Provera  
per la Ricerca Scientifica e Tecnologica

|           |                      |                                            |                                             |
|-----------|----------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>3</b>  | <b>Editoriale</b>    | Prima è meglio                             | <i>Umberto Veronesi</i>                     |
| <b>6</b>  | <b>Energia</b>       | Quale strada per la fusione?               | <i>Daniel Clery</i>                         |
| <b>14</b> | <b>Spazio</b>        | Gli astronauti si allenano in grotta       |                                             |
| <b>18</b> | <b>Archeologia</b>   | Il vino più antico del Mediterraneo        | <i>M.R. Belgiorno, A. Lentini</i>           |
| <b>26</b> | <b>Paleontologia</b> | Un viaggio di un milione di anni           | <i>M.A. Tafuri, F. Di Vincenzo</i>          |
| <b>32</b> | <b>Policy Forum</b>  | Esperimenti necessari o giochi pericolosi? | <i>Gianfranco Bangone</i>                   |
| <b>38</b> | <b>Review</b>        | Si può misurare il lavoro scientifico?     | <i>Giuseppe De Nicolao</i>                  |
| <b>46</b> |                      | La chiave del rebus                        | <i>Luigi Guzzo</i>                          |
| <b>54</b> | <b>Interventi</b>    | Neuroetica e tribunali                     | <i>Gilberto Corbellini</i>                  |
| <b>56</b> |                      | Nell'era della cyberwar                    | <i>G. Ba.</i>                               |
| <b>58</b> |                      | Più libri e meno culle?                    | <i>Anna Meldolesi</i>                       |
| <b>61</b> | <b>LO SPECIALE</b>   | <b>RICERCA POLARE</b>                      |                                             |
| <b>62</b> |                      | Banchi alla deriva nel Mare Artico         | <i>Stefano Aliani et al.</i>                |
| <b>68</b> |                      | Il risveglio estivo del continente bianco  | <i>S. Schiapparelli, M. Taviani</i>         |
| <b>76</b> |                      | L'Antartide rivela il passato del clima    | <i>Valter Maggi</i>                         |
| <b>82</b> |                      | Risorse intrappolate fra i ghiacci         | <i>F. Talarico, F. Florindo, M. Taviani</i> |

## Le Rubriche

|           |                   |                                 |  |
|-----------|-------------------|---------------------------------|--|
| <b>31</b> | <b>Eurolandia</b> | La scienza ai tempi della crisi |  |
|-----------|-------------------|---------------------------------|--|



# RICERCA POLARE

## IN QUESTO SPECIALE

### CLIMA 62

*Banchi alla deriva  
nel Mare Artico*

### BIOLOGIA 68

*Il risveglio  
del Continente Bianco*

### ANTARTIDE 76

*Il passato  
del clima*

### GEOLOGIA 82

*Risorse intrappolate  
nei ghiacci*

**I**l 14 dicembre del 1911 l'esploratore norvegese Roald Amundsen raggiunge il Polo Sud. La memorabile impresa aveva richiesto il superamento di catene montuose e pericolosi crepacci in un lungo viaggio durato due mesi facendo affidamento soltanto su tre slitte e 36 cani. Il mondo venne a conoscenza di questo risultato solo nel marzo dell'anno seguente. È passato un secolo e nel frattempo l'Antartide, durante l'estate australe che corrisponde al nostro inverno, vede arrivare centinaia di ricercatori che trascorrono nel Continente Bianco un paio di mesi. A differenza dell'Artico, che non è un vero continente ma solo un mare ghiacciato, l'Antartide riveste grande interesse scientifico. Come spiega l'articolo di Walter Maggi, l'Antartide è una specie di cassaforte del clima: perforando migliaia di metri di ghiaccio ed estraendo delle carote i geologi sono stati in grado di ricostruire il passato climatico degli ultimi 820.000 anni e se tutto andrà per il verso giusto fra qualche anno si potrà arrivare a 1,5 milioni di anni. I dati che abbiamo coprono una parte significativa della storia climatica del Quaternario e in particolare l'alternarsi di periodi interglaciali freddi e periodi interglaciali caldi: questa specie di altalena della temperatura si è verificata otto volte negli ultimi 820.000 anni, con discrepanze non ancora pienamente comprese nei periodi caldi. Le temperature molto rigide del continente, in specie nell'inverno australe, lo rendono abbastanza inospitale per la vita: sono quasi assenti le piante e la rada flora è generalmente costituita da alghe, funghi e licheni. Le poche aree marine, libere dalla morsa del ghiaccio, ospitano batteri, alghe blu-azzurre e qualche piccolo crostaceo. Le terribili condizioni climatiche dell'Antartide sono tollerabili, come ci raccontano Stefano Schiaparelli e Marco Taviani, solo da queste lillipuziane meraviglie evolutive che sono state in grado di produrre anticongelanti che garantiscono la loro sopravvivenza anche a -30 gradi. Questo spiega perché le acque dell'Antartide nell'inverno australe presentino una limpidezza assoluta, dovuta alla quasi totale assenza di organismi. Ma durante l'estate australe si ha uno sviluppo incredibile di organismi planctonici che consentono ad altre centinaia di altre forme viventi di rinascere, anche se questo *bloom* dura poche settimane. I geologi, come ci raccontano Franco Talarico, Fabio Florindo e Marco Taviani, si sono lungamente occupati delle risorse minerarie dell'Antartide, non tanto a fini estrattivi, ma per comprenderne meglio la genesi. In un prossimo futuro, peraltro, questo continente potrebbe risolvere i problemi di acqua potabile per quei paesi che hanno scarse risorse idriche. L'Antartide contiene circa il 70% di tutte le riserve di acqua dolce della Terra e sono stati già fatti degli studi per catturare gli iceberg alla deriva. Questo per dire che il giorno in cui berremo l'acqua dell'Antartide non è necessariamente molto lontano.

Nell'emisfero esattamente opposto altri specialisti, stavolta alle Svalbard, hanno vivisezionato il Kongsfjorden dove sorge Ny-Ålesund, un avamposto mondiale della ricerca nell'Artico. L'intrusione di acqua relativamente calda nel fiordo è dovuta a una serie di correnti che rivelano fenomeni climatici a larga scala. Stefano Aliani e altri ci rivelano come, prelevando campioni di acqua e di carote del fondo, sia possibile avere determinanti informazioni su fenomeni straordinariamente complessi, la cui influenza può spingere il tempo perturbato verso Nord, toccando Scozia e Scandinavia, mentre determina condizioni secche nel Mediterraneo. Oppure l'esatto contrario, quando nella fase negativa l'alta pressione staziona sul polo.



## *Banchi alla deriva nel Mare Artico*

**Il ghiaccio del polo Nord si muove sotto la spinta  
di correnti marine che controllano il clima globale**

STEFANO ALIANI ET AL.

**L**A MATTINA LA BASE ARTICA Dirigibile Italia del Cnr ha l'odore del caffè. Attorno al tavolo della piccola cucina, i vari gruppi di lavoro, con in mano la tazza fumante, si incontrano e pianificano le attività della giornata: i fisici dell'atmosfera andranno alla torre meteorologica Climate Change Tower, i chimici raggiungeranno Gruvebadet, il laboratorio attrezzato per la misura di inquinanti in aria, e i geologi partiranno per le loro attività di campo. Gli oceanografi invece andranno all'interno del Kongsfjorden, il fiordo dove sorge Ny-Ålesund, avamposto mondiale della ricerca scientifica in Artico.

Lavorare in Artico è difficile per le condizioni estreme che si trovano, ma soprattutto in mare sono richieste attenzioni particolari. Per esempio durante le uscite in barca è indispensabile indossare enormi e scomodissime tute di sopravvivenza che permettono di galleggiare e di non perdere temperatura in caso di caduta accidentale in mare. L'acqua del fiordo in superficie è molto fredda, vicina al punto di congelamento ( $-2^{\circ}\text{C}$ ) e il nostro corpo resisterebbe poco tempo a queste temperature. Al di sotto di questo strato di acqua superfredda si trova, come per magia, uno strato d'acqua relativamente più calda a circa  $6^{\circ}\text{C}$ . Toccando i campioni d'acqua raccolti con le bottiglie Niskin, che prelevano acqua incontaminata a specifiche profondità, si percepisce fisicamente sulle mani l'impressionante differenza di temperatura e quando le dita fanno male per il freddo, immergerle nell'acqua raccolta nello strato profondo produce un momentaneo sollievo.

Trovare uno strato di acqua più calda sotto uno strato freddo è abbastanza inusuale: l'acqua calda è solitamente meno densa e quindi più leggera, e per questo ci si aspetta che galleggi sopra quella fredda; ma la densità dipende anche dal contenuto di sali disciolti ed è interessante notare come un'acqua con un alto valore di densità si possa ottenere per basse temperature o per un alto contenuto di sali. Le acque più calde del Kongsfjorden sono generalmente salate e, pertanto, più dense delle acque superficiali fredde ma relativamente dolci.

Nel Kongsfjorden l'acqua superficiale si origina localmente per l'immissione di acqua proveniente dalla fusione dei ghiacciai e, talvolta, da apporti fluviali. Diversamente, l'acqua sottostante deriva dall'esterno del fiordo ed è parte di un'importante corrente calda che entra in Artico lungo la costa occidentale delle Svalbard nota come West Spitsbergen Current. È la vena più settentrionale dell'acqua che è partita dal Golfo del Messico con il nome di Corrente del Golfo



CORTESIA DANIELE CECCATO

Una veduta di Ny-Ålesund, nelle Svalbard, che ospita 15 stazioni di ricerca internazionali, fra cui quella del Cnr, al centro della foto.

e dopo aver lambito le coste europee, finisce il suo viaggio entrando in Artico scorrendo ad Ovest delle Svalbard, proprio davanti al Kongsfjorden. Una chiara evidenza dell'effetto di questa corrente lungo la costa orientale dell'Oceano Atlantico è che i porti situati fino a 70°N, come Tromsø, sono liberi da ghiacci tutto l'anno e possono essere raggiunti anche da navi non adatte alla navigazione in acque polari.

Le popolazioni che abitavano l'Artico fin dai tempi più remoti pensavano che il ghiaccio marino si muovesse a piccola scala, nell'ordine di alcuni chilometri. Solamente dopo il viaggio di Nansen in Artico alla fine del XIX secolo, gli scienziati finalmente compresero che il ghiaccio marino si sposta anche a grande scala, soprattutto a causa dell'azione del vento. Fridtjof Nansen fu un esploratore e scienziato norvegese sostenitore dell'ipotesi del Transpolar Drift proposta dal meteorologo Henrik Mohn. Questa teoria sosteneva che i ghiacci andassero alla deriva per grandi distanze e che si potesse raggiungere il Polo Nord seguendone il percorso. Nansen ordinò la costruzione del Fram, una barca con lo scafo in

grado di resistere alla pressione dei ghiacci. Imbarcate provviste sufficienti per avere un'autonomia di lungo periodo, cercò di raggiungere il Polo Nord lasciandosi trasportare dal Transpolar Drift. Partito da Oslo si diresse verso le coste della Siberia e si fece intrappolare dai ghiacci andando alla deriva. Dopo due anni il Fram rientrò in Atlantico vicino alle isole Svalbard. Non aveva raggiunto il Polo Nord, ma aveva dimostrato l'esistenza del Transpolar Drift, una corrente che si muove dalle coste della Siberia, attraversa il Bacino Artico ed esce nel Nord Atlantico al largo della costa della Groenlandia attraverso lo Stretto di Fram (vedi figura 1). Circa il 90% del ghiaccio esportato dall'Artico attraversa questo stretto spinto dalla East Greenland Current. Questa scorre sul lato occidentale dello stretto e spinge le migliaia di iceberg che si trovano normalmente al largo della Groenlandia orientale fino alla corrente del Labrador diretta verso Sud, lungo le coste canadesi. Ogni anno molti di questi iceberg riescono a raggiungere l'area a Sud dei Banchi di Terranova e incrociano le rotte di navigazione tra Europa ed America. Tutti ricordano

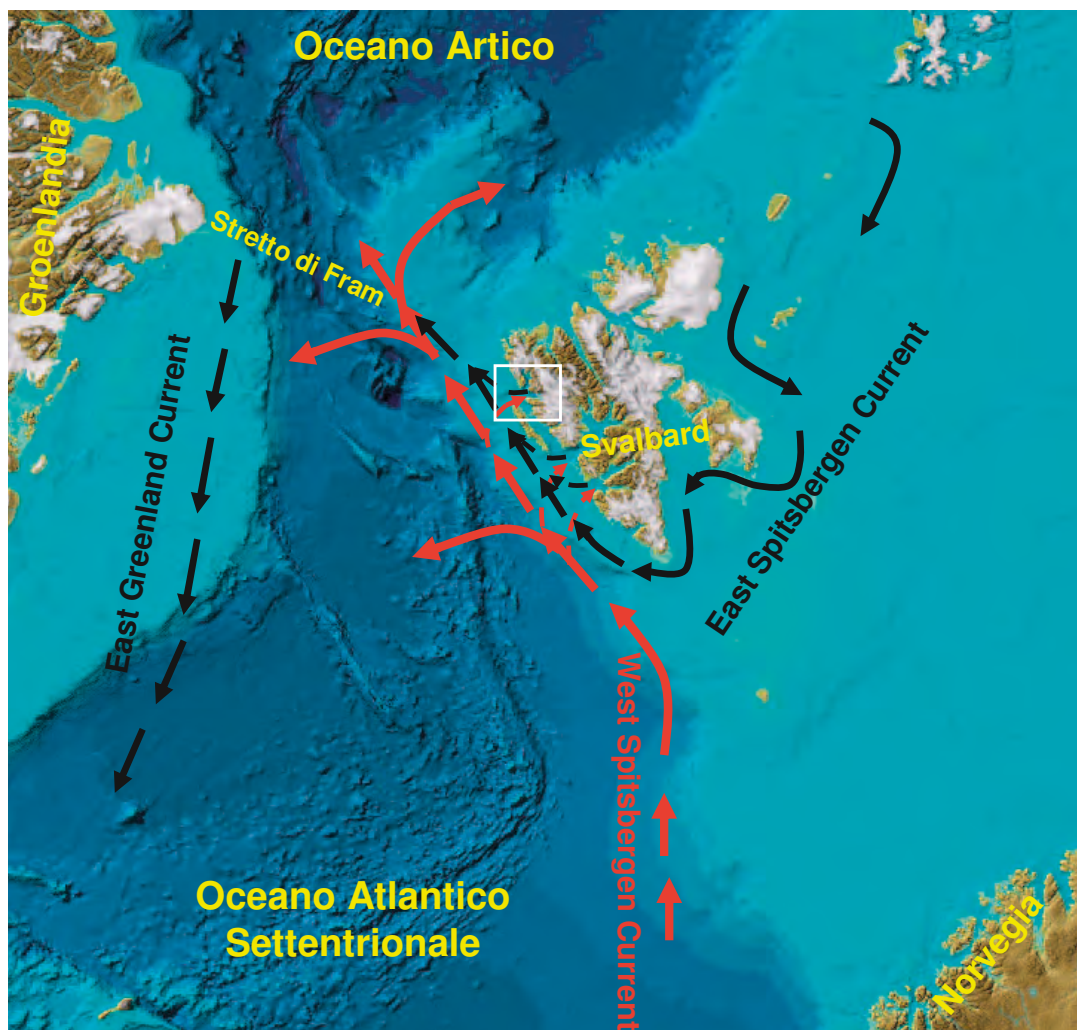


Figura 1. La circolazione superficiale nello stretto di Fram.

l'affondamento del Titanic, a seguito della collisione con un gigantesco iceberg, avvenuta a  $41^{\circ}\text{N}$  -  $49^{\circ}\text{W}$ , circa la stessa latitudine del Portogallo, dove la presenza di iceberg è impensabile.

Lungo la parte orientale dello stretto scorre la West Spitsbergen Current che, al contatto con la East Greenland Current, forma un sistema frontale, generando vortici locali e intrusioni temporanee di vene d'acqua calda fino alle coste della Groenlandia. Studi recenti hanno mostrato che queste intrusioni calde possono causare importanti fratturazioni dei ghiacciai che si protendono in mare, favorendo la formazione di grandi iceberg. La parte più orientale della West Spitsbergen Current scorre lungo le coste occidentali delle Svalbard e interagisce con la piattaforma continentale scambiando acqua con i fiordi che si trovano lungo la costa, come avviene nel Kongsfjorden.

Un ulteriore fenomeno influenza l'interazione tra i fiordi occidentali delle Svalbard e le correnti costiere:

la East Spitsbergen Current, una vena di acqua fredda superficiale, proveniente dal mare di Barents e diretta in Atlantico, che scorre lungo le coste orientali delle Svalbard. Talvolta, dopo aver doppiato la punta meridionale delle isole, si inserisce tra la parte più superficiale della West Spitsbergen Current e la costa, favorendo l'aumento della copertura di ghiaccio nei fiordi occidentali. Al contrario, quando domina la West Spitsbergen Current, la copertura di ghiaccio è minore o a volte completamente assente.

Il Kongsfjorden è un'area particolarmente indicata per lo studio degli scambi tra le masse d'acqua costiere e i fiordi. Data la profondità della soglia del fiordo, a circa 280 metri di profondità, l'acqua proveniente dall'oceano può intrudersi dentro il fiordo fino a lambire la parte frontale dei ghiacciai.

L'interfaccia tra il mare e i ghiacciai è una parte poco conosciuta del sistema artico, sebbene possa fornire un'interessante occasione per studiare *in situ* i

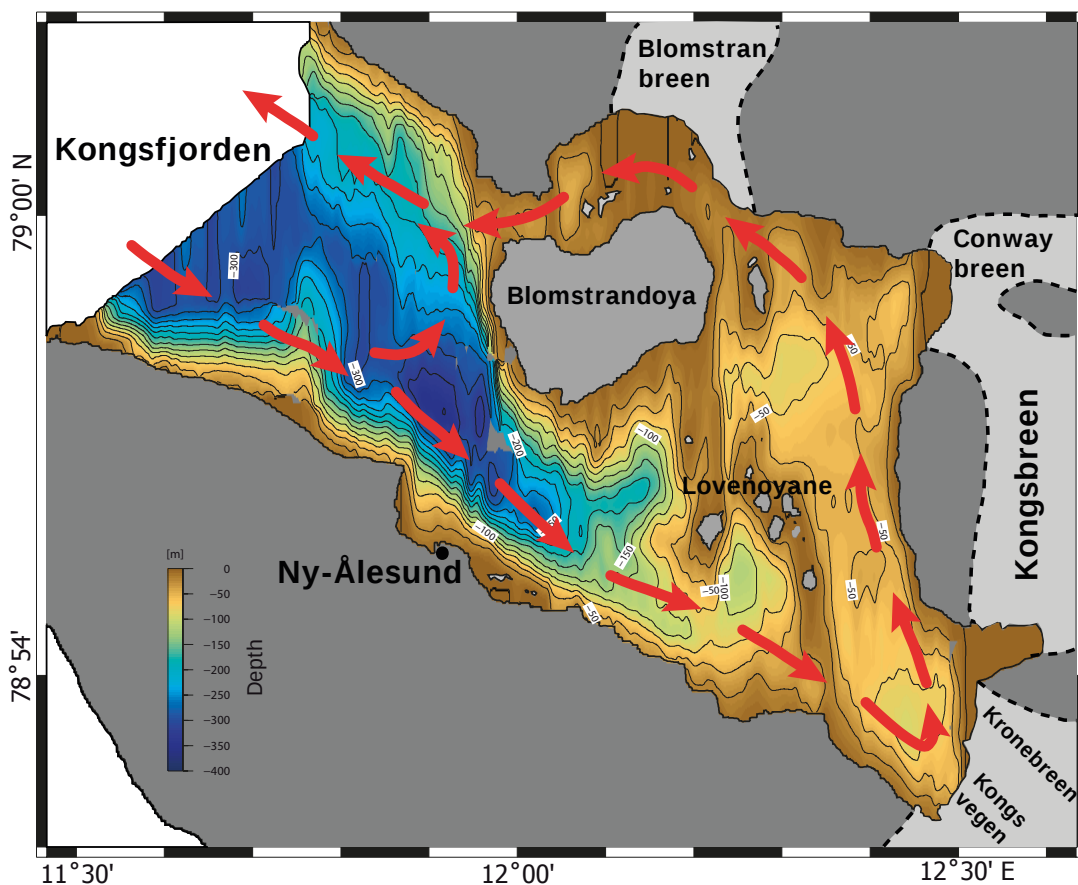


Figura 2. Andamento della circolazione subsuperficiale e batimetria di dettaglio nel Kongsfjorden.

processi di rimescolamento e raffreddamento dell'acqua marina. Effettuare misure nelle zone prossime al ghiacciaio è molto difficile perché le navi oceanografiche non possono avvicinarsi a causa dei bassi fondali e delle ridotte capacità di manovra.

L'Istituto di Scienze Marine (Cnr-Ismar), utilizzando un'imbarcazione di circa 6 metri, ha effettuato ripetute campagne di misure idrologiche tramite una sonda multiparametrica CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*). La barca impiegata ha l'aspetto di un normale gommone, ma è realizzata in plastica rigida e spinta da un potente motore. Così è stato possibile navigare in mezzo ai ghiacci alla deriva nel fiordo resistendo agli urti con piccoli iceberg. Quando i ghiacci diventano troppo grandi vengono spostati manualmente per evitare pericoli. A volte, per il vento freddo, la superficie del mare si copre di un sottile e uniforme strato congelato che circonda velocemente l'imbarcazione. Per evitare di restare intrappolati è indispensabile procedere rapidamente. Allora sfruttando il peso dello scafo e il potente motore si naviga sopra la sottile lastra in formazione per cercare di spezzarla. In queste occasioni, gli spruzzi di schiuma,

che di solito si vedono a prua delle barche, sono sostituiti da lastre di ghiaccio frantumate che scivolano lateralmente producendo un suono inimitabile. La poppa della barca disegna una strada di acqua libera in mezzo al mare ghiacciato che sarà la via di ritorno preferenziale verso il mare libero, quando il campionamento nella parte interna del fiordo sarà terminato.

La sonda CTD registra le caratteristiche chimico-fisiche della colonna d'acqua, acquisite lungo una griglia regolare di stazioni di misura. I sensori sono in grado di misurare differenze di temperatura dell'ordine del millesimo di grado e permettono di ricostruire la distribuzione spaziale delle masse d'acqua e i processi all'interfaccia tra mare e ghiaccio, usando un sistema ben più sofisticato del calore percepito dalle nostre mani. In maniera complementare, per osservazioni in continuo di lungo periodo, sono state approntate catene di strumenti ancorate al fondo che acquisiscono dati in automatico al fine di ottenere informazioni sulla variabilità temporale delle caratteristiche delle masse d'acqua nel fiordo e sulla scarpata continentale adiacente.

All'ingresso del fiordo è stata individuata una

vena d'acqua calda a 6°C di temperatura che raggiunge la zona di interfaccia con i ghiacciai, a circa 25 metri di profondità, e si raffredda fino a 3°C scorrendo lungo il loro fronte (vedi figura 2). La circolazione nel fiordo appare governata da un vortice antiorario che entra nel fiordo lungo il lato meridionale ed esce lungo quello settentrionale, oltrepassando le isole Blomstrandoya e Lovenoyane. La porzione dell'acqua di questo vortice – che riesce a passare la soglia di Lovenoyane ed entra nella parte più interna del Kongsfjorden – interagisce con le lingue più avanzate dei ghiacciai Kongsvegen e Kronebreen che formano un unico fronte glaciale, denominato Kongsbreen. Più a nord invece lambisce la parte terminale dei più modesti ghiacciai Conwaybreen e Blomstranbreen.

Per capire il meccanismo per cui il Kongsfjorden è un indicatore di clima globale è necessario comprendere ulteriori aspetti del clima e dell'oceanografia artica. L'intrusione di acqua relativamente calda nel fiordo è, come già visto, controllata dalla variabilità della West Spitzbergen Current che a sua volta è influenzata da fenomeni climatici a larga scala, quali la NAO (North Atlantic Oscillation) o il Transpolar Drift. Il flusso di acqua dolce in uscita dal fiordo va inoltre ad interagire con la West Spitzbergen Current diretta verso Nord, modificandone le proprietà termoline e quindi la sua capacità di influenzare i processi che hanno impatto sui cambiamenti globali del clima. Per questo motivo misurare la variabilità di questi processi, apparentemente di interesse locale, permette in realtà di ottenere indicazioni su processi a scala globale.

L'indice AO, o Arctic Oscillation, è un indice climatologico che fa riferimento ai campi di pressione atmosferica sopra l'Artico. Detto anche Northern Annular Mode, ha una fase positiva quando si osserva bassa pressione sul polo e alta pressione alle medie latitudini (45°N). Si ha una fase negativa se la situazione è opposta. Durante la fase positiva l'alta pressione atmosferica alle medie latitudini spinge le tempeste verso Nord portando tempo perturbato verso Scozia e Scandinavia e tempo secco sul Mediterraneo. Durante la fase negativa si assiste di regola a una situazione contraria con clima perturbato nel Mediterraneo.

La circolazione marina superficiale nell'Artico è guidata oltre che dal Transpolar Drift anche dal Beaufort Gyre, attivo nel mare di Beaufort a Nord dell'Alaska (vedi figura 3). I movimenti interannuali dello strato superficiale del mare Artico, specialmente quelli del Beaufort Gyre, sono coerenti con quelli dello strato atmosferico superficiale, che alterna regimi di circolazione ciclonici e anticiclonici. Ogni

regime dura da 4 a 8 anni, producendo periodicità di 8-16 anni. Il regime ciclonico (circolazione antioraria) è stato dominante dal 1989 al 1996, mentre dal 1997 il regime dominante è stato a prevalenza di circolazione anticiclonica (oraria).

Esiste poi un ciclo stagionale climatologico che prevede prevalente circolazione anticiclonica del ghiaccio e delle correnti in inverno e circolazione ciclonica in estate. Nel 2007 questa circolazione è drammaticamente cambiata; sia estate che inverno sono stati fortemente anticiclonici con una conseguente marcata riduzione della copertura di ghiaccio estiva. Nel 2008 è stata misurata una circolazione invernale anticiclonica e la circolazione estiva ha presentato un Beaufort Gyre anticiclonico molto pronunciato. Nel 2009 la circolazione si è invertita rispetto alla climatologia con una circolazione anticiclonica estiva e una ciclonica invernale. Le fluttuazioni delle condizioni oceanografiche hanno influenzato fortemente la copertura di ghiaccio, le correnti oceaniche, il contenuto di acqua dolce e i flussi di calore osservati. E soprattutto modulano l'intensità della East Greenland Current che porta il freddo nel Nord Atlantico influenzandone il regime climatico, controllano l'interazione con la West Spitzbergen Current e la relativa intrusione nei fiordi delle Svalbard.

I cambiamenti di intensità della circolazione polare inducono anche un diverso passaggio di acqua artica superficiale attraverso il passaggio poco profondo a Est delle Svalbard che a sua volta ha un effetto sull'intensità della fredda East Spitzbergen Current e sull'interazione di questa con la calda West Spitzbergen Current sul margine occidentale della piattaforma continentale delle Svalbard.

La variabilità dei regimi climatici induce moltissimi cambiamenti nell'ecosistema che vanno da cambi di piovosità, di copertura nevosa, di permafrost a cambiamenti nella presenza di pesci e del plancton. I sedimenti marini possono registrare gli effetti delle variazioni climatiche sotto forma di variazioni del tipo e abbondanza delle associazioni di microorganismi presenti, del contenuto e tipo di sostanza organica e di una serie di altri parametri specifici. Questi indicatori paleoambientali vengono analizzati su porzioni di sedimento (carote) prelevate dal fondo del mare. I siti di campionamento delle carote di sedimento devono essere accuratamente selezionati per individuare aree caratterizzate da una velocità di sedimentazione molto alta al fine di ottenere una risoluzione temporale compatibile con le variazioni climatiche che si vogliono investigare. Una decina di anni fa un gruppo di ricercatori italiani

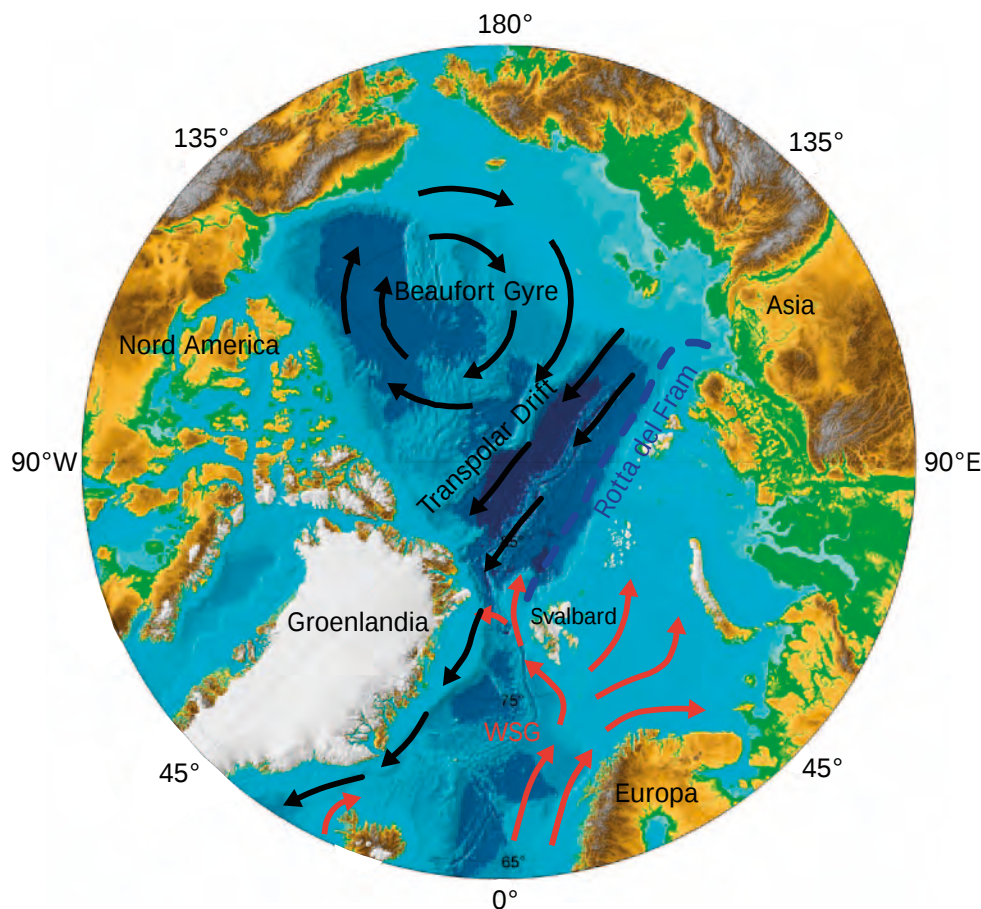


Figura 3. Circolazione marina superficiale nell'Oceano Artico.

ha dimostrato, utilizzando tecniche radiometriche, che la parte più interna del Kongsfjorden presenta le caratteristiche ideali, avendo misurato tassi di accumulo del sedimento fino a 15-20 cm in 3 mesi. Nel 2010 è iniziata l'esplorazione geofisica del fondale del Kongsfjorden con una copertura della parte più interna del fiordo, prossimale al fronte dei ghiacciai. Le indagini sismo-stratigrafiche hanno messo in luce le principali strutture sedimentarie del bacino, con l'individuazione delle zone di accumulo del sedimento recente. È emersa la complessità morfologica del fondale che risulta caratterizzato dalla sovrapposizione di successivi depositi di morene frontali, messe in posto durante il progressivo arretramento dei ghiacciai, che nella precedente fase glaciale (circa 18 mila anni fa) coprivano l'intera area del fiordo raggiungendo il ciglio della piattaforma continentale. Le carote di sedimento prelevate nell'estate del 2011, tramite carotiere a gravità, sono appena arrivate in Italia e sono pronte per essere studiate per fornire quelle informazioni tanto preziose che ci auguriamo esse contengano.

Stefano Aliani, Cnr-Ismar, La Spezia; Federico Giglio, Leonardo Langone, Stefano Miserocchi, Fabrizio Del Bianco, Cnr-Ismar, Bologna

#### Bibliografia

- Aliani, S. *et al.* 2004. Multidisciplinary investigations in the marine environment of the inner Kongsfjord, Svalbard islands (September 2000 and 2001), *Chemistry and Ecology*, 20, S19-S28.
- Delfanti R. *et al.* 2002. Oceanographic processes in the inner Kongsfjord (Svalbard): multidisciplinary results from 2000-2001 campaigns. *Proc. of 6th Ny Alesund International Seminar*. 181-184
- Hop, H. *et al.* 2002. The marine ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Research*, 21, 167-208.
- Proshutinsky, A., and M. Johnson. 2001. Two regimes of the Arctic's circulation from ocean models with ice and contaminants. *Marine Pollution Bulletin* 43, 61-70.
- Proshutinsky, A., *et al.* 2009. Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations. *Journal of Geophysical Research* doi:10.1029/2008JC005104.
- Svendsen, H. *et al.* 2002. The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fiord system in Svalbard. *Polar Research*, 21, 133-166.
- Tomczak, M. and J.S. Godfrey. 2003. *Regional Oceanography: an Introduction* 2<sup>nd</sup> edition.



# Il risveglio estivo del continente bianco

Gli organismi marini antartici si sono adattati a temperature bassissime e a una forte stagionalità delle risorse alimentari

STEFANO SCHIAPARELLI, MARCO TAVIANI

**G**EOGRAFICAMENTE REMOTISSIMO, caratterizzato da condizioni climatiche estreme con temperature sottozero e sigillato dalla pressoché impenetrabile barriera oceanografica rappresentata dalla Corrente Circumpolare Antartica (o Fronte Polare) verrebbe da pensare che le acque che bagnano il continente antartico siano quasi inospitali per la vita. Certo, questa percezione ha sulla terraferma una sua parziale conferma, visto che le forme di vita squisitamente terrestri non vi abbondano certamente. Quasi assenti le piante, con la rimarchevole eccezione di alcune erbe che crescono nella Penisola Antartica, la rada flora è costituita da alghe, funghi criptoendolitici e licheni. Rari gli animali, rappresentati solo da un ridotto numero di specie di minuscoli invertebrati super adattati appartenenti a protozoi, rotiferi, tardigradi, nematodi, acari e collemboli. Le poche acque libere ospitano batteri, alghe blue-azzurre, e piccoli crostacei. Le terribili condizioni climatiche che marciano l'Antartide attuale, del resto, sono tollerabili solo da queste lillipuziane meraviglie evolutive, talora capaci di produrre anticongelanti che ne garantiscano la sopravvivenza anche a meno trenta gradi. Ma allora pinguini, foche, stercorari? Sono tutti vertebrati marini, non terrestri, legati più o meno strettamente al mare per il proprio sostentamento. Per certi versi, anche dal punto di vista prettamente biologico, l'Antartide merita dunque il nome di deserto bianco.

E pensare che non è sempre stato così. L'Antartide, frammento del supercontinente australe noto come Gondwana ha cambiato di fatto varie volte la sua posizione geografica e ha subito nel contempo epocali cambiamenti climatici. Per esempio circa 5 milioni di anni fa, all'inizio dell'era Paleozoica, nel Cambriano, l'Antartide si trovava all'Equatore. Saltando direttamente alla fine del Paleozoico, nel Permiano, il suo clima era caldo umido e prosperavano foreste di *Glossopteris*, gimnosperme simili a felci. Nel Giurassico l'Antartide, che iniziava la sua separazione dagli altri blocchi di Gondwana, era pressappoco localizzato al polo sud, ma il suo clima era tale che si aggravano i dinosauri e il continente ospitava foreste di conifere e felci che perdurarono fino alla fine del Mesozoico. Solo con l'inizio dell'era Cenozoica cominciò il lento e inesorabile deterioramento climatico, che finì per sotterrare sotto una spessa coltre di ghiaccio un continente di quasi 11 milioni di chilometri quadrati, la cui superficie attuale libera da ghiaccio ammonta a un misero 1%. Fino al Miocene e forse anche all'inizio del Pliocene furono presenti le ultime foreste di *Nothofagus*,



GIORGIO OCCHERO

Uno skua (stercorario antartico) interagisce con un subacqueo (S. Schiaparelli) appena riemerso da un'immersione sotto il pack a Tethys Bay, presso la stazione di ricerca italiana di Mario Zucchelli. Uccelli curiosi, perennemente affamati, provano ad assaggiare qualunque cosa capitino loro a tiro, comprese le attrezzature subacquee.

il faggio australe ancora oggi comune in Sud America e Australasia. Ma ormai si affacciava il grande gelo in un continente ormai del tutto isolato dalle altre terre emerse. E il mare? Ancora nell'Eocene, una quarantina di milioni di anni fa, le acque costiere dell'Antartide erano temperate, come dimostrano i numerosi fossili che si rinvenivano prevalentemente nelle isole adiacenti alla Penisola Antartica. Mentre sul continente cominciava a estendersi la calotta glaciale, acque ancora temperate, ma progressivamente sempre più fredde e comparabili a quella dell'odierna Patagonia, caratterizzavano il mare periantartico già solcato da iceberg alla deriva per tutto il Miocene

e forse anche all'inizio del Pliocene, circa 4,5 milioni di anni or sono. Come documentato dai fossili rinvenuti nei pochi affioramenti, a disposizione dei paleontologi o contenuti nelle carote ottenute da progetti internazionali quali Cape Roberts e Andriill, la fauna e la flora del continente si trasformarono profondamente assumendo la fisionomia descritta sopra. Il mare, fortemente condizionato dal Fronte Polare, che come una fascia lo separa dagli altri oceani, cambia anch'esso. Isolato e con temperature oscillanti fra 0 e meno 1,8 gradi, verrebbe da immaginare che le acque marine antartiche siano una specie di deserto anch'esse.



STEFANO SCHIAPARELLI © PNRA

Un ice-fish (*Chionodraco hamatus*) nella classica posizione di difesa, con il corpo arricciato a ferro di cavallo e la bocca spalancata. Da questa prospettiva è possibile notare il colore latteo dell'interno della bocca e, soprattutto, delle branchie dovuto alla mancanza dell'emoglobina nel sangue.

Tuttavia, basta immergersi in acque costiere o utilizzare un ROV (*Remotely Operated Vehicle*) per scoprire una diversità incredibile di forme di vita marine con specie che appartengono a quasi la metà dei Phyla viventi. Gli organismi marini antartici rappresentano il risultato evolutivo di milioni di anni di adattamento a temperature bassissime e a una incredibile stagionalità nell'apporto di cibo, limitato a una breve finestra temporale durante l'estate antartica, caratterizzata da una elevatissima produzione primaria.

Molti degli organismi marini antartici si sono dotati di glicoproteine antigelo per evitare la formazione di cristalli di ghiaccio nei propri tessuti mentre altri, quali i famosi pesci-ghiaccio o *ice-fishes* (appartenenti ai nototenioidi), hanno addirittura ottimizzato

la fisiologia dell'apparato circolatorio perdendo, nel corso della loro evoluzione, la possibilità di produrre emoglobina: il loro sangue è infatti privo di globuli rossi e risulta di un colore bianco latte. Grazie a questa soluzione, per i pesci-ghiaccio, vi è un considerevole risparmio energetico, dato dal fatto che il sangue pompato è molto meno denso in seguito all'assenza di globuli rossi. Tutto questo non comporta però alcun problema fisiologico ai pesci-ghiaccio, dato che l'apporto di ossigeno ai tessuti è comunque garantito dalla quantità di ossigeno trasportato dal sangue in semplice soluzione e anche dal fatto che è per loro possibile assorbirlo anche direttamente dalla pelle stessa.

L'estrema stagionalità che caratterizza l'ambiente marino in Antartide può essere riassunta dalle dina-



ANTARTICA UK

Una oloturia abissale della specie *Protelpidia murrayi*. In inglese il nome comune di questo organismo è «sea pig».

miche stagionali della colonna d'acqua. Questa infatti, nell'arco dell'anno, varia considerevolmente, passando da una limpidezza assoluta, dovuta alla pressoché totale assenza di organismi durante l'inverno australe, quando il mare è ricoperto dal pack, a una fortissima torbidità, per la durata di alcune settimane, durante l'estate australe, quando si ha, invece, uno sviluppo stupefacente di organismi planctonici. Il passaggio da una situazione all'altra è dovuto alle dinamiche stagionali del pack che si forma ogni anno durante l'autunno e si inspessisce progressivamente durante l'inverno australe fino a raggiungere anche uno spessore di 2-3 metri. Durante l'estate australe il pack, a causa del riscaldamento della temperatura dell'aria, inizia a fondere fino a quando si frammenta in grossi lastroni ed è trasportato al largo dai venti. Se osservato dal di fuori, il pack appare come una superficie piatta, spazzata dai venti antartici, ma se osservato da sotto, in immersione, rivela la presenza di molteplici cavità e strutture colonnari simili a stalattiti, formate dall'unione di grossi cristalli piatti di ghiaccio (*platelet ice*). Grazie all'elevata tridimen-

sionalità della pagina inferiore del pack molte specie di organismi, dalle diatomee ai pesci, nonché uova e stadi larvali di varie specie vi trovano rifugio. Non appena il pack inizia a fondersi e frammentarsi è proprio la comunità di microrganismi che vive in questi anfratti a innescare lo sviluppo delle altre centinaia di altre forme viventi presenti nella colonna d'acqua, che daranno poi luogo al vero e proprio *bloom* fitoplanctonico dell'estate australe. Durante questa fase, la limpidezza invernale della colonna d'acqua rimane quindi solo un vago ricordo e la presenza di miliardi di organismi planctonici rende l'acqua simile a un brodo, di un bel verde intenso.

L'enorme biomassa degli organismi del plancton rappresenta, durante l'estate australe, una fonte incredibile di cibo per le comunità bentoniche di organismi sospensivori. Questi, fortemente legati alla produzione primaria della colonna d'acqua da un processo noto come *bentho-pelagic coupling*, ne sfruttano le risorse accrescendo la propria biomassa e formando comunità ricchissime in specie e altamente strutturate. Anche gli organismi deposivori,

cioè quelli che utilizzano come alimento la sostanza organica che si accumula sul fondo, sono ben rappresentati in Antartide. Qui infatti, grazie alle basse temperature, i processi degradativi della sostanza organica sono estremamente rallentati e consentono l'accumulo sul fondo marino anche di notevoli quantità di cibo che rimane di buona qualità per parecchi mesi. Grazie a questi accumuli, definiti in termini tecnici *food banks*, depositori e detritivori di svariate specie possono disporre di cibo anche ben dopo il *bloom* fitoplanctonico estivo.

Dato che i processi produttivi maggiori si hanno in corrispondenza del fronte del pack (il suo limite esterno, verso il mare aperto), l'accumulo sul fondo marino delle spoglie degli organismi responsabili del bloom, che possono facilmente fossilizzarsi nei sedimenti, rappresenta un segnale importante per i paleontologi e climatologi. Il rinvenimento di questi organismi nelle carote di sedimenti marini, infatti, indica la presenza di acque libere, prive di ghiaccio marino, e permette quindi di comprendere quale sia stata la reale estensione e la dinamica del ghiaccio marino nel passato.

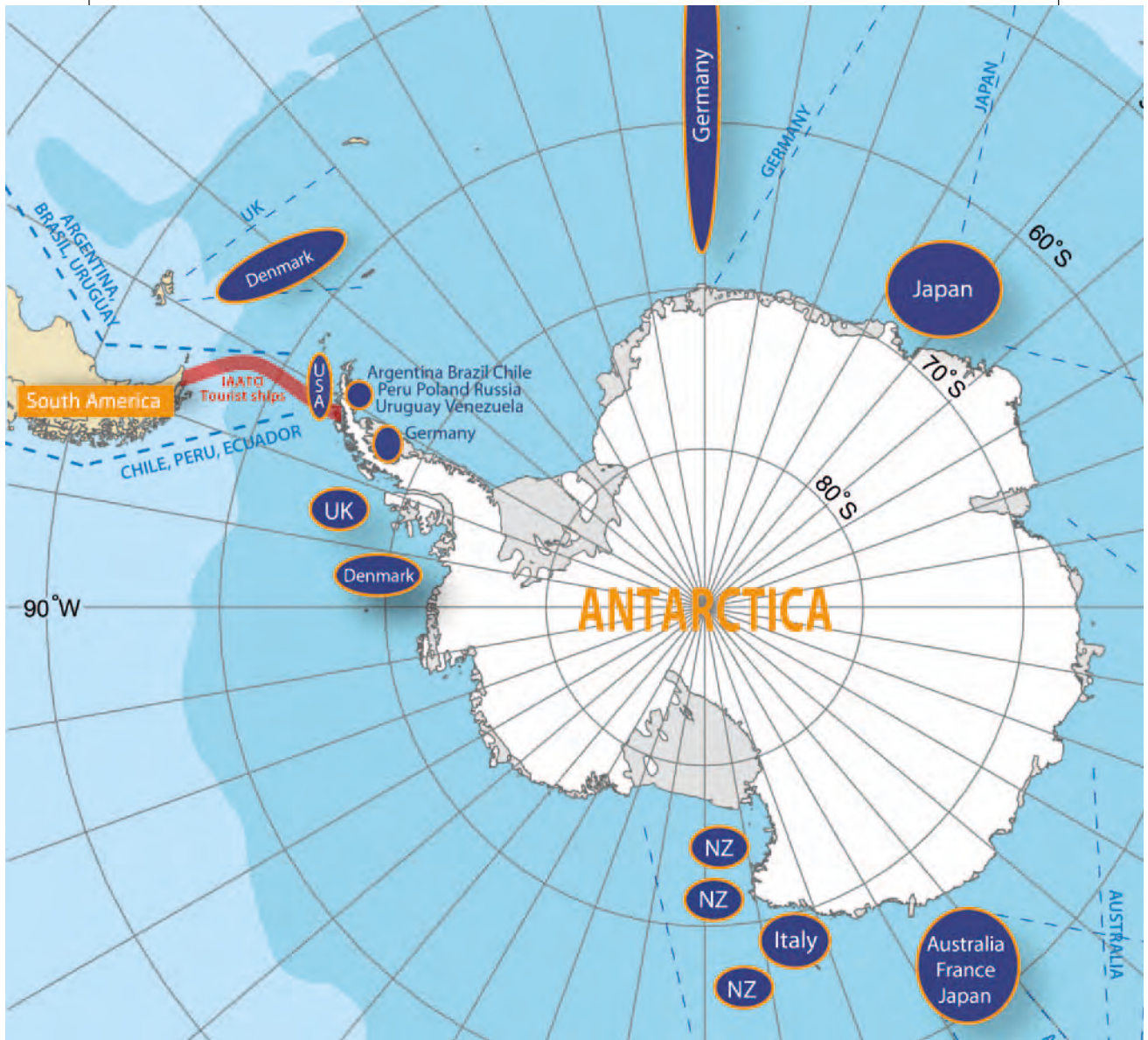
Il fitoplancton rappresenta ovviamente anche il cibo principale delle reti trofiche della colonna d'acqua che comprendono, tra le moltissime specie ecologicamente importanti, anche gli organismi più abbondanti nell'ambiente marino antartico: il krill e i copepodi calanoidi. Il krill forma aggregati enormi che possono misurare anche di più di un chilometro in lunghezza. Dopo vari stadi larvali, il krill antartico, rappresentato soprattutto dalla specie *Euphausia superba*, raggiunge una dimensione adulta di circa 5 cm. Tenendo conto del peso di ogni individuo e del numero di individui di krill presenti mediamente in acque antartiche, è possibile stimare come in Antartide, ogni anno, vengano prodotti dai 350 a 540 milioni di tonnellate di biomassa di krill. Tale abbondanza di cibo rappresenta il motivo per cui, nonostante le condizioni climatiche estremamente sfavorevoli, molte specie di vertebrati quali pinguini, foche e balene vivano permanentemente, o migrino annualmente, nelle fredde acque antartiche.

La fauna bentonica antartica odierna non ha eguali al mondo, non solo per gli adattamenti fisiologici unici di alcune specie o gruppi, ma anche per quanto riguarda l'organizzazione e la struttura delle comunità marine. Il progressivo raffreddamento dell'acqua negli ultimi 60 milioni di anni, che ha comportato un passaggio da una situazione iniziale con temperature intorno ai 12°C a quella attuale con temperature intorno ai -1,8°C, ha determinato l'estinzione di molti gruppi animali, in *primis* granchi, aragoste, squali e

razze. Altri gruppi quali i picnogonidi (ragni marini), gli anfipodi e gli isopodi sono invece ora ben rappresentati e, in molti casi, sono andati incontro a spettacolari radiazioni adattative, occupando le nicchie ecologiche risultate vacanti in seguito all'estinzione della fauna iniziale.

Nel complesso le comunità antartiche sono caratterizzate dall'assenza di predatori durofagi, cioè in grado di predare, utilizzando denti o chele, specie bentoniche dotate di protezioni quali carapaci o conchiglie. Data la mancanza di predatori, la maggior parte delle conchiglie dei molluschi antartici risulta sottilissima, con poco carbonato di calcio, nonché priva delle robuste ornamentazioni, quali spine o carene, che invece caratterizzano specie appartenenti alle stesse famiglie che vivono in ambienti tropicali. In ambito marino, comunità con questo tipo di organizzazione sono note solo per il Paleozoico, prima della cosiddetta rivoluzione del Mesozoico, durante la quale è avvenuta una sorta di *escalation* in cui i predatori sono diventati sempre più efficaci nello sfruttare le prede, ad esempio sviluppando robusti denti in grado di frantumare una conchiglia mentre, dall'altro lato, le prede si sono sempre più specializzate nel resistere alla predazione dotandosi di robuste e pesanti conchiglie ricoperte di spine, o producendo veleni o altre sostanze da utilizzare come deterrente per evitare la predazione. Osservare le comunità marine bentoniche in Antartide è quindi quasi come fare un tuffo nel passato, in una fase della storia del nostro pianeta in cui i predatori marini più temibili non erano gli squali o grossi granchi, ma policheti e stelle marine.

Nel complesso, l'Oceano Meridionale, che circonda il continente antartico, annovera circa 8.100 specie di organismi marini. Di queste, poco meno della metà è stato riportato, descritto o studiato solamente negli ultimi dieci anni, grazie al susseguirsi di molteplici progetti internazionali durante i quali sono state effettuate ricerche congiunte. Molte di queste spedizioni sono state coordinate dal Census of Antarctic Marine Life, il più grande progetto internazionale dedicato alla biodiversità antartica mai realizzato finora. Questo progetto, di durata quinquennale (2005-2010), ha consentito la collaborazione di circa 300 ricercatori provenienti da 30 paesi diversi, che hanno potuto scambiare campioni provenienti da diverse aree antartiche e partecipare a spedizioni anche di paesi diversi dal proprio. Il momento in cui si è avuto il numero complessivo massimo di organizzazioni coinvolte è stato il 2007-2008, in coincidenza con l'Anno Internazionale Polare (IPY), periodo durante il quale 18 navi oceano-

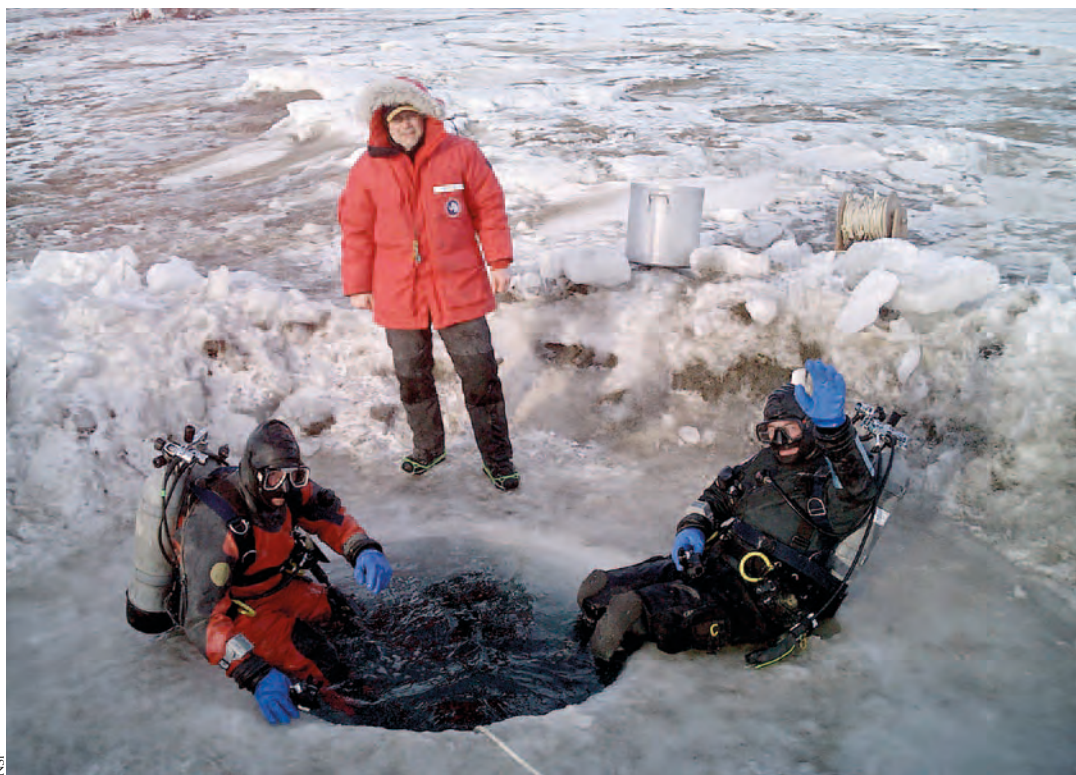


Mapa delle missioni internazionali dedicate alla biodiversità antartica, durante l'Anno Internazionale Polare.

grafiche, quasi in simultanea, hanno solcato i mari antartici prelevando campioni di plancton, benthos ed esplorando aree mai investigate prima dal punto di vista biologico. Il censimento del CAML, appena concluso, ha prodotto e continuerà a produrre una quantità enorme di dati che richiederà anni prima di essere completamente processata.

Uno dei motivi che ha richiesto l'utilizzo di un così elevato numero di navi e ricercatori impiegati sul campo è stato quello di voler stabilire, per la prima volta, un tempo zero globale delle conoscenze relative alla biodiversità antartica, in maniera tale da poter confrontare, in un prossimo futuro, le eventuali nuove situazioni che si verranno presumibilmente a

creare in concomitanza di un possibile riscaldamento globale con la situazione registrata nel 2007-2008. Questo obiettivo è stato il motore che ha mosso per cinque anni il CAML e rappresenta l'eredità che questo progetto ha lasciato alle generazioni future. I dati acquisiti, che appaiono come puntini su di una mappa, indicano infatti la presenza di una specie in un dato momento in un dato luogo e permetteranno di valutare, nel tempo, ogni possibile variazione nella distribuzione della stessa nel momento in cui nuovi campionamenti verranno effettuati nelle stesse aree. Alla fine del CAML, nel 2010, il numero dei record distribuzionali disponibili aveva già superato quota 1.000.000 e tale numero è tuttora in costante,



Due subacquei americani del Wadsworth Center di New York pronti ad immergersi.

progressivo aumento, man mano che nuovi dati vengono elaborati dai singoli progetti di ricerca e resi disponibili a tutta la comunità scientifica dopo tutte le verifiche necessarie.

Tutto questo lavoro non risiede in computer inaccessibili di singoli istituti di ricerca, ma è fruibile da chiunque attraverso lo SCAR-MarBIN (Scientific Committee for Antarctic Research-Marine Biodiversity Network), progetto che si è svolto in parallelo al CAML, e che ha lo scopo di allestire un unico portale di riferimento per la biodiversità antartica in cui far confluire tutti i dati e le risorse disponibili al momento. In questo sito è possibile visualizzare mappe di distribuzione, vedere foto di organismi antartici, scorrere check-list di specie e controllare la nomenclatura aggiornata relativa alle specie che vivono nell'Oceano Meridionale.

Il CAML non ha solo consentito di censire una quantità enorme di organismi, ma ha anche fornito i fondi necessari alla caratterizzazione genetica degli stessi. Grazie allo studio del Dna, infatti, molti dei paradigmi relativi all'ecologia delle specie antartiche sono caduti. L'apparente bassa diversità nel numero di specie di alcuni gruppi è risultata essere invece un dato non corretto. In moltissimi gruppi di invertebrati antartici, infatti, è stata osservata una elevatissima diversità criptica. Questo significa che

anche se due individui di un'unica specie, raccolti in aree diverse dell'Antartide, sembrano essere assolutamente identici dal punto di vista morfologico, non è detto che lo siano anche dal punto di vista genetico e possono, grazie allo studio del Dna, essere distinti addirittura come due specie diverse. Il caso più eclatante è quello del nudibranco *Doris kerguelensis*, uno dei più comuni in Antartide. Da una singola specie riconoscibile a livello morfologico sono state distinte, anche se non formalmente descritte, ben 29 diverse specie perfettamente caratterizzabili a livello molecolare. La spiegazione di questa elevata diversità criptica sta nelle glaciazioni: a ogni ciclo glaciale, quando la calotta polare antartica si estende fino al margine della piattaforma continentale, gli habitat disponibili si riducono e si frammentano, determinando l'isolamento di molte specie, che possono sopravvivere in rifugi non toccati dal ghiaccio o migrare più in profondità ma non riescono più a interagire con quelle presenti in altri rifugi. Queste dinamiche di speciazione erano già state descritte anni fa e note sotto la definizione di *biodiversity pump* antartica, nel senso che a ogni ciclo glaciale viene tendenzialmente aumentata la diversità genetica delle specie che riescono a sopravvivere. Quello che ha sorpreso tutti, tuttavia, è stato il numero di specie criptiche osservate man mano



La stazione antartica italiana Mario Zucchelli nella Baia di Terra Nova.

che nuovi gruppi sono stati analizzati da un punto di vista molecolare, numero ben superiore a quello che ci si sarebbe potuto aspettare.

Uno degli altri paradigmi che sono stati modificati dal CAML è quello relativo all'isolamento del continente antartico all'interno della barriera biogeografica determinata dalla Corrente Circumpolare Antartica. Sempre grazie all'utilizzo di tecniche molecolari, è stato possibile ricostruire quelle che sono state le direzioni di dispersione di varie specie a partire dall'Antartide verso i bacini profondi limitrofi e viceversa. È ora sempre più chiaro come la circolazione termoalina, di cui l'Antartide rappresenta il motore freddo, non abbia solo una importanza enorme per il clima mondiale, ma abbia anche una considerevole rilevanza in ambito biologico avendo consentito, durante le ere glaciali, la dispersione di specie marine antartiche al di fuori dell'Oceano Meridionale e l'immigrazione in Antartide di specie profonde dai bacini circostanti nei periodi più caldi. Queste autostrade profonde, definite *thermohaline expressway*, sono state solo da poco tempo pienamente riconosciute e hanno, di fatto, molto ridimensionato il ruolo di barriera biogeografica esercitato dalla Corrente Circumpolare Antartica, che ha sì questo ruolo, ma solo per le specie legate, da adulti o nelle fasi larvali, agli strati più superficiali della colonna d'acqua.

Ora che la tecnologia informatica e la genetica hanno messo nelle mani dei ricercatori tutti i mezzi possibili di indagine, vi sono tantissime cose da verificare, studiare e comprendere. Il futuro prossimo sarà sicuramente un'epoca elettrizzante per i ricercatori che si occupano di biodiversità antartica.

Stefano Schiaparelli, Università di Genova, Marco Taviani, Ismar-Cnr, Bologna

#### Bibliografia

- Clarke A., Johnston N.M. (2003) Antarctic marine benthic diversity. *Oceanography and Marine Biology Annual Review*, 41: 47-114.
- De Broyer C., Danis B. with 64 SCAR-MarBIN Taxonomic Editors (2011) How many species in the Southern Ocean? Towards a dynamic inventory of the Antarctic marine species. *Deep-Sea Research II*, 58: 5-17.
- Schiaparelli S., Hopcroft R.R. (2011) The Census of Antarctic Marine Life: diversity and change in Southern Ocean Ecosystems. *Deep-Sea Research II*, 58: 1-4.
- Strugnell J.M. et al. (2008) The thermohaline expressway: the Southern Ocean as a centre of origin for deep-sea octopuses. *Cladistics*, 24: 1-8.
- Wilson N.G., Scrödl M., Halanych K.M. (2009) Ocean barriers and glaciation: evidence for explosive radiation of mitochondrial lineages in the Antarctic sea slug *Doris kerguelensis* (Mollusca, Nudibranchia). *Molecular Ecology*, 18: 965-984.



## L'Antartide rivela il passato del clima

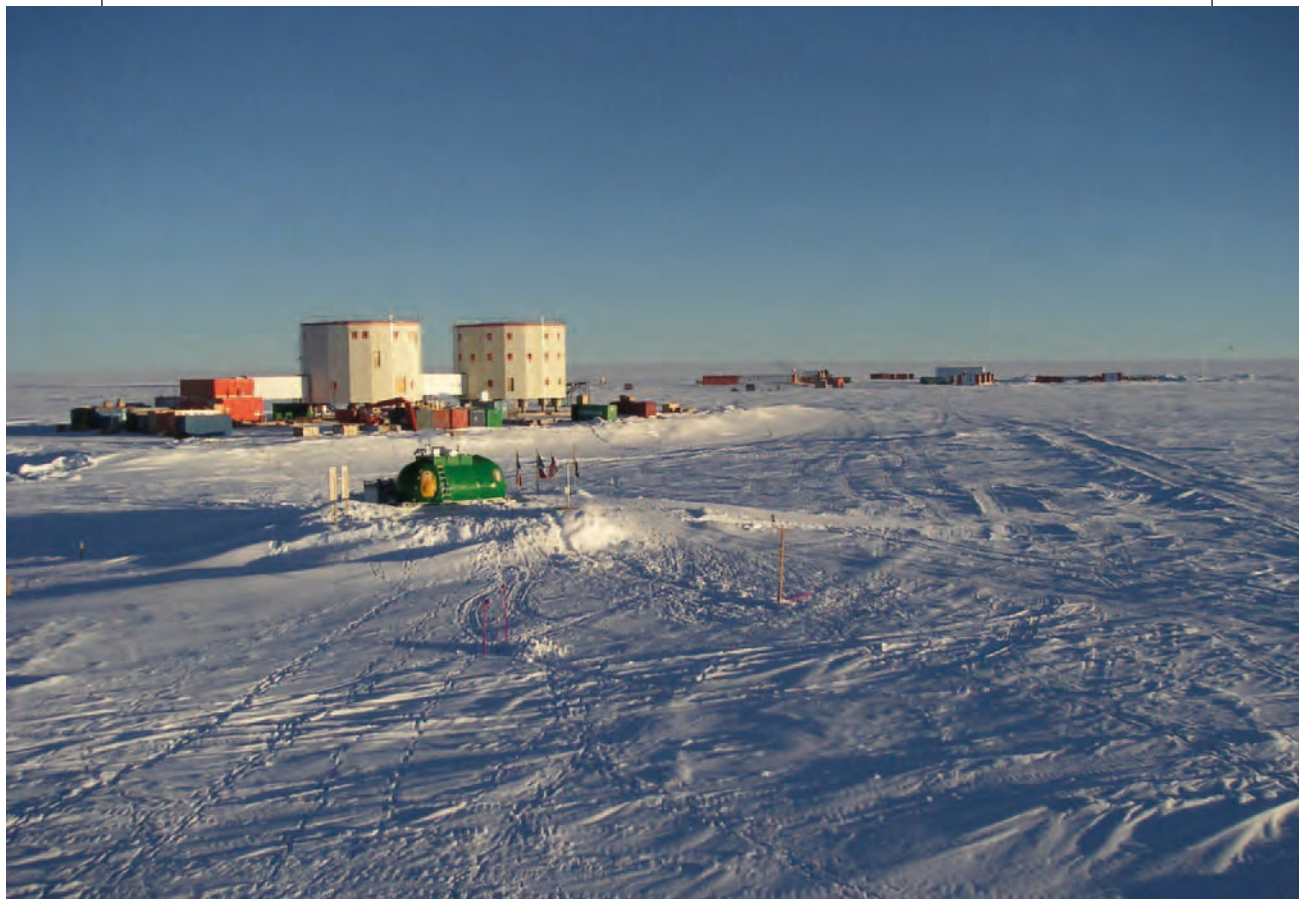
Un gruppo internazionale di ricercatori studia le carote di ghiaccio per ricostruire gli eventi climatici del pianeta

VALTER MAGGI

**D**OPO OLTRE 40 ORE di volo di linea, partendo dall'Italia fino a Christchurch in Nuova Zelanda; dopo 9 ore di volo con un Hercules C130, aereo cargo militare, che attraversa il Pacifico Meridionale e l'Oceano Antartico, e porta a una pista su ghiaccio marino con uno spessore di meno di 2 metri. Dopo altre 5 ore di un aereo bimotore, un De Havilland Twin Otter, che trasporta sia persone che materiali (specialmente materiali), si arriva in un posto chiamato «Dome C», in mezzo a un continente completamente coperto di ghiaccio e talmente remoto che non ha neppure un nome. Infatti, Dome C è un toponimo antartico assegnato dopo l'Anno Geofisico Internazionale del 1957-58, quando, per necessità geografiche, le culminazioni della calotta polare antartica, chiamati *duomi*, vennero classificate usando le prime lettere dell'alfabeto e quindi Dome A, Dome B, Dome C, fino a Dome F. In effetti il Twin Otter atterra su una immensa distesa innevata che, a Dome C, ha uno spessore di circa 3.300 m di ghiaccio. È qui che il Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (Pnra) con l'Istituto Polare Francese (Ipev) hanno costruito la Stazione Concordia, una base permanente Italo-Francese che permette attività scientifica per tutto l'anno, anche durante il freddissimo inverno antartico, con temperature che possono scendere sotto i  $-70^{\circ}\text{C}$ . Ed è qui che il Consorzio Epica, dal 1997 al 2004, ha effettuato una perforazione nella calotta polare che ha riportato in superficie ghiaccio di oltre 800.000 anni.

Infatti l'Antartide presenta delle caratteristiche uniche per gli studi sui cambiamenti climatici. La sua posizione polare, circondata dall'Oceano Antartico ha trasformato nel tempo il Sesto Continente in un enorme frigorifero (vedere l'articolo sull'oceanografia bipolare in questo numero), che ha portato alla formazione delle grandi calotte polari (Orientale e Occidentale) che hanno coperto per intero il continente con spessori di ghiaccio fino a 4.500 metri, diventando il principale archivio della storia dell'atmosfera del nostro pianeta. Precipitazioni nevose, che si sono susseguite per centinaia di migliaia di anni, sono state accumulate e conservate in queste calotte. La trasformazione in ghiaccio ha permesso di conservare sostanze liquide, solide e gassose, permettendo quindi di ricostruire l'evoluzione dell'atmosfera del passato.

Il continente antartico ha un'estensione di circa 14 milioni  $\text{km}^2$ , quasi una volta e mezza l'Europa. In Antartide sono stoccati oltre 30 milioni di  $\text{km}^3$  di ghiaccio, che rappresentano il 91,5 % di tutto il ghiaccio continentale, e oltre il 62% dell'acqua dolce, del nostro pianeta. La



UNSW

Il laboratorio di ricerca a Dome C, in Antartide.

Groenlandia, nell’Emisfero Nord, presenta anch’essa una calotta polare, ma rappresenta solamente il 7,9% del ghiaccio di ghiacciaio con i suoi 2,7 milioni di km<sup>3</sup>, e meno del 6% dell’acqua dolce planetaria. È quindi evidente che il restante 0,6% in volume di ghiaccio è rappresentato da tutti i restanti ghiacciai del pianeta, sparsi sul resto dei continenti. Se tutto il ghiaccio dell’Antartide dovesse fondere, l’aumento medio del livello dei mari sarebbe di oltre 65 m, con la sommersione di buona parte delle zone costiere, la scomparsa di intere aree come la Florida o di interi arcipelaghi come quelli della Polinesia. Anche l’Italia avrebbe dei problemi, con la sommersione delle coste e di buona parte della Pianura Padana, con la formazione di una spiaggia adriatica non lontano da Pavia.

Nei ghiacciai polari il movimento del ghiaccio è molto lento, con velocità nelle parti centrali di qualche cm all’anno, che però, per quanto piccola, porta con il tempo a deformare la successione verticale continua delle nevicate. Sui duomi topografici (tipo Dome C) il disturbo è decisamente minore, o assente, e presentano movimenti laterali quasi nulli. Questo permette di mantenere la sequenza di nevicate e degli

strati di ghiaccio in modo continuo e praticamente indisturbato. Per questo motivo le principali perforazioni in ghiaccio sono state, e vengono tuttora effettuate, in queste aree così remote del continente antartico. La trasformazione della neve in ghiaccio e la sua conservazione è legata a due fondamentali parametri: la temperatura media annua del sito e il suo accumulo medio annuo di neve. Più la temperatura è bassa più lenti sono i processi di trasformazione e quindi il tempo necessario per passare da neve a ghiaccio. L’accumulo medio annuo controlla invece lo spessore del singolo strato annuale e il carico litostatico (ovvero il peso), che gli strati sottostanti subiscono dalle successive nevicate. Per un confronto tra siti diversi, vista la grande differenza nelle densità delle singole nevicate, si utilizza calcolare l’accumulo medio annuo in acqua equivalente, cioè considerando lo strato di neve annuale come acqua fusa. Tutto questo spiega perché si realizzano perforazioni a scopo paleoclimatico in aree così remote come l’Antartide. I motivi sono molti: la possibilità di una sicura conservazione dei dati atmosferici per le basse temperature – che sono anche la causa della

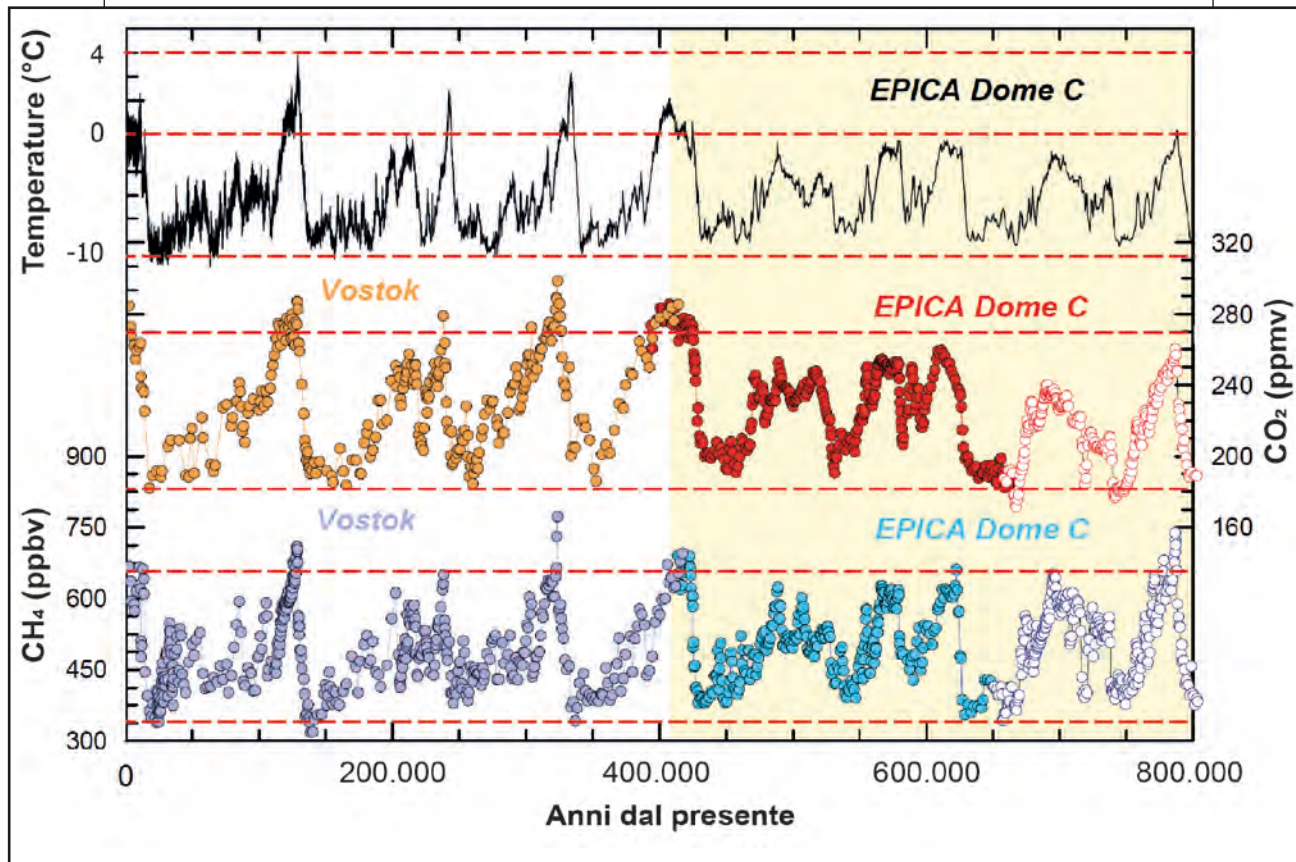


Grafico con i record climatici delle temperature e dei gas serra di Dome C per gli ultimi 820.000 anni. Le linee rosse tratteggiate indicano i valori di riferimento discussi nel testo.

lentezza dei processi di metamorfosi della neve in ghiaccio – a cui va aggiunto il bassissimo accumulo annuo che consente di ottenere sequenze di dati che rivelano un più antico passato climatico. Inoltre, lavorare sulla cima di un duomo topografico permette di ridurre al minimo il disturbo e la deformazione dovuta al flusso del ghiaccio.

In effetti tutti i grandi progetti di perforazione nel ghiaccio a scopo paleoclimatico sono stati effettuati nelle parti interne delle grandi calotte polari, raggiungendo profondità elevate e raccogliendo registrazioni del passato di centinaia di migliaia di anni. A partire dall'inizio degli anni '60 oltre 50 perforazioni in ghiaccio sono state realizzate nelle calotte polari antartiche di cui le principali sono state: Vostok (Russia e Usa), Dome C (Europa), Dronning Maud Land (Europa), Dome F (Giappone), Dome A (Cina), Talos Dome (Europa), Byrd (Usa), con registrazioni che vanno da pochi millenni fino agli 820.000 anni del record di Dome C.

L'European Project for Ice Coring in Antarctica (Epica), nasce nel 1994 con lo scopo di perforare in due zone dell'Antartide, una nel settore Pacifico, a

Dome C, e l'altra nel settore Atlantico, a Dronning Maud Land. Due siti con caratteristiche simili che permettono di capire il funzionamento della macchina climatica prima dell'influenza dell'uomo a scale diverse. Finanziamenti e gruppi di ricerca di Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Gran Bretagna, Islanda, Italia, Olanda, Svezia, Norvegia e Svizzera si sono uniti per costruire questo consorzio che, dopo i due successi ottenuti nel 2004 e nel 2006, è diventato punto di riferimento mondiale in paleoclimatologia. Il Talos Dome Ice Core Project (Taldice) nasce da una costola di Epica per perforare un duomo periferico (Talos Dome) a circa 300 km dalla base italiana Mario Zucchelli, nella Baia di Terra Nova. Con l'Italia come attore principale, insieme a Francia, Germania, Gran Bretagna e Svizzera, il progetto prevede di comprendere con maggiore dettaglio i rapporti tra atmosfera, ghiaccio ed oceano a partire dal settore Pacifico dell'Antartide. Infine l'International Partnership for Ice Core Sciences (Ipics) raccoglie invece, a livello mondiale, tutti i gruppi interessati nelle ricerche paleoclimatiche su ghiacciai. Si prefigge di studiare il clima del pianeta

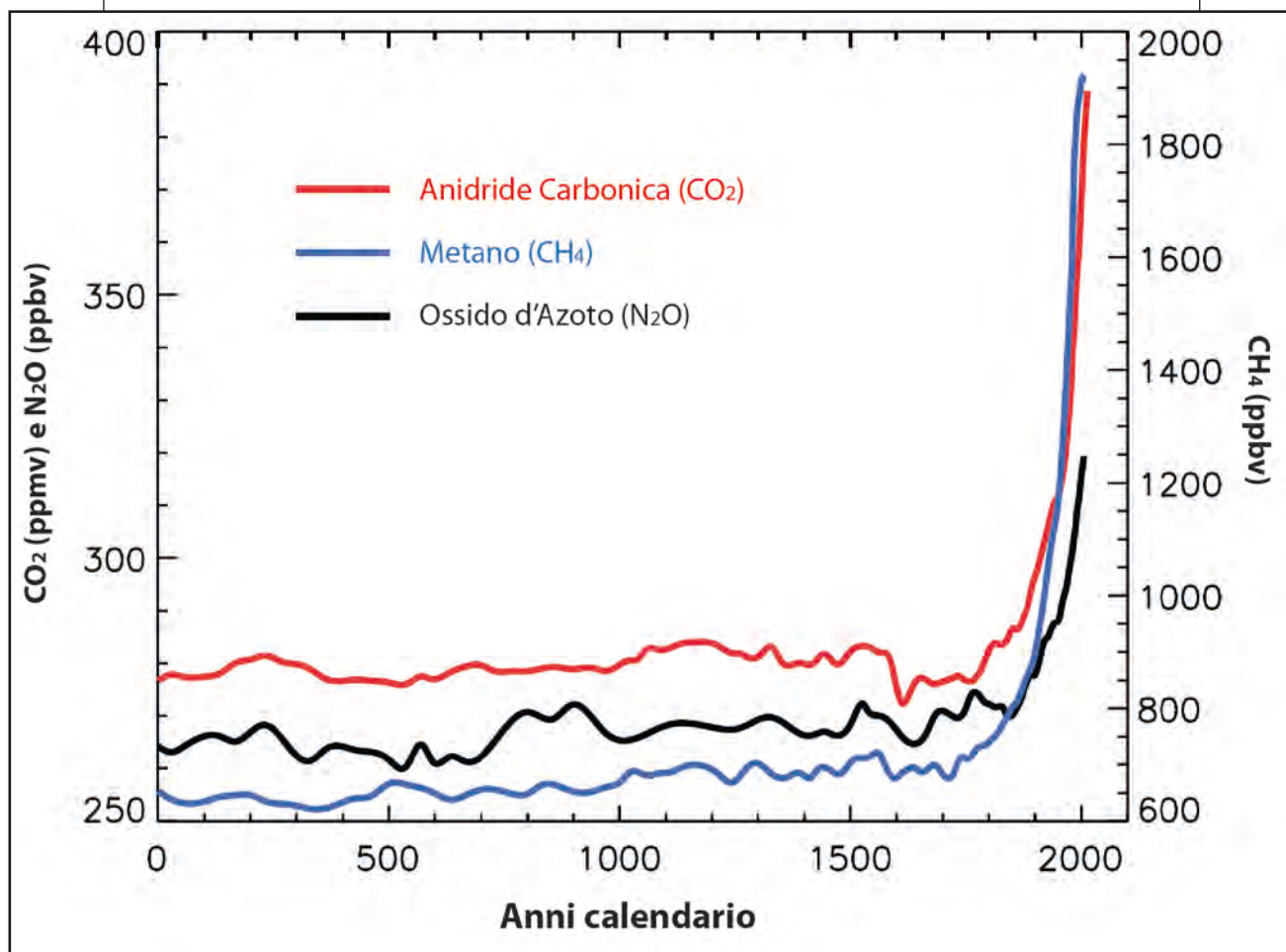


Grafico della concentrazione dei gas serra negli ultimi 2.000 anni; oltre all'anidride carbonica e al metano è riportato l'andamento dell'ossido di azoto, altro importante gas ad effetto serra.

a scale temporali diverse, attraverso perforazioni in ghiaccio e di raggiungere almeno 1,5 milioni d'anni di informazioni climatiche.

A Dome C, dove il progetto Epica ha perforato 3.270 m di ghiaccio, come abbiamo già anticipato, è stata recuperata la serie di dati da ghiacciaio più lunga al mondo, con 820.000 anni di registrazione. Copre una parte significativa della storia climatica del Quaternario (Era che rappresenta gli ultimi 2,55 milioni d'anni), partendo dalla fine del Pleistocene inferiore fino all'attuale Olocene, o come alcuni ormai lo chiamano l'Antropocene. Ed è proprio utilizzando questa carota che è stato possibile ricostruire, con estremo dettaglio, la storia climatica del nostro pianeta e della sua variabilità nel lungo periodo. I principali parametri studiati nella carota di Dome C sono la variazione della temperatura, la composizione chimica, la concentrazione in polveri fini e il contenuto di gas serra.

Sappiamo da tempo che prima dell'inizio delle

attività antropiche c'è stata una oscillazione tra periodi glaciali e periodi interglaciali. Infatti, tutte le registrazioni dei dati climatici portano un segnale molto simile, con una periodicità principale di circa 100.000 anni, e delle ciclicità con tempi più veloci, di circa 40.000 e 20.000 anni. Sono i cosiddetti cicli di Milankovich, matematico serbo che nel 1920 ha ricostruito le oscillazioni del nostro pianeta e dell'orbita terrestre. Il Sole e Giove, con la loro attrazione gravitazionale, modificano i moti della Terra, e in particolare l'eccentricità dell'orbita che diventa più o meno ellissoide con un ciclo di circa 100.000 anni. Questa variazione della forma dell'orbita modifica anche la quantità di energia solare che raggiunge la Terra, modificando di fatto il clima. Lo stesso meccanismo celeste porta ad avere un'oscillazione dell'asse terrestre rispetto la verticale tra i 21° e i 24° in 41.000 anni (oggi è circa 23,5°), e alla precessione degli equinozi che obbliga l'asse terrestre a compiere una rotazione completa in circa 19-21.000 anni formando

quello che viene chiamato il «doppio cono». Sono moti che anch'essi modificano la quantità di energia che viene gestita dal nostro pianeta, agendo direttamente sul sistema climatico. Non tutte hanno la stessa influenza nel determinare le variazioni climatiche a grande scala. L'eccentricità sembra dominare i cicli, seguita dall'inclinazione e successivamente dalla precessione. Se la macchina climatica sfrutta i raggi solari, cioè l'insolazione, è chiaro che una variazione dell'orbita planetaria provoca variazioni nel sistema di distribuzione dell'energia (atmosfera e oceani), e quindi del clima. L'alta risoluzione della carota di Dome C ha permesso di ricostruire con maggiore precisione tutte le frequenze naturali che hanno interessato, e interessano tuttora, il nostro sistema climatico.

Nella carota di Dome C si osserva una sequenza di cicli che alternano periodi glaciali freddi e periodi interglaciali caldi. L'ultimo ciclo termina con il passaggio dall'Ultimo Massimo Glaciale, avvenuto intorno a 20.000 anni fa, all'Olocene che rappresenta gli ultimi 11.750 anni della storia della Terra. Si tratta di un salto di temperatura media antartica di oltre 10°C. A livello oceanico, il ghiaccio stoccato sui continenti durante l'ultimo periodo glaciale (principalmente in Nord America e Nord Europa) aveva portato a un abbassamento medio dei livelli dei mari di circa 120 metri, con variazioni sostanziali nelle correnti oceaniche e in particolare della Corrente del Golfo, principale motore della circolazione oceanica termoalina globale. Negli ultimi 820.000 anni ben otto volte è stato osservato questo passaggio da freddo a caldo, con conseguente riassetto di tutti i parametri climatici. A seguito di un lungo periodo di raffreddamento (circa 50-70.000 anni) e un veloce periodo di riscaldamento (da 10 a 20.000 anni), si osservano periodi interglaciali caldi di 10-20.000 anni. Questa oscillazione a «dente di sega» si inserisce in una visione del sistema climatico terrestre che prevede l'esistenza di soglie che, quando superate, portano il sistema climatico a subire modificazioni brusche, che oggi vengono definite *abrupte*, utilizzando un termine molto in voga.

Nel progetto Taldice, che ha permesso di ricostruire in modo molto preciso gli ultimi 250.000 anni, è stato chiaramente evidenziato che gli effetti soglia non sono esclusivi delle grandi variazioni glaciale/interglaciale, ma si osservano salti di oltre 2-5°C in qualche millennio, specialmente durante l'ultimo periodo glaciale. Oscillazioni *abrupte* che sono tra l'altro in antifase con quelle registrate in Groenlandia. Questa specie di altalena bipolare è probabilmente legata alla velocità di distribuzione del calore da parte

degli oceani, che avviene proprio a scala millenaria.

Ma come già detto esistono numerosi modulatori interni al clima stesso, che vanno ad interferire con questi meccanismi, rendendo molto più complessa l'interpretazione dei dati. Un esempio lo leggiamo proprio nelle registrazioni di Epica dove si osserva come gli ultimi 5 periodi caldi (gli interglaciali da oggi fino a circa 420.000 anni fa), sembrano essere tutti simili come intensità, con valori di temperatura che sono in genere superiori (fino a 4°C) a quelli dell'Olocene. Se invece andiamo più indietro nel tempo, dai 420.000 anni fino a 820.000 anni, osserviamo che i periodi caldi sembrano essere molto meno intensi, con valori di temperatura simili o inferiori a quelli Olocenici. Questo non può essere imputato a cambi di insolazione. Infatti i cicli dei parametri orbitali sono noti e calcolati con estrema precisione usando le equazioni della meccanica celeste, e non danno valori significativamente diversi nell'insolazione nei periodi precedenti i 420.000 anni. Inoltre, a differenza dei periodi interglaciali, quelli freddi, le glaciazioni, mantengono temperature minime simili per tutti gli 820.000 anni. Sembra quindi che nel passato ci sia stata una rivoluzione climatica nei periodi caldi e nessuna rivoluzione in quelli freddi. Si tratta di una discrepanza che non è facile comprendere e infatti è diventata una delle prossime sfide per gli studi paleoclimatici sul nostro pianeta. Capire questa rivoluzione climatica vuol dire aggiungere un altro tassello alla comprensione del sistema clima del pianeta Terra.

Non soltanto le temperature, ma anche tutti gli altri componenti atmosferici, presentano questo stesso comportamento. Infatti i principali gas serra misurati proprio nelle carote di ghiaccio mostrano gli stessi andamenti. Sia l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) che il metano (CH<sub>4</sub>) si comportano in modo completamente parallelo con le registrazioni delle temperature. La CO<sub>2</sub> mostra dei minimi di concentrazione durante i periodi freddi glaciali, con valori tra 180 e 200 parti per milione in volume (ppmv, tra 0,018 e 0,020% della composizione dell'atmosfera), e i massimi di concentrazione, con valori tra i 280 ed i 300 ppmv (tra 0,028 e 0,030%). Lo stesso vale per il metano, ma con valori decisamente inferiori: da 300 a 350 parti per miliardo in volume (ppbv, tra 0,00003 e 0,000035%) durante i glaciali, e da 700 a 750 ppbv (tra 0,00007 e 0,000075%) per i periodi caldi. Da notare che i valori di gas serra registrati negli ultimi 800.000 anni prima dell'era industriale, sono nettamente inferiori a quelli che si registrano oggi a seguito delle emissioni umane. Oggi infatti le emissioni degli ultimi due secoli, hanno portato la concentrazione di CO<sub>2</sub>



CNR

Il Twin Otter che trasporta i ricercatori nei pressi di Dome C.

a circa 390 ppmv, un 30% in più del massimo valore interglaciale, e per il  $\text{CH}_4$  un valore di oltre 1.800 ppbv che rappresenta un aumento di quasi il 200% dei valori preindustriali.

Il futuro è rappresentato dalla possibilità di raggiungere 1,5 milioni d'anni di ghiaccio, infatti nell'ambito del programma Ipics è prevista la ricerca in quell'area dell'Antartide che presenta uno spessore di oltre 4,5 km di ghiaccio, chiamata Bacino Aurora, dove, oltre allo studio da satellite della superficie e della topografia della base del ghiacciaio, attraverso misure radar, sarà necessario costruire sonde di perforazione di nuova generazione e studiare liquidi di perforazione che riducano al minimo l'impatto sull'ambiente. Sfida che interesserà l'intera comunità scientifica mondiale per i prossimi 20 anni.

Valter Maggi, Università di Milano Bicocca

#### Bibliografia

- EPICA Consortium Members, 2006. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*, 444: 195-198.
- EPICA Consortium Members, 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429: 623-628.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Sciences Basis. Cambridge University Press.
- Jouzel, J., *et al.*, 2007: Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years, *Science*, 317: 793-796.
- Lüthi, D. *et al.*, 2008: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature*, 453: 379-382.
- Orombelli, G., V. Maggi and B. Delmonte, 2009. Quaternary stratigraphy and ice cores. *Quaternary International*, 219: 55-65.
- Stenni, B., *et al.*, 2011. Expression of the bipolar see-saw in Antarctic climate records during the last deglaciation. *Nature Geoscience*, 4: 46-49.



# Risorse intrappolate tra i ghiacci

In Antartide sono stati scoperti giacimenti minerali di un certo interesse ma un trattato internazionale li vincola sino al 2041

FRANCO TALARICO, FABIO FLORINDO, MARCO TAVIANI

**C**OPERTA AL 98% della sua superficie da un lenzuolo di ghiaccio spesso fino a quattro chilometri, l'Antartide cela gelosamente all'occhio la sua identità continentale. Eppure quel poco che si offre all'indagine dei geologi, emergendo come un *nunatak* dal nulla bianco, o affiorante in un'oasi di montagne e valli senza ghiaccio o infine come piccola traccia di antiche rocce e sedimenti in un carotaggio, ha permesso di svelarne molti segreti. Si è così capito che l'Antartide è formata da due unità ben distinte saldate fra loro solo dai ghiacci che iniziarono a espandersi circa 30 milioni di anni fa. E cioè l'Antartide occidentale, praticamente un vasto arcipelago, e l'Antartide orientale, più estesa e che rappresenta l'autentico nucleo continentale. Quest'ultimo è un archivio di rocce che vanno fra le più antiche note sul pianeta e databili a circa 4 miliardi di anni, fino alle lave prodotte ai giorni nostri dai vulcani attivi della Terra Vittoria (Figura 1).

Le affinità litologiche e paleontologiche documentano che l'Antartide è un frammento del supercontinente di Gondwana che cominciò a disintegrarsi nel Mesozoico circa 180 milioni di anni fa. A questa grande terra australe partecipavano l'America meridionale, l'Africa australe, il Madagascar, l'India, la Nuova Zelanda e l'Australia. Come mostrato in Figura 1, tutti questi continenti ora situati a latitudini medio-basse comprendono diverse importanti province geologiche, rappresentate da cratoni, ovvero settori di crosta antica e sfuggita agli eventi tettonici più recenti (età compresa tra oltre 3,4 a 1,6 miliardi di anni), terreni appartenenti a grandi fasce orogeniche (età da 1600 a 600 milioni di anni) e che occupano posizioni intracontinentali, e cinture orogeniche di età progressivamente più recenti (da 600 a meno di 200 milioni di anni) che costituivano il margine paleo-Pacifico del supercontinente. Una di queste fasce orogeniche, nota come Orogene di Ross e di età da 600 a 450 milioni di anni, coincide ora con le Montagne Transantartiche, la prominente catena montuosa (oltre 3000 km ed elevazioni sino oltre 4000 m) che suddivide il continente nei settori occidentale e orientale dal Mare di Weddell al Mare di Ross. Più avanti parleremo di un particolare ritrovamento avvenuto in una area dell'orogene di Ross, molto interessante per la trattazione del tema delle georisorse antartiche. Per ora, come è ben evidente in Figura 1, osserviamo che tutte le province geologiche riconosciute nei continenti australi trovano in Antartide la loro fedele prosecuzione. In seguito alla frammentazione del Gondwana, con fasi successive di



HANNES GROBE - ALFRED WEGENER INSTITUTE FOR POLAR AND MARINE RESEARCH

La catena delle Transantarctic Mountains, nella Terra di Vittoria, viste da Capo Roberts.

separazione dei vari blocchi continentali, i processi di deriva reciproca hanno allontanato di migliaia di chilometri gli antichi cratoni e le varie cinture orogeniche che, va detto, contengono molte delle risorse minerarie dell'intero pianeta e delle quali l'umanità si approvvigiona per il proprio sviluppo e benessere. Tra questi, per esempio, i depositi ricchi di rame, ferro, cobalto, piombo, nichel, cromo, argento, molibdeno, tungsteno, stagno, titanio, manganese, oro e via dicendo che costellano le parti più facilmente osservabili ed accessibili di Gondwana, e cioè quelle non coperte da sabbie desertiche o da ghiacci perenni. Intuitivamente, e la scienza corrobora almeno parzialmente questa ipotesi, minerali utili dovrebbero corredare anche le rocce di Gondwana che formano l'Antartide e, in effetti, abbiamo molteplici segnalazioni relative alla presenza di minerali in vari settori dell'Antartide. Analizziamo più in dettaglio la natura delle potenziali risorse esaminando la loro distribuzione geografica sul continente e lungo le sue coste in corrispondenza della piattaforma continentale (Figura 2).

La prima segnalazione di risorse minerali si deve

alla prima spedizione antartica di Shackleton – 1907-1909 – quando fu scoperto un deposito di carbone nel M. Buckley alla testata del Beardmore Glacier, nelle Montagne Transantartiche. In seguito, soprattutto nella fase della ricerca organizzata dai vari paesi del Trattato Antartico, in maniera sistematica e intensiva a partire dagli anni '60, tutte le mineralizzazioni attualmente conosciute in Antartide sono state scoperte durante normali studi di esplorazione geologica e di rilevamento, senza alcuna finalità di prospezione mineraria. L'entità delle riserve è quindi totalmente da valutare, così come il loro interesse commerciale agli attuali valori di mercato.

Le concentrazioni metalliche, le risorse più diffuse nel continente, ricadono in tre distinte province metallogeniche. La prima è la provincia Est-Antartica, prevalentemente a ferro, conosciuta come *Band-Iron Formation* (BIF), che sembra costituire la continuazione di analoghi depositi precambriani noti in Australia e India; mineralizzazioni sono note in varie località delle terre di Enderby e di Wilkes; il più importante deposito è quello del M. Ruker, nelle Prince Charles Mountains. La seconda, la provincia

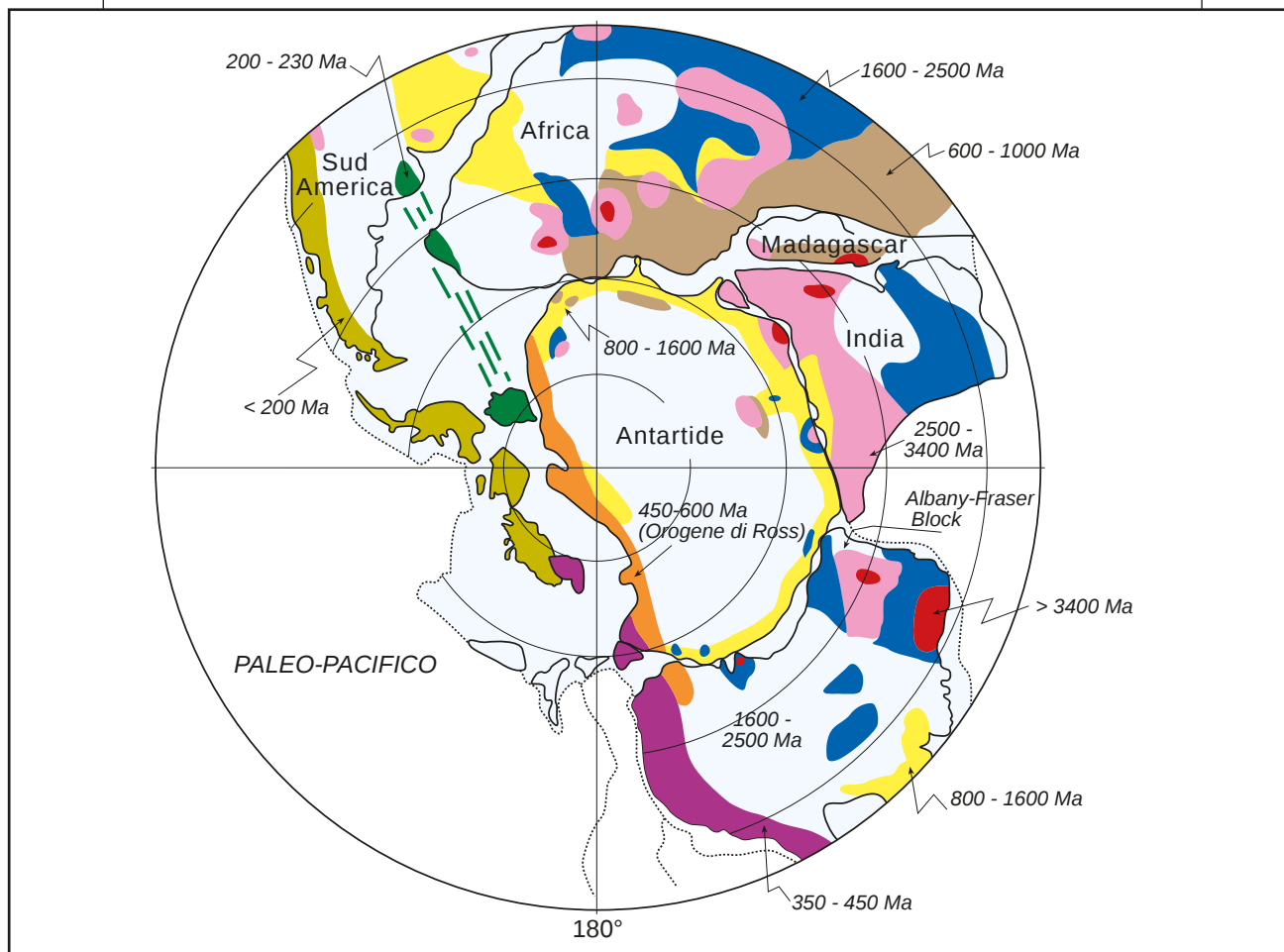


Figura 1. Ricostruzione del supercontinente Gondwana all'inizio del Mesozoico: numeri e colori corrispondenti indicano rispettivamente le età (in milioni di anni) e l'estensione delle province geologiche (da Ricci *et al.*, 2001).

transantartica, che si distingue in una sub-provincia legata ai granitoidi paleozoici dell'orogene di Ross, che è sicuramente la più povera, con modestissime manifestazioni essenzialmente a solfuri e una sub-provincia legata alle rocce magmatiche basiche giurassiche del Ferrar Group. Nell'ambito di quest'ultima, la più nota e importante mineralizzazione è quella a ferro e titanio e subordinati solfuri di ferro e rame della intrusione basica stratificata di Dufek, nelle Pensacola Mountains.

La terza è la provincia Andina, di età mesozoica e cenozoica, fondamentalmente legata al plutonismo calcaino, ed è localizzata nella Penisola Antartica e nella Terra di Ellsworth; anche in questo caso vengono distinte due sub-province, una a rame e una più occidentale a ferro (quest'ultima di minore importanza). Il più conosciuto deposito metallico della Penisola Antartica appartiene alla provincia a rame e si trova nell'Isola King George, nell'arcipelago delle Isole Shetland Australi; si tratta di un giacimento

di origine idrotermale a prevalente pirite e minerali secondari con elevato contenuto di rame.

La natura della maggior parte di queste mineralizzazioni mostra una forte analogia con mineralizzazioni note e coltivate nei blocchi continentali adiacenti all'Antartide, nel supercontinente di Gondwana. Di conseguenza, si possono interpretare come «continuazioni» delle varie province metallogeniche conosciute nei diversi continenti dell'emisfero meridionale con i quali l'Antartide era in continuità. Ciò sembra quindi suggerire che altri depositi minerali possano essere presenti al di sotto della coltre di ghiaccio.

Da questo punto di vista le aree suscettibili di ritrovamenti di giacimenti metallici di interesse economico sono sicuramente la Penisola Antartica per il rame e, nel cratone est-antartico, la Wilkes Land per nichel e oro e la Dronning Maud Land per oro, cromo, nichel, rame e platino, così come in quest'area non si può escludere la presenza di «pipes» diamanti-

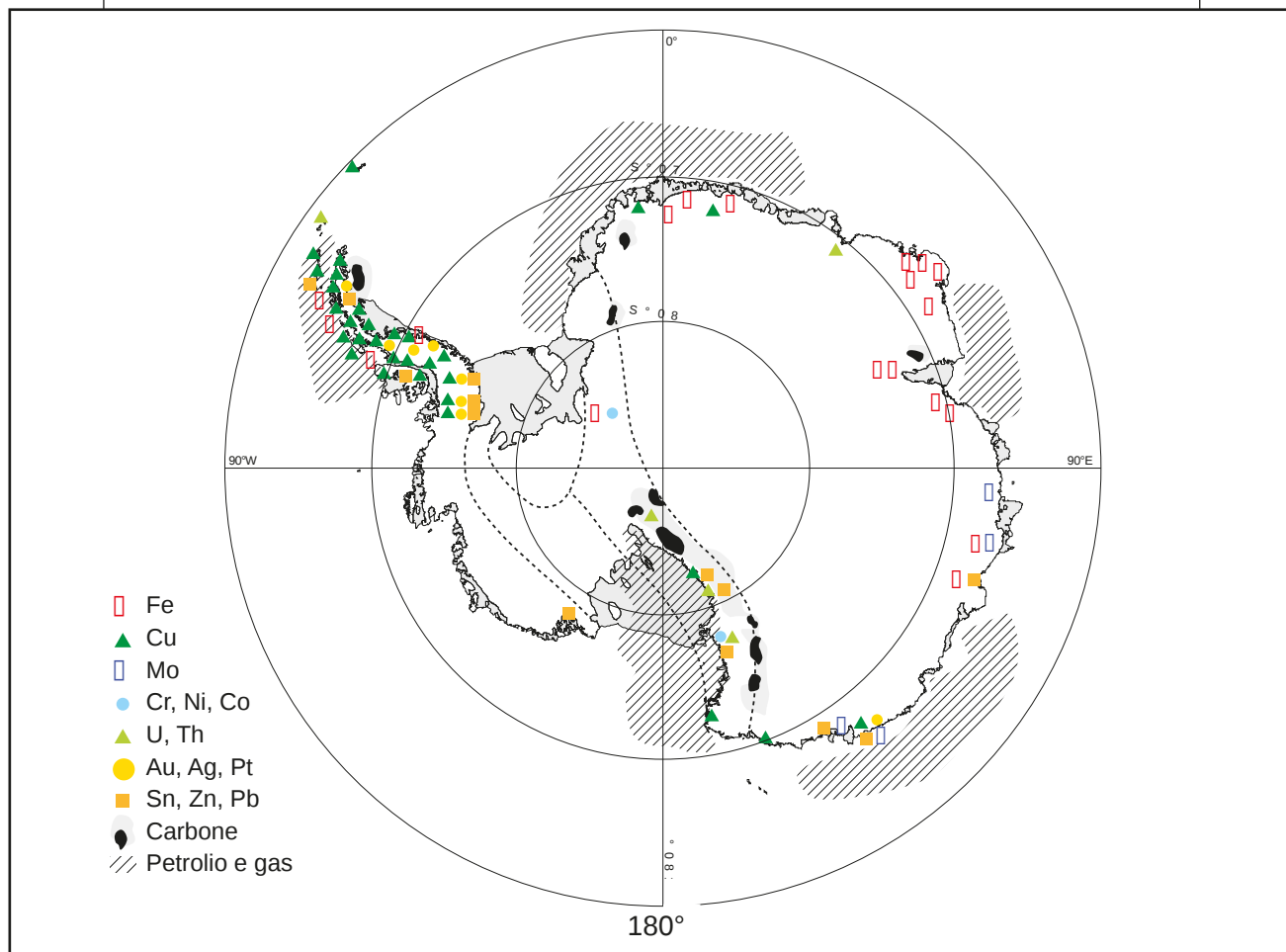


Figura 2. Localizzazione delle principali potenziali risorse minerarie in Antartide (da Ricci *et al.*, 2001).

feri. Occorre però notare che l'*Albany-Fraser Block*, una delle principali province geologiche nell'Australia Occidentale, che troverebbe prosecuzione in analoghi terreni del settore pacifico dell'Antartide Orientale, si è rivelato sinora non particolarmente ricco in risorse. I giacimenti più ricchi di rame in Cile non sono ubiquitari nella catena andina ma ristretti alla parte settentrionale, a nord di Santiago del Cile.

Sta di fatto che le conoscenze attuali sulla presenza di giacimenti (ovvero depositi di minerali utili suscettibili di sfruttamento) nella regione antartica restano ad ora molto lacunose, ben lontane dal livello di caratterizzazione presente, ad esempio, nei catasti minerari e nei programmi delle attività estrattive attualmente presenti negli altri continenti. Per quasi tutte le potenziali georisorse antartiche, la determinazione della loro natura, localizzazione e stima del volume, è tuttora affidata alla scoperta di modeste tracce, indizi di piccole concentrazioni del minerale utile in corpi volumetricamente insignificanti (spesso piccole vene di spessore millimetrico), oppure me-

diate lo studio delle anomalie geochemiche, ovvero la misura dello scostamento del contenuto degli elementi di interesse economico da quello normalmente presente nelle rocce.

Un caso che si discosta in parte da questo quadro, e sul quale ci soffermeremo qui nell'esporre qualche dettaglio, è il ritrovamento di oro metallico in un filone di quarzo nella Terra Vittoria, alla terminazione sull'Oceano Pacifico delle Montagne Transantartiche. Grazie a questo ritrovamento la presenza di oro sul continente, in precedenza legata solo ad indizi, è ora del tutto accertata. Come in molti altri casi, si è trattato di una scoperta del tutto imprevista quando, nell'estate australe del 2005, uno dei coautori di questo articolo, con due colleghi dell'Università di Genova, effettuava una esplorazione geologica senza alcun obiettivo di ricerca mineraria. Non parliamo di invisibili particelle ma grani di diversi millimetri incastonati nel quarzo di un grande filone ben esposto sulla sommità di una valle presso il ghiacciaio Dorn (da cui il nome Dorn gold deposit assegnato alla

mineralizzazione) nelle Bowers Mountains. I rilievi geologici in questa area, come altrove nella Terra Vittoria settentrionale, erano finalizzati a capire come e quando si era formato quel settore di continente antartico nel contesto dell'evoluzione del Gondwana.

Dopo l'iniziale verifica mediante osservazioni al microscopio elettronico, che confermava la presenza di oro al 99% con tracce di argento e platino, le ricerche successive si sono rivolte allo studio della mineralizzazione con una maggiore enfasi su quegli aspetti che possono fornire vincoli più stretti nella ricostruzione del quadro geodinamico regionale. In una recente pubblicazione sulla rivista scientifica *Gondwana Research*, il filone di quarzo aurifero trovato nella Terra Vittoria viene riconosciuto come il primo ritrovamento di oro nel continente antartico. Ospitato in terreni metamorfici di età Paleozoica dell'Orogene di Ross il filone fa parte di un sistema di filoni e di vene che si sono formate in seguito alla infiltrazione lungo faglie e fratture di fluidi mineralizzati. I terreni di natura vulcanica e sedimentaria che ospitano il sistema filoniano mostrano una intensa alterazione idrotermale e, insieme alla mineralizzazione, documentano per una lunga serie di caratteristiche (età, metamorfismo struttura, presenza di oro, etc.) fortissime analogie con un'area specifica nel settore occidentale dello stato di Vittoria nell'Australia sud-orientale.

La consistenza del ritrovamento suggerisce una elevata concentrazione di oro nei volumi di roccia nel sottosuolo, tutte caratteristiche che ne fanno un potenziale giacimento di elevato interesse economico. Se localizzato in un qualsiasi altro continente, si sarebbe subito avviato un intervento di prospezione, con sondaggi e rilievi specificatamente indirizzati a valutare l'estensione del giacimento, e indispensabili per la successiva fase di coltivazione. Il ritrovamento ha in realtà un altro e ancor più importante valore: quello prettamente scientifico, alimentando un flusso di nuove informazioni indispensabili per migliorare in modo significativo la nostra comprensione di fasi importanti della storia geologica di un settore chiave del Gondwana e, solo in secondo piano, se e quando ritenute interessanti, anche la conoscenza della distribuzione nel tempo e nello spazio delle sue potenziali risorse.

In conclusione, in assenza di indagini finalizzate alla prospezione mineraria, l'effettiva consistenza dei depositi di minerali e rocce di interesse economico in Antartide resta in gran misura apparentemente irrilevante, per non parlare poi della assoluta non-economicità.

Molto altro si cela senza dubbio sotto i ghiacci continentali che ricoprono l'Antartide ma al momen-

to sono solo speculazioni che forse non troveranno risposta, almeno per molti decenni a venire. La sempre crescente fame di energia impone di considerare, seppure in termini squisitamente accademici, anche le potenzialità dell'Antartide nel campo dei combustibili fossili. I geologi hanno da tempo localizzato depositi di carbone di età permo-triassica in Antartide orientale sia nella Catena Transantartica che sulle montagne Prince Charles. Nel primo caso comunque si tratta di carbone di quantità e qualità modeste, mentre il secondo deposito è più promettente, per quanto solo sulla carta data la sostanziale inaccessibilità dei luoghi. Gli idrocarburi sono presenti in Antartide anche se probabilmente limitati a depositi *offshore* nelle piattaforme continentali intorno all'Antartide, in particolare nel Mare di Weddell e nel Mare di Ross. L'entità delle riserve è comunque totalmente da valutare, così come il loro interesse commerciale agli attuali valori di mercato. Gas naturale, spesso intrappolato come metano ghiacciato in quei depositi particolarissimi conosciuti come gas idrati o clatrati e noti per esempio al largo della Penisola antartica, potrebbe suscitare in un distante futuro un qualche interesse di estrazione.

Ma al momento l'Antartide è fortunatamente ancora difesa dal trattato internazionale e in particolare dal protocollo di Madrid firmato nel 1991 che bandisce ogni tipo di attività esplorativa e di sfruttamento minerario nell'ultima regione largamente incontaminata della Terra. Questo trattato scadrà nel 2041 e il suo eventuale e auspicabile rinnovo dovrà forse fare i conti con un pianeta sovrappopolato e con alcune delle risorse minerarie, come il rame, già prossime all'esaurimento anche a causa delle prorompenti necessità di sviluppo di paesi in forte crescita e superpopolati quali Cina e India. In teoria esiste sulla carta un organo internazionale consulente dedicato alla regolamentazione di qualunque impresa mineraria in Antartide, denominato Cramra (*Convention on the Regulation of Antarctic Mineral Resource Activities*). In pratica la migliore difesa dell'Antartide da un potenziale interessamento a sfruttarne le risorse minerarie è ancora il suo isolamento e le condizioni climatiche proibitive che impongono costi elevatissimi per qualunque attività del genere. Altro aspetto che dovrebbe richiedere adeguata attenzione, e che forse non tutti conoscono, è che la maggioranza di tali risorse, come altrove sul pianeta, è intrinsecamente finita, nel senso che non vengono rinnovate nei processi terrestri attuali, e quando ciò avviene in quantità non significative. Non è detto però che a prescindere dal carattere non rinnovabile di queste risorse, come sottolineato da alcuni analisti, ciò che oggi è decisamente non-economico non risulti invece



UNIVERSITEIT UTRECHT

Un gigantesco iceberg alla deriva.

un'opzione considerabile nel futuro in un pianeta con risorse in esaurimento. Non sarebbe certamente il primo caso del genere.

Desideriamo concludere queste nostre considerazioni sulle risorse non biologiche dell'Antartide rammentando che il continente di ghiaccio è chiamato così perché ne contiene una quantità smisurata, pari al 70% circa di tutte le riserve di acqua dolce della Terra. Il valore strategico dell'acqua è fin troppo noto e non sorprende quindi che già in passato sia stata presa in considerazione l'idea di utilizzare gli iceberg come potenziali contenitori di acqua potabile da convogliare alle aree popolate. È stato calcolato che la popolazione mondiale attuale utilizzi oltre 3 milioni di chilometri cubici di acqua all'anno. Al vertiginoso tasso di crescita della popolazione mondiale il giorno in cui ci berremo l'acqua dell'Antartide forse non è troppo lontano.

Franco M. Talarico, Università degli Studi di Siena. Fabio Florindo, Ingv, Roma. Marco Taviani, Ismar-Cnr Bologna

#### Bibliografia

- Boger S. D. (2011). Antarctica - Before and after Gondwana. *Gondwana Research* 19, 335-371
- Crispini L. *et al* (2011). The Dorn gold deposit in northern Victoria Land, Antarctica: Structure, hydrothermal alteration, and implications for the Gondwana Pacific margin. *Gondwana Research*, 19, 128-140
- De Wit M.J. *et al*. (1999). Scent of a supercontinent: Gondwana's ores as chemical tracers – tin, tungsten and the Neoproterozoic Laurentia-Gondwana connection. *Journal of African Sciences*, vol. 28 (1), pp. 35-51.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., Gardoll, S., 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews* 18, 1-75.
- Gordon R.B., Bertram M. & Graedel T.E. 2006. Metal stocks and sustainability. *PNAS*, vol 103(5), pp. 1209-1214.
- Huult J.L. & Ostrander N.C. 1973. *Antarctic icebergs as a global fresh water resource*. Reports of the Rand Corporation.
- Ricci C.A. *et al*. (2001). La storia geologica: lineamenti geologici dell'Antartide. In *Antartide. Terra di scienza e riserva Naturale*. A cura di C. Baroni, Terra Antartica Publications, Siena.