



1985 - 2005

***Venti anni di
ricerche italiane
in Antartide***

Comitato editoriale

Carlo Baroni
Aldo D'Alessio
Pier Angelo Guermani
Jacqueline Müller
Carlo Alberto Ricci
Lucia Simion

Hanno contribuito

per i testi

Roberto Azzolini
Roberto Bargagli
Bruno Battaglia
Maurizio Candidi
Paolo Cescon
Antonino Cucinotta
Giorgio Dall'Oglio
Guido di Prisco
Francesco Maria Faranda
Silvano Focardi
Massimo Frezzotti
Claudio Ghezzi
Letterio Guglielmo
Antonio Meloni
Andrea Morelli
Silvia Olmastroni
Giuseppe Orombelli
Rosaria Palmeri
Antonio Peri
Giancarlo Spezie
Luana Testa

per le immagini

Lucia Simion, Guillaume Dargaud, Carlo Baroni, Massimo Frezzotti, Giulio Cozzi, Roberto Bargagli, Silvia Olmastroni, Roberto Dicasillati, Federico Rossetti, Peter Barrett, Museo Nazionale dell'Antartide, Consorzio PNRA

Copertina - Immagine da satellite del 28 Marzo 2004 di parte del Mare di Ross (Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC; <http://visibleearth.nasa.gov>). Si evidenziano la *polynya* di Baia Terra Nova e l'iceberg B-15A che si è distaccato dalla Piattaforma di Ross nel Marzo 2000.

1985-2005, Venti anni di ricerche italiane in Antartide

© Programma Nazionale di Ricerche in Antartide, 2006



1985 - 2005

***Venti anni di
ricerche italiane
in Antartide***



1985-2005 Venti anni di ricerche italiane in Antartide



Presentazione	5
La criosfera continentale	6
Un osservatorio privilegiato della contaminazione ambientale globale	12
L'atmosfera e il clima	14
L'Oceano Antartico	17
La vita e l'adattamento degli organismi	20
La storia della Terra nelle rocce e nei sedimenti	28
L'interno della Terra dall'Antartide	34
Il campo magnetico terrestre e la ionosfera: relazioni con il Sole	36
Lo spazio visto dall'Antartide	38
La vita e la salute dell'uomo	40
Tecnologie in ambiente polare	42
Le infrastrutture	44
Il Museo Nazionale dell'Antartide <i>Felice Ippolito</i>	50
Il Parlamento in Antartide	52
Conclusioni e prospettive	54



Alcune tappe del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide

- 1981 - Adesione dell'Italia al Trattato Antartico
- 1985 - Istituzione del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (legge 284, 10 Giugno 1985)
- 1985 - Prima spedizione italiana in Antartide
- 1987 - Inizio della costruzione della stazione costiera a Baia Terra Nova nel Mare di Ross
- 1987 - Ammissione dell'Italia al Sistema del Trattato Antartico in qualità di membro consultivo
- 1988 - Ammissione dell'Italia allo *Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR)*
- 1993 - Stipula dell'accordo italo-francese per il progetto Concordia
- 1996 - Istituzione del Museo Nazionale dell'Antartide "Felice Ippolito"
- 1999 - Inizio della costruzione della stazione Concordia sul plateau polare in località Dome C
- 2003 - Istituzione del Consorzio per l'attuazione del PNRA costituito da ENEA, CNR, INGV e OGS
- 2005 - XX spedizione italiana in Antartide e *winterovering* presso la stazione Concordia

Presentazione

Quando Claudio Tolomeo, uno dei padri della geografia, tracciò nel secondo secolo dopo Cristo una mappa del mondo, chiamò *Terra Incognita* un vasto territorio posto nella parte più meridionale del pianeta. E ancora alla fine del XVI secolo i cartografi chiamavano *Terra Australis Nondum Cognita*, quella terra, per l'appunto, non ancora conosciuta.

L'Antartide è stata l'ultima regione del mondo ad essere avvistata, intorno al 1820, ed esplorata: ancora oggi le grandi epopee del norvegese Roald Amundsen e Robert Falcon Scott tra i ghiacci antartici per la conquista del Polo Sud suscitano ammirazione ed emozione non solo tra gli esperti ma anche presso il grande pubblico.

L'Antartide è, dunque, rimasto a lungo una terra sconosciuta. Ed è solo a partire dagli ultimi decenni che, anche grazie agli scienziati e ai tecnici italiani, ha iniziato a diventare davvero *Terra Cognita*, rivelando peraltro tesori inattesi di straordinario interesse naturalistico e scientifico.

La vita sul continente e nell'oceano che lo circonda. Le rocce antiche, alcune delle quali vecchie di più di 3,6 miliardi di anni. I ghiacci e i laghi subglaciali. Il ruolo del continente nella geofisica del pianeta. L'uomo che impara ad adattarsi alle sue condizioni estreme. Tutto è di estremo interesse scientifico.

Stiamo inoltre imparando che quelle terre australi dove si concentrano, sotto forma di ghiaccio, la gran parte delle acque dolci del pianeta, sono un osservatorio assolutamente privilegiato dell'ambiente globale.

I Greci pensavano che quella *Terra Australis* svolgesse un ruolo importante nell'equilibrio del pianeta. Oggi sappiamo che questo è vero, anche se per ragioni diverse da quelle che immaginavano i padri del pensiero occidentale. Sappiamo infatti che, da molto tempo, l'Antartide svolge il suo ruolo di equilibrio non nel bilancio di massa del pianeta, ma nel bilancio del clima del pianeta.

Nei ghiacci del continente bianco c'è scritto tanto il passato quanto il futuro del clima terrestre e dei suoi mutamenti. Cosicché conoscere l'Antartide è diventato un'esigenza scientifica e politica primaria: perché significa conoscere il nostro passato e cercare di prevedere il nostro futuro ambientale.

Se si modifica l'Antartide, infatti, è tutto il pianeta che ne risente. Se si sciolgono, anche parzialmente, i ghiacci del continente bianco e aumenta, come già è avvenuto in passato, in maniera sensibile il livello dei mari, tutte le coste del pianeta ne subiranno le conseguenze. Comprese le coste italiane. Il sistema climatico del pianeta e il ruolo che vi svolge l'Antartide è tale che, riformulando la famosa metafora di Edward Lorenz, potremmo dire che basta uno scricchiolio di ghiacci nella Baia di Terra Nova per minacciare Venezia.

Per tutte queste ragioni assume un valore strategico la ricerca italiana in Antartide, che ormai vanta venti anni di esperienza. Con la presenza di propri ricercatori presso la Stazione Mario Zucchelli e, insieme con i francesi, presso la Stazione Concordia, l'Italia contribuisce non solo a rispondere a domande primarie *curiosity-driven* – che è una funzione fondante dell'attività scientifica – ma anche ad allestire la base di conoscenze necessarie per costruire un futuro desiderabile per se stessa e per l'intera umanità.

In venti anni, il Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA) ha prodotto ottimi risultati in molti settori scientifici (scienze della vita, scienze fisiche e chimiche, scienze della Terra, oceanografia ed ecologia) e anche tecnologici. Sarà mio impegno personale fare in modo che il Programma continui e si rafforzi, con risorse finanziarie adeguate e soprattutto continue. Consolidando, anche in vista dell'anno polare internazionale, la presenza della scienza italiana in quella terra di frontiera e, come sancito dalla comunità internazionale col Trattato del 1958, di pace.

On. Fabio Mussi

Ministro dell'Università e della Ricerca



La criosfera continentale



La crescita della glaciologia italiana

La ricerca glaciologica ha un ruolo rilevante in tutti i programmi scientifici nazionali e internazionali in Antartide. Le ricerche glaciologiche italiane, timidamente iniziate nelle prime spedizioni, si sono poi pienamente sviluppate, grazie anche alla partecipazione a programmi internazionali. Due sono stati gli obiettivi scientifici principali: da un lato lo studio mediante misure geofisiche e geodetiche (da satellite, da aereo, da terra) del comportamento dinamico dei ghiacciai della Terra Vittoria settentrionale e del settore della calotta antartica orientale prospiciente al Mare di Ross ed all'Oceano Pacifico meridionale, dall'altro l'analisi mediante metodi chimici e fisici del ghiaccio estratto tramite perforazioni, allo scopo di ricostruire la storia dell'atmosfera, del clima e dell'ambiente nella regione polare antartica, come contributo alla comprensione dei cambiamenti globali.

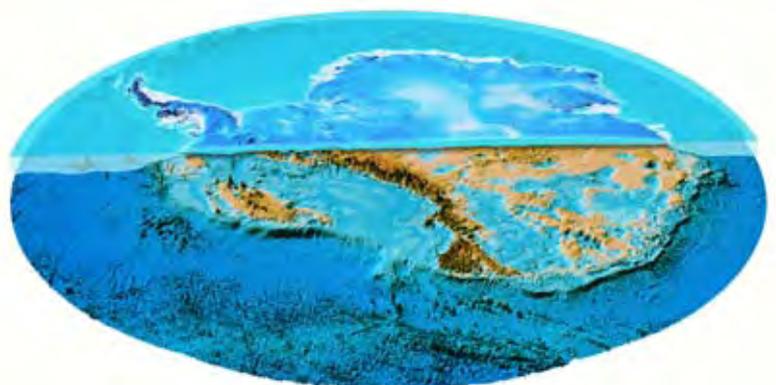
La dinamica delle calotte glaciali

La conoscenza del comportamento dinamico della calotta e dei ghiacciai antartici consente di valutare, tra l'altro, il loro bilancio di massa, in altre parole il loro stato di salute, se cioè i ghiacci antartici siano stabili, in aumento o in riduzione, contribuendo attivamente, in quest'ultimo caso, alla risalita del livello degli oceani. E' noto che questo fenomeno costituisce il rischio ambientale più grave che minaccia l'immediato futuro della Terra, perché porterebbe alla scomparsa di molte isole (atolli) e di basse pianure costiere, sulle quali vivono decine di milioni di abitanti. Anche molte città italiane, si pensi ad esempio a Venezia, e ampi settori delle nostre pianure sono esposti a questo rischio.

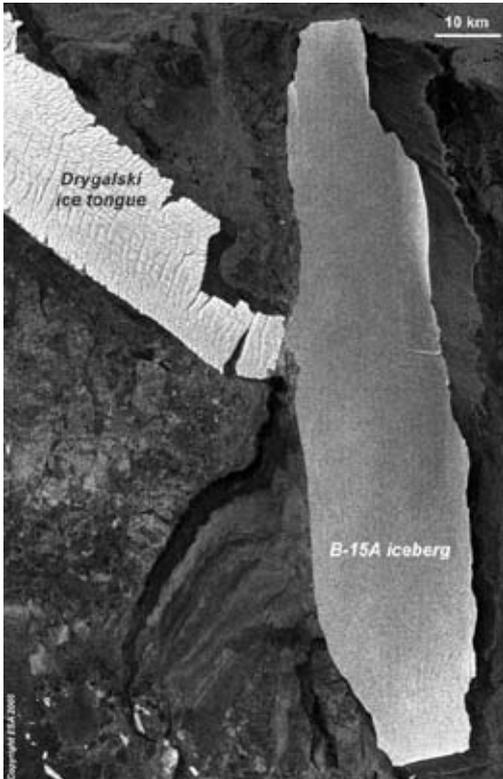
Le indagini compiute con campagne geofisiche da aereo (60.000 km di tracciati radar, una volta e mezza la circonferenza terrestre) e con misure a terra con carovane di trattori e slitte, coprendo percorsi lunghi alcune migliaia di chilometri (vedi scheda ITASE), hanno rivelato che, nel settore studiato, i dati utilizzati per la stima della risalita del livello del mare, sono largamente errati. Le nuove misure di fusione alla linea di galleggiamento sono di decine di metri all'anno, un ordine di grandezza superiore a quello che era ipotizzato fino a pochi anni fa. Analogamente, le misure dell'accumulo nevoso hanno messo in evidenza valori fino al 60% inferiori rispetto alle carte dell'accumulo nevoso precedentemente utilizzate.

Anche se la complessità dei fenomeni ancora non consente una valutazione accurata, dalle indagini eseguite deriva un segnale di accresciuto allarme. Nella Penisola Antartica e nei ghiacciai che defluiscono dalla Calotta Occidentale verso il Mare di Amundsen, fra il 1989 e il 2005, si sono disintegrate e ridotte drasticamente molte piattaforme di ghiaccio galleggianti e si è osservato un aumento della fusione basale, accompagnato da un arretramento della linea di galleggiamento. Questi fenomeni sono collegati all'aumento anomalo di temperatura nella Penisola Antartica (+2,5 °C in 50 anni) e ad un probabile aumento della temperatura delle acque oceaniche. Queste piattaforme di ghiaccio galleggianti si erano formate alla fine dell'ultima glaciazione e non si erano mai ridotte fino alle dimensioni attuali negli ultimi 10.000 anni. Il collasso delle piattaforme di ghiaccio galleggianti e l'arretramento delle linee di galleggiamento ha innescato un drastico aumento della velocità dei ghiacciai, producendo quindi un più rapido afflusso di ghiaccio a mare.

Le ricerche italiane hanno inoltre contribuito alla migliore conoscenza dello spessore dei ghiacci antartici (nel bacino subglaciale Aurora, Terra di Wilkes, è stato riscontrato il secondo valore massimo di spessore, di 4750 m), della morfologia del substrato roccioso sepolto, della loro velocità di scorrimento, delle variazioni nel tempo delle fronti glaciali a mare, dell'azione del vento nel trasporto e nella sublimazione della neve, ecc.



Uno spaccato della calotta antartica e dell'oceano circostante e la morfologia subglaciale e dei fondi oceanici. La coltre di ghiaccio ha uno spessore medio di circa 2 km e si appoggia sopra uno zoccolo continentale in larga parte posto sotto il livello del mare. La morfologia del substrato roccioso presenta rilievi e catene montuose, quasi interamente sepolti dal ghiaccio (quota massima 4897 m), e bacini e fosse, profondi anche oltre 2500 m sotto il livello del mare.



Lo scontro tra l'iceberg B-15 A, staccatosi dalla piattaforma di ghiaccio galleggiante di Ross e la lingua glaciale galleggiante Drygalski, generata dal flusso in mare del Ghiacciaio David. La neve accumulatasi nelle migliaia di anni sopra la calotta antartica, trasformatasi in ghiaccio, fluisce direttamente in mare, ove viene dissipata principalmente per ablazione solida, cioè per distacco di iceberg. Questi andranno alla deriva e per fusione restituiranno lentamente l'acqua sottratta agli oceani per evaporazione. Si calcola che ogni anno circa mezzo centimetro d'acqua evapori dalla superficie degli oceani e si depositi in forma di neve sull'Antartide.

La datazione mediante radiocarbonio di colonie di pinguini relitte, di resti di elefanti marini (oggi non più presenti nel Mare di Ross) e di conchiglie marine ha consentito di caratterizzare le fasi di ritiro dei ghiacciai pleistocenici e di ricostruire curve di sollevamento relativo del livello del mare negli ultimi 8000 anni. Sono state individuate e datate morene tardiglaciali e oloceniche, evidenze di variazioni glaciali recenti della calotta e dei ghiacciai minori.



La superficie della calotta antartica: neve e solo neve per centinaia di chilometri, incessantemente modellata dal vento in increspature e solchi (sastrugi) e dune.

Le indagini radar da aereo nel settore di Dome C hanno portato alla scoperta di rilievi montuosi sepolti con oltre 2000 m di dislivello e di 24 nuovi laghi subglaciali, il maggiore dei quali (Lago Concordia) è grande più di due volte il Lago di Garda ed è uno dei possibili obiettivi internazionali per la ricerca di forme di vita in questi ambienti estremi.

Il ghiaccio come archivio della storia climatica e ambientale della Terra

Le perforazioni in ghiaccio, condotte dapprima con strumentazione leggera capace di penetrare un centinaio di metri, quindi, nell'ambito del programma internazionale EPICA (vedi scheda), con strumentazione più complessa, capace di perforare alcune migliaia di metri, hanno fornito informazioni nuove sulle variazioni climatiche in Antartide e, in generale, nell'emisfero meridionale. Con la perforazione EPICA a Dome C sono stati documentati 9 cicli glaciali/interglaciali maggiori, raggiungendo ghiaccio più antico di 800 mila anni.

Nelle carote di ghiaccio è contenuta la storia dettagliata del clima (temperatura, precipitazioni, circolazione atmosferica, ecc.) e dell'atmosfera nell'emisfero meridionale. È stato mostrato che nei grandi cicli climatici glaciali/interglaciali CO₂ e metano sono variati in fase e proporzionalmente con le variazioni di temperatura, e che a tali cicli si sono sovrapposte variazioni climatiche di breve durata (da poche migliaia di anni ad alcuni secoli). È stata prodotta anche una ricostruzione dettagliata dell'attività vulcanica esplosiva, nonché di altri aspetti ambientali che indirettamente hanno lasciato la propria traccia nei ghiacci polari, quali l'estensione dei ghiacci marini, la temperatura superficiale delle acque oceaniche, i percorsi seguiti dalle perturbazioni cicloniche e la loro intensità, ecc.

Il paesaggio glaciale antartico e la sua storia

L'analisi delle forme del rilievo ha contribuito a decifrare la storia glaciale dell'Antartide e si è, fra l'altro, concretizzata nella compilazione di carte glaciologiche e geomorfologiche alla scala di 1:250.000. Basate su mosaici di immagini da satellite, queste carte riportano una sintesi delle misure e delle osservazioni condotte e costituiscono una documentazione assai valida della ricerca italiana per la caratterizzazione e lo studio dell'evoluzione del paesaggio antartico. Sono stati ricostruiti i limiti raggiunti dai ghiacciai nell'Ultimo Massimo Glaciale (ca. 20.000 anni fa).



Progetto Concordia

Durante l'inverno australe 2005 è stata per la prima volta abitata la nuova stazione permanente italo-francese Concordia. La stazione è stata costruita a partire dal 1995 nel cuore della calotta antartica, presso la culminazione di Dome C, a 3233 metri di quota (Antartide Orientale, 75° 06' di latitudine Sud e 123° 21' di longitudine Est). Dome C dista oltre 1000 km in linea d'aria dalle stazioni costiere italiana e francese (Stazione Mario Zucchelli a Baia Terra Nova e Dumont d'Urville nella Terra Adélie, rispettivamente).

La costruzione è avvenuta in parallelo con la perforazione in ghiaccio EPICA, nel corso dell'estate australe (da novembre a febbraio), utilizzando le comuni attrezzature del campo di tende e *containers* allestito a questo scopo. La Stazione Concordia e il campo di montaggio hanno già ospitato attività scientifica nei mesi estivi a partire dal 1995 e - per la prima volta - anche nel corso dell'inverno australe 2005. Concordia è una località privilegiata per ricerche in molti campi scientifici.

Medicina e psicologia

L'isolamento e l'ostilità ambientale fanno di Concordia un luogo particolarmente adatto allo studio del comportamento umano in ambiente ristretto ed estremo, in condizioni fisiologiche e, soprattutto, psicologiche molto simili a quelle che si ritrovano nei voli spaziali e sulle stazioni orbitanti.

Fisica dell'atmosfera

Collocata all'interno del vortice polare che regola la circolazione stratosferica, Concordia è uno dei siti ideali per lo studio dell'evoluzione del "buco dell'ozono". Inoltre, i dati rilevati a Concordia (in connessione con le osservazioni meteorologiche e gli studi di fisica dell'atmosfera effettuati nelle stazioni costiere), essendo raccolti in un sito chiave per il monitoraggio e lo studio della struttura e della circolazione nella bassa atmosfera (troposfera), colmano un vuoto nella rete di osservatori che si occupano di monitorare il clima del nostro pianeta e i cambiamenti globali in atto. Sono stati installati anche strumenti per lo studio della circolazione dei venti catabatici.

Sismologia e Geomagnetismo

Molto distante dagli altri osservatori e lontana dalle perturbazioni marine, Concordia è un sito perfetto per il monitoraggio remoto e lo studio dei sismi e delle variazioni del campo magnetico terrestre, anche in questo caso colmando una lacuna nella rete di monitoraggio dell'intero pianeta.

Astronomia e astrofisica

Per la sua elevata altitudine e le caratteristiche dell'atmosfera (basse temperatura e umidità assoluta, precipitazioni ridottissime, scarsa turbolenza) Concordia è un sito ideale per osservazioni astronomiche e studi di cosmologia, nonché per studi sull'alta atmosfera e la meteorologia spaziale. Nel campo dell'astrofisica e della cosmologia sono particolarmente favorevoli le osservazioni nelle frequenze dell'infrarosso e del millimetrico/submillimetrico. Concordia è una località privilegiata anche per la raccolta di micrometeoriti, polveri di origine extraterrestre: sul nostro pianeta ne cadrebbero fra 15.000 e 20.000 tonnellate all'anno che, in gran parte, verrebbero sepolte dalle nevi antartiche e inglobate nella calotta.

Glaciologia, paleoclima e chimica dell'atmosfera

La stazione è collocata su una coltre di ghiaccio dello spessore di 3300 m, che offre grandi opportunità non solo per studi paleoclimatici, ma anche sulla dinamica della calotta e la sua stabilità. Inoltre, le condizioni uniformi e incontaminate ne fanno un luogo ideale per la verifica a terra e la calibratura delle osservazioni da satellite, nonché per misure di contaminazione chimica in un sito remoto e ancora vergine. Nel Dicembre 2004 si è conclusa con successo la perforazione profonda in ghiaccio del programma EPICA (v. scheda) che, alla base, ha prelevato il ghiaccio più antico finora raggiunto con una perforazione.

Per lo studio della storia climatica recente, per la valutazione del tasso di accumulo annuo della neve e per lo studio dei processi di scambio chimico neve-atmosfera, sono state eseguite numerose perforazioni e trincee superficiali ed è stata sistematicamente campionata la neve appena deposta.

Misure geodetiche delle deformazioni e degli spostamenti del duomo di ghiaccio (dell'entità di alcuni millimetri all'anno) sono state eseguite su una rete di paline impiantate attorno a Dome C.

Sono state condotte campagne a terra e da aereo nell'area tra Dome C e Vostok per lo studio dello spessore e della struttura interna della calotta, per la definizione della morfologia del substrato roccioso, per l'individuazione di laghi e del sistema di corsi d'acqua subglaciali.

Laghi subglaciali

Confinati sotto la calotta, sono stati identificati numerosi laghi d'acqua dolce, uno dei quali, il Lago Concordia (50 km di lunghezza per 25 km di larghezza), è (dopo quello di Vostok) il secondo lago subglaciale dell'intero continente; i laghi potrebbero ospitare forme di vita simili a quelle potenzialmente presenti su altri corpi celesti del sistema solare, come Europa e Callisto, due dei satelliti di Giove.

Conclusa la complessa e impegnativa perforazione del programma EPICA, Concordia si apre ora a nuove ricerche, coinvolgendo risorse e programmi nazionali e internazionali, per sfruttare appieno le opportunità che le condizioni ambientali eccezionali e, per alcuni aspetti, uniche sulla Terra offrono alla ricerca scientifica.



International Trans-Antarctic Scientific Expedition (ITASE)

Attraverso lo sforzo coordinato di numerosi programmi di ricerca nazionali e multinazionali, il progetto ITASE ha lo scopo di raccogliere ed interpretare informazioni climatiche e ambientali nelle aree più remote e sconosciute del continente. Le attività del progetto ITASE sono multidisciplinari e comprendono essenzialmente perforazioni della neve/nevato, rilievi geofisici, raccolta di campioni di neve (in superficie e in trincee), campioni di aria (a varie quote) e misure delle proprietà fisiche dell'atmosfera; i dati e i campioni vengono raccolti e archiviati utilizzando laboratori mobili di ricerca, montati su slitte e trainati da veicoli cingolati. In gergo polare queste carovane sono chiamate traverse: la carovana italiana è formata da 4 veicoli cingolati che trainano 5 moduli montati su slitte (modulo abitazione, modulo generazione ed officina, modulo perforazione, modulo magazzino) e tre cisterne di carburante.

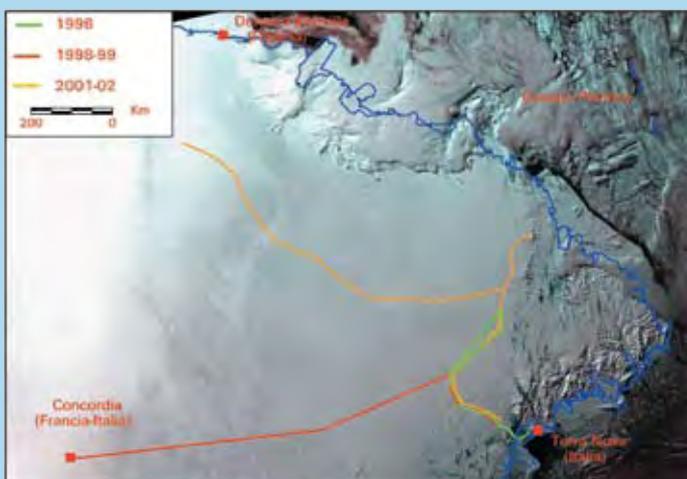
L'obiettivo principale del progetto ITASE è di determinare la variabilità spaziale del clima in Antartide (precipitazione nevosa, temperatura dell'aria, circolazione atmosferica) negli ultimi 200 anni e, dove possibile, negli ultimi 1000 anni. Di particolare interesse risultano le interazioni con fenomeni di interesse globale come El Niño.

Le informazioni scientifiche raccolte nell'ambito di ITASE sono essenziali per interpretare i dati derivanti dalle perforazioni profonde (per esempio EPICA), per monitorare le condizioni climatiche e la composizione dell'atmosfera nelle aree più remote del continente, per valutare l'attuale contributo dell'Antartide alle variazioni del livello del mare e per interpretare i dati telerilevati da satellite. Le attività scientifiche si svolgono lungo transetti che congiungono le basi costiere con i siti più remoti dell'interno del continente, sede anche di perforazioni profonde (EPICA Dome C e Dronning Maud Land, Vostok, Dome Fuji ecc.).

Al programma di traverse nazionali o multinazionali hanno partecipato 20 nazioni (Argentina, Australia, Belgio, Brasile, Canada, Cile, Cina, Francia, Germania, Giappone, India, Italia, Norvegia, Nuova Zelanda, Olanda, Regno Unito, Russia, Svezia, Sud Corea, USA). Finora il progetto ITASE ha raccolto oltre 20.000 km di stratigrafie della superficie nevosa, ha perforato più di 240 carote di neve e ghiaccio (per un totale di oltre 7.000 m), ha esplorato parte delle aree più remote del continente antartico raggiungendo la culminazione della calotta Orientale a più di 4.000 metri di quota, ha raccolto campioni di atmosfera fino a quote superiori a 20.000 m.

Il PNRA ha iniziato le sue attività di ricerca nell'ambito del progetto ITASE durante la IX spedizione (1993-94). In quella occasione venne esplorata la possibilità di accedere con mezzi cingolati alla calotta antartica dalla stazione Mario Zucchelli, percorrendo circa 270 km in un'area estremamente pericolosa a causa dei crepacci. Nel 1996-97 sono stati esplorati circa 600 km di calotta raggiungendo la culminazione di Talos Dome, dove è stata effettuata una prima perforazione di 90 m in neve e ghiaccio. Durante le campagne 1997-98 e 1998-99 è stata esplorata la calotta est-antartica fino alla culminazione di Dome C, percorrendo circa 1300 km. Nella campagna 2001-02 sono state esplorate le Terre di Adelie, Oates e Vittoria.

I dati raccolti dai ricercatori italiani hanno permesso per la prima volta di esplorare un'area di un milione di km² (circa 3 volte la superficie dell'Italia) e di determinare le caratteristiche climatico-ambientali degli ultimi 200-800 anni dell'area di drenaggio nord-occidentale di Dome C. Fra i risultati più significativi possiamo citare: la ricostruzione paleoclimatica degli ultimi 800 anni nel sito di Talos Dome, la scoperta e lo studio di "megadune" di ghiaccio (ondulazioni di dimensioni chilometriche della superficie glaciale) che gettano nuova luce sui processi di accumulo nevoso, lo studio dei processi di sublimazione indotti dai venti catabatici, lo studio del contributo dell'Antartide alle presenti e future variazioni del livello del mare, la ricostruzione della distribuzione geografica dell'accumulo nevoso, la scoperta della mobilità dei duomi e delle linee spartighiaccio dovuta a fenomeni di accumulo nevoso e la ricostruzione della struttura geologica del bacino subglaciale di Wilkes.





European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA)

EPICA è un programma di ricerca pluriennale, finanziato dall'Unione Europea (UE) e da 10 stati europei, per effettuare due perforazioni profonde nei ghiacci antartici, la prima a Dome C (DC), nel settore della calotta rivolto verso l'Oceano Pacifico, la seconda nella Dronning Maud Land (DML), in quello prospiciente l'Oceano Atlantico.

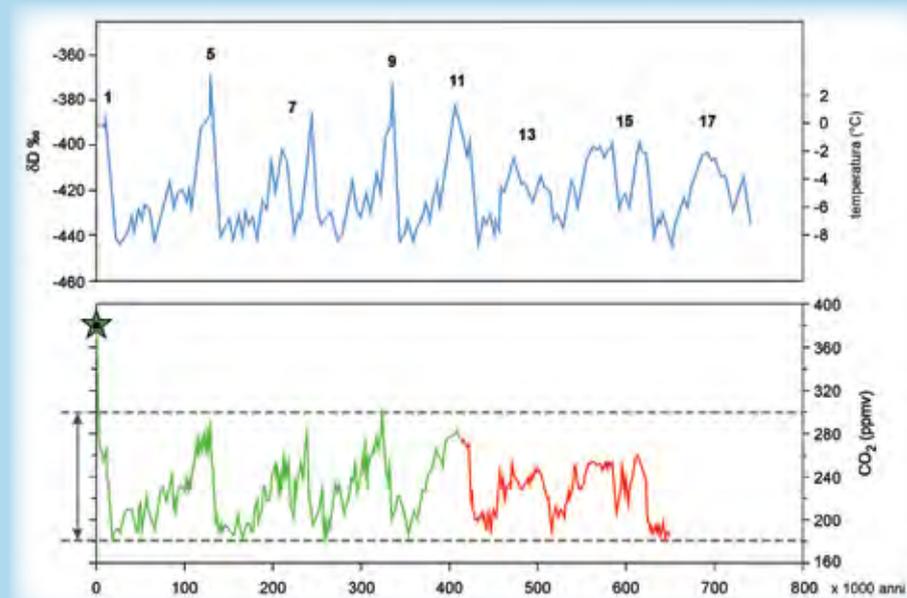
Preceduta da una campagna di indagini geofisiche - condotte dagli italiani - per la scelta del sito e per la valutazione dello spessore del ghiaccio, la perforazione a Dome C è iniziata nel dicembre 1996 e si è conclusa nel dicembre 2004 alla profondità di 3270 metri. Italia e Francia, dalle cui stazioni costiere partivano i rifornimenti per la perforazione EPICA e per la costruzione di Concordia, hanno svolto un ruolo logistico e scientifico preponderante.

I risultati scientifici della perforazione a Dome C, già pubblicati in parte su prestigiose riviste internazionali, rappresentano un progresso importantissimo nello studio delle variazioni climatiche nel passato perchè risalgono due volte più lontano nel tempo rispetto alle conoscenze precedenti.

Le carote di ghiaccio estratte da Dome C rappresentano un archivio climatico degli ultimi 800.000 anni almeno: nell'arco di questo periodo si sono succeduti 9 principali cicli climatici glaciali/interglaciali, innescati dalle variazioni di insolazione dovute a cause astronomiche. I quattro cicli più recenti erano già noti dagli studi sulle carote di ghiaccio di Vostok, mentre i precedenti erano conosciuti solamente dagli studi sui sedimenti oceanici, che riflettono più che la storia dell'atmosfera e del clima, quella degli oceani e dei ghiacciai. EPICA-DC ha permesso di documentare un cambiamento nella variabilità climatica intorno a 430.000 anni fa: a quell'epoca, si è passati da cicli con interglaciali poco caldi e di lunga durata a cicli con interglaciali molto caldi e di breve durata.

Gli studi sulle carote di EPICA-DC, a cui hanno contribuito significativamente i ricercatori italiani, hanno inoltre mostrato che le variazioni climatiche di più breve durata (circa un millennio), che iniziano e terminano bruscamente, sono rilevabili anche nell'emisfero meridionale, anche se più attenuate e quasi in opposizione di fase rispetto a quelle dell'emisfero settentrionale. Sembra che - nel sistema climatico - sia esistita una sorta di "altalena polare": quando l'emisfero meridionale si raffreddava, quello settentrionale si riscaldava e viceversa, a causa di un trasferimento del calore da un emisfero all'altro, tramite le correnti oceaniche termoaline.

La perforazione EPICA-DML, iniziata nel 2000, si è conclusa nel corso della campagna 2005-06 alla profondità di 2774 m e riguarda la storia climatica degli ultimi 150.000 anni circa, ricostruita con maggiore dettaglio, a causa del maggiore accumulo annuo di neve, rispetto a EPICA-DC. Obiettivo di questa perforazione è un più accurato confronto con la storia climatica ricostruita all'altra estremità dell'Atlantico, nei ghiacci della Groenlandia.



La perforazione EPICA DC ha campionato in continuità ghiaccio formatosi a partire da oltre 800 mila anni fino al presente. Le analisi fin qui condotte hanno mostrato che la temperatura media annua (curva azzurra) negli ultimi 750 mila anni è ciclicamente variata da condizioni "calde" (interglaciali, numerati con numeri dispari) a condizioni molto fredde (glaciali). Ogni ciclo climatico ha avuto una durata di circa 100 mila anni ma, mentre i tre più antichi hanno avuto interglaciali meno caldi e più lunghi (13,15,17), gli ultimi quattro cicli hanno avuto interglaciali più caldi e di breve durata (5,7,9,11). Il presente interglaciale (1), ancora in corso, è un poco meno caldo dei precedenti e dura da circa 12 mila anni. Mostra analogie con l'interglaciale 11 che è durato oltre 20 mila anni.

La curva sottostante mostra la variazione di CO₂ da 650 mila anni al presente: in rosso i dati della perforazione EPICA DC, in verde quelli della perforazione Vostok. Il biossido di carbonio in questo intervallo di tempo è variato in fase e proporzionalmente alle variazioni di temperatura, con valori minimi di 180 ppmv (parti per milione in volume) nelle fasi glaciali più fredde, e valori massimi di 300 ppmv nelle fasi interglaciali più calde. Le linee tratteggiate e la doppia freccia indicano il campo naturale di variabilità di questo gas-serra. Negli ultimi due secoli, a causa delle attività umane, in primo luogo tutti i processi di combustione, il valore di CO₂ è salito a 380 ppmv (2006), ben al di sopra del limite naturale di variabilità, con un aumento di oltre il 35%.



Un osservatorio privilegiato della contaminazione ambientale globale

L'Antartide è un'area geografica privilegiata per monitorare lo stato dell'ambiente dell'intero pianeta, per studiare i processi di trasporto e diffusione di sostanze chimiche a livello globale e per valutarne le possibili correlazioni con i cambiamenti climatici. La lettura della "registrazione" delle variazioni della composizione chimica dell'atmosfera negli strati di neve e ghiaccio accumulati nel corso degli anni e lo studio delle interazioni ghiaccio/acqua/atmosfera, fanno di questo continente il luogo ideale per lo sviluppo e l'applicazione di una nuova disciplina, denominata *polar chemistry*, che si è affermata nella comunità scientifica internazionale impegnata nelle ricerche in Antartide, grazie al continuo e consistente impegno del PNRA.

La contaminazione ambientale

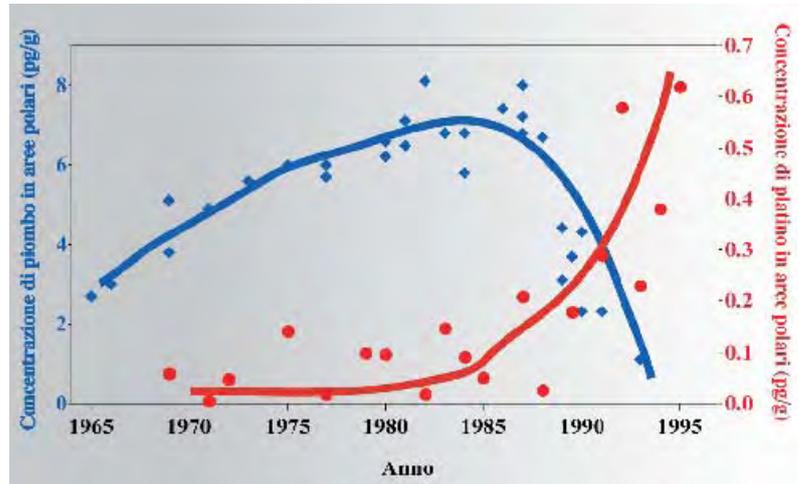
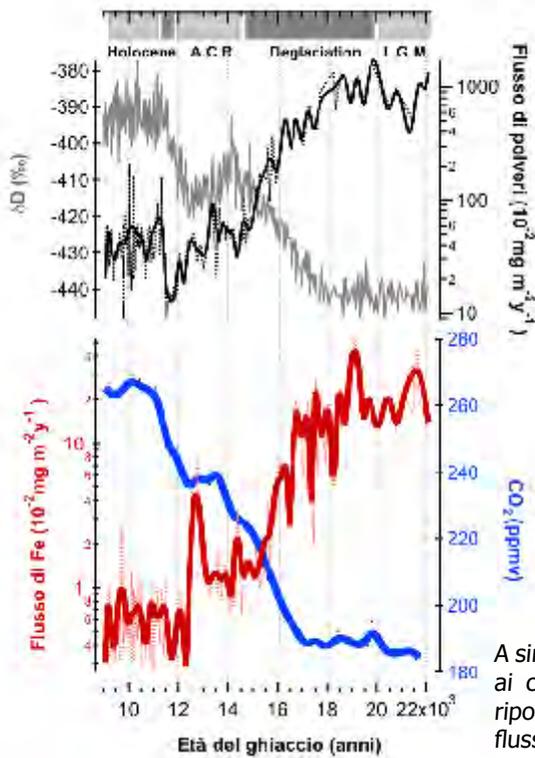
Sulla base dei dati oggi disponibili, siamo in grado di costruire una carta dettagliata della contaminazione ambientale di una vasta area del continente bianco, relativamente a varie classi di inquinanti, di composti organici solforati, di sostanze umiche, di numerosi metalli pesanti e micronutrienti e di radionuclidi.

Alcuni dei risultati più significativi hanno permesso di evidenziare aspetti di notevole interesse a livello globale, come ad esempio:

- la recente diminuzione del piombo nel nevato e nei ghiacci rilevato per la prima volta in Antartide, correlabile con l'introduzione delle benzine verdi; e la tendenza all'aumento dei metalli del gruppo del platino e degli idrocarburi policiclici aromatici (PAH) nelle nevi superficiali, evidenza negativa dell'impiego delle marmitte catalitiche;
- l'appiattimento della curva di crescita dei clorofluorocarburi (CFC) nell'atmosfera, osservata negli ultimi anni, correlabile alle limitazioni imposte a livello internazionale all'uso di questi composti;
- la variazione stagionale del contenuto di metalli (tossici ed essenziali) nelle acque marine, che può contribuire ad una migliore comprensione degli effetti dei cambiamenti climatici;
- l'apporto di polveri cosmiche sulla Terra e la loro influenza sul ciclo dell'ozono e sul clima.



Campionamento di neve in trincea per l'analisi di micro-inquinanti



Sopra: Variazioni nelle concentrazioni di piombo e platino in aree polari. Alla diminuzione del contenuto di piombo dalla metà degli anni '80, dovuto all'introduzione delle benzine verdi si contrappone l'incremento del platino, dovuto all'introduzione della marmitta catalitica.

A sinistra: Variazioni nel flusso di ferro (rosso) nel continente antartico in relazione ai cambiamenti di CO_2 (blu) intrappolata nel ghiaccio. Contestualmente sono riportate le variazioni di temperatura, evidenziate dal parametro δD (grigio), e del flusso di polveri cristalline (nero)

I processi di scambio tra atmosfera e oceano

Nell'ambito delle indagini riguardanti i cambiamenti globali, sono stati studiati i processi di scambio tra atmosfera e superficie del mare ed il ruolo giocato dal microstrato superficiale marino nei meccanismi di formazione dell'aerosol marino, un vettore primario di diffusione e trasporto a livello globale degli inquinanti.

È stato evidenziato che il microstrato superficiale marino, prelevato mediante un prototipo di sistema di campionamento, realizzato nell'ambito del PNRA, è caratterizzato da un contenuto di varie classi di microinquinanti organici, sino a centomila volte superiore rispetto all'acqua di mare sottostante.

L'analisi chimica delle carote di ghiaccio ha consentito di studiare le variazioni nella produttività oceanica nel corso delle ere passate, mediante la ricostruzione dell'*input* atmosferico di ferro e di altri elementi chimici bioessenziali. Le variazioni nell'*input* oceanico di questi elementi influenzano sensibilmente i cambiamenti climatici.

I risultati più significativi hanno permesso di evidenziare processi di notevole interesse a livello globale, come ad esempio:

- la variazione stagionale del contenuto di composti organici solforati nelle acque marine, che contribuisce ad una migliore comprensione dei meccanismi che regolano i cambiamenti climatici;
- la distribuzione di microinquinanti organici tra acque subsuperficiali, microstrato ed aerosol, che ha permesso di chiarire i processi di scambio acqua-atmosfera ed il trasporto di microcomponenti attraverso l'aerosol marino.

I materiali di riferimento e la banca campioni

Di rilievo è stata anche la preparazione di materiali di riferimento certificati antartici ottenuti mediante circuiti internazionali. I materiali già prodotti sono attualmente distribuiti in Italia dall'ENEA, dall'Istituto Superiore di Sanità, e da due prestigiose istituzioni internazionali: l'IRMM della Comunità Europea ed il NIST degli USA.

La realizzazione della Banca Campioni Ambientali Antartici (BCAA) rappresenta già oggi uno strumento unico a livello mondiale per la verifica, anche retrospettiva, della validità dei dati sperimentali acquisiti e consentirà in futuro di indagare su nuove problematiche che dovessero emergere con l'evoluzione delle conoscenze scientifiche.

Il contributo alla gestione politica dell'ambiente

In conclusione, si può affermare che l'Italia, attraverso queste ricerche, non solo consolida il proprio prestigio internazionale nel settore della *polar chemistry*, ma soprattutto porta un decisivo contributo allo sviluppo delle nuove politiche ambientali, fornendo i valori di riferimento della contaminazione a livello planetario ed assume un ruolo di *leadership* e di stimolo per gli altri paesi ad avviare analoghi progetti che, integrandosi a questo, consentano di affrontare al meglio le sfide dei prossimi anni per una sempre più efficace salvaguardia dell'ambiente.



I primi osservatori atmosferici

Le prime spedizioni avevano il compito di caratterizzare la climatologia dell'area di Baia Terra Nova, dove si stava sviluppando la stazione italiana. Inizialmente venne utilizzata strumentazione meteorologica convenzionale (temperatura, pressione, umidità, vento, precipitazioni, flusso radiativo). In aggiunta si realizzarono lanci di palloni sonda. Più tecnologicamente raffinato era invece il sistema di sondaggio acustico per la misura del vento (Sodar Doppler).

Già dai primi anni si iniziò la progettazione e la graduale realizzazione dei Lidar troposferici più semplici, adatti alla misura della trasparenza atmosferica nei bassi strati, necessari per la valutazione del bilancio energetico. Venne sviluppato anche un sistema Lidar con caratteristiche più avanzate, idoneo alla misura di aerosol troposferici e successivamente di ozono.

Parallelamente, si avviarono contatti con la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration, USA*) e la NSF (*National Science Foundation, USA*) per l'installazione di un Lidar presso la stazione americana Amundsen Scott, ove ne sarebbe stato garantito il funzionamento anche nel periodo invernale. A Baia Terra Nova, vennero altresì installati un Sodar triassiale e una rete di sensori meteorologici automatici per fornire la stazione di un nucleo strumentale di base.

Alla fine del 1993 il *network* di osservatori atmosferici era ormai maturo. La rete meteorologica di Baia

Terra Nova consta oggi di 12 stazioni automatiche collocate in un raggio di 150 km di distanza dalla stazione Mario Zucchelli, che rappresentano le strutture portanti del laboratorio climatologico la cui utilità non è solo scientifica, ma anche legata alla sicurezza delle operazioni logistiche attorno alla base italiana.



Sodar triassiale per lo studio della dinamica dello strato limite

Il moderno sistema integrato di osservatori polari

Le misure di radiazione e di trasparenza, i dati meteorologici e i sondaggi Lidar, inizialmente solo troposferici, hanno costituito il nucleo portante delle ricerche atmosferiche in Antartide, integrato e sviluppato dal punto di vista tecnologico nel corso degli anni. Oggi, il *network* di osservatori internazionali del PNRA include anche una collaborazione con l'Argentina per misure in continuo del contenuto colonnare di ozono e di anidride carbonica (stazioni di Jubany, Belgrano II e Ushuaia), nell'ambito di programmi internazionali quali il *Global Atmospheric Watch*, della WMO. Sono state recentemente sviluppate nuove metodologie di interpretazione dei dati da satellite sulle caratteristiche delle nubi, in relazione alla possibilità di previsione e di caratterizzazione degli eventi atmosferici.

Una nube lenticolare



L'ultimo quinquennio del PNRA è stato caratterizzato dalla sempre più ampia integrazione delle attività verso grandi *network* di osservatori o piattaforme integrate ed il relativo perfezionamento della strumentazione. Un esempio fra tanti è l'avvio del *network* di osservatori (POLAR-AOD) per la caratterizzazione degli effetti climatici dell'aerosol atmosferico nelle regioni polari attraverso fotometria multispettrale, ma va citata anche la nuova piattaforma strumentale integrata che si sta sviluppando a Concordia. La nuova installazione per i radiosondaggi, parte della rete di 15 stazioni al suolo e 2 stazioni di radiosondaggio, ha provocato richieste di dati, anche preliminari, da una decina di istituzioni di ricerca sparse per il mondo.

Un'ulteriore linea di tendenza è l'allargamento delle attività alle aree artiche in un approccio globale allo studio del clima, tendenza che sta trovando un particolare significato con l'avvio dell'Anno Polare Internazionale.

Gas serra e costituenti minori atmosferici

Con l'aumento della percezione del problema dei cambiamenti globali, anche le ricerche in atmosfera si sono orientate a studiare le modificazioni delle caratteristiche chimiche dovute all'immissione di sostanze di origine naturale ed antropiche ed ai loro processi di trasformazione. Le specie considerate, per la loro capacità di alterare il bilancio radiativo dell'atmosfera, sono quelle contenenti zolfo, azoto, le sostanze alogenate, fra cui i clorofluorocarburi ed i composti del bromo di interesse per la distruzione dell'ozono, e quelle organiche, fra cui gli aerosol

contenenti carbonio. Sono state messe a punto tecniche di campionamento per

le componenti in fase gassosa e particellare utilizzando i "denuders" e trappole specifiche per componenti organici in fase di vapore. Per la classificazione granulometrica degli aerosol è stato sviluppato un nuovo tipo di impattore a bassa pressione funzionante a fenditure. Durante i viaggi di trasferimento navale dall'Europa all'Antartide sono state effettuate misure in continuo di CO₂ ed altri gas serra, polveri, ed altri elementi di interesse per lo studio dei bilanci climatici in aree remote.



Uno sistema nuvoloso sul Mare di Ross di fronte alla Terra Vittoria ripreso dal satellite Landsat



Installazione di un palo attrezzato per la misura della dinamica dei primi metri dello strato limite; Hells Gate, Antartide

Radiazione e nubi

Nel campo dei bilanci di energia, lo studio dei vari costituenti atmosferici minori (gas e particelle) e la caratterizzazione delle particelle di aerosol e delle reciproche interazioni hanno contribuito a definire il flusso netto di radiazione solare alla superficie ed hanno portato nuove conoscenze relative al bilancio dell'energia solare negli ambienti polari. Studi effettuati su diversi siti antartici hanno permesso di valutare l'effetto delle nubi sul bilancio netto di radiazione, mostrando, in presenza di nubi, un riscaldamento o un raffreddamento della superficie fortemente dipendente dalle caratteristiche fisiche (albedo e trasmissività) della superficie e dell'atmosfera. Accanto ad essi si collocano le ricerche sulla distribuzione, le proprietà ottiche e la microfisica delle nubi e lo studio degli aerosol, la cui presenza può essere messa in evidenza da misure di torbidità atmosferica, e la cui natura viene invece determinata attraverso analisi eseguite su campioni di particolato raccolti con tecniche diverse.

Un argomento originale, che si sta sviluppando anche grazie a strumentazione d'avanguardia, è lo studio del ruolo della neve come reattore nella chimica dei composti dell'azoto e la distribuzione latitudinale degli aerosol nello strato limite marino mediante Lidar troposferici in

area oceanica. A partire dal 2000, infatti, lungo l'intera rotta della nave dall'Italia, sono state eseguite misure in continuo degli aerosol dello strato limite marino mediante Lidar a *backscattering* elastico multispettrale e *scanning mobility particle sizer*.

Lo strato limite planetario

Le ricerche sullo stato limite planetario rivestono notevole importanza per caratterizzare la fenomenologia meteorologica e la microclimatologia nella zona di Baia Terra Nova. Strettamente collegata alle ricerche sullo strato limite planetario è, infatti, l'attività meteorologica, finalizzata alla descrizione della dinamica atmosferica a varie scale.

Una rete di Sodar è in attività per lo studio dello strato limite, consentendo un grande sviluppo delle ricerche nel campo del bilancio di radiazione e del contenuto colonnare di ozono e costituenti minori. Queste linee di attività aprono nuove opportunità per approfondire le conoscenze sul sistema climatico antartico, ed in particolare sul ruolo e sulle caratteristiche degli aerosol nei bilanci di radiazione, dei processi turbolenti allo strato limite, della dinamica a scala regionale e continentale, delle modificazioni nella composizione dell'atmosfera.

Le misure di turbolenza al suolo, associate allo sviluppo di modelli numerici, hanno permesso recentemente di quantificare i flussi di calore e le quantità di moto nello strato limite atmosferico.

La deplezione dello strato di ozono

Lo sviluppo di Lidar ha permesso di studiare le nubi stratosferiche polari, ritenute i catalizzatori del processo di distruzione stagionale dell'ozono stratosferico nei vortici polari. Per affrontare questo avvincente tema di ricerca, si è operato nell'ambito di un *network* internazionale a grande scala, legato a grandi progetti internazionali (*experimental cloud lidar pilot study*, ECLIPS). Misure coordinate di nubi stratosferiche polari sono state eseguite con Lidar Ozono (Dumont d'Urville), osservazioni Lidar di aerosol stratosferici e di nubi stratosferiche polari (South Pole) e con l'associazione di Lidar e palloni (McMurdo). In particolare, i palloni hanno permesso di sondare le nubi per studiare i cristalli di ghiaccio che determinano le reazioni di chimica eterogenea.

Le osservazioni sulla concentrazione dei clorofluorocarburi (CFC), responsabili della deplezione dell'ozono, hanno messo in evidenza che la diminuzione delle concentrazioni dei CFC è in realtà meno rilevante di quanto ci si aspettasse dopo l'entrata in vigore del Protocollo di Montreal, che regola la produzione di questi composti. Più recentemente, la ricerca è stata allargata ai sostituti dei CFC, anch'essi potenti gas serra, le cui concentrazioni sono invece in aumento.



Airborne Polar Experiment (APE)

Nel 1993 nacque il progetto *Airborne Polar Experiment*, programma ufficiale della Fondazione Europea per la Scienza con la diretta partecipazione, oltre ad Italia e Russia in posizione di *leadership*, di Svizzera, Germania, Finlandia, Svezia, Norvegia e Regno Unito (co-finanziamenti dell'ASI e della Commissione Europea). La disponibilità per usi scientifici dell'aereo di alta quota *M-55 Geophysica* ha consentito l'avvio di studi fondamentali nel campo della climatologia dell'ozono stratosferico in Antartide: nel 1999, la missione APE-GAIA (*Airborne Polar Experiment - Geophysica Aircraft In Antarctica*) ha affrontato lo studio della fase di rigenerazione dell'ozono, volando direttamente dentro il vortice dell'Antartide.





L'Oceano Antartico



Il ruolo dell'Oceano Antartico

L'Oceano Antartico svolge un ruolo di primo piano nella regolazione del clima a scala globale. E' il motore della circolazione oceanica del pianeta e interagisce direttamente sulla circolazione atmosferica, sulla formazione e sulla fusione dei ghiacci antartici. Inoltre, la crescita e l'evoluzione del ghiaccio marino hanno una profonda influenza sull'albedo (quantità di energia solare riflessa nell'atmosfera) e sul bilancio radiativo del pianeta e quindi sul bilancio termico globale.

Il duraturo abbassamento della temperatura durante il periodo invernale determina il congelamento di vasti porzioni dell'Oceano Antartico - una dei più grandiosi processi della Terra.

Il ghiaccio marino copre il 7% della superficie di tutti gli oceani. Nell'Oceano Antartico, durante la stagione invernale, la superficie del mare viene coperta da un sottile strato di 2 - 3 metri che si estende per 20 milioni di km² (una superficie superiore a quella dell'intero continente antartico) spingendosi fino a 55 - 60° di latitudine sud. Nel periodo estivo la banchisa si riduce a 4 milioni di km², pertanto la maggior parte del ghiaccio marino non supera 1 anno di età. Questo è uno dei processi che guida la produzione di acque fredde che alimentano la circolazione termoalina profonda nota come *conveyor belt* e che ridistribuisce calore, nutrienti ed ossigeno a scala globale.

La Corrente Circumpolare Antartica, la più imponente dell'intero pianeta con un trasporto medio di 120 - 140 Sverdrup (1 Sv = 1 milione di m³/s) è costituita da un complesso sistema di flussi ad elevata sinuosità ed è originata dai venti incessanti provenienti da Ovest, dalle notevoli differenze di densità delle diverse masse d'acqua presenti nell'Oceano Antartico, nonché dalla topografia del fondo oceanico.

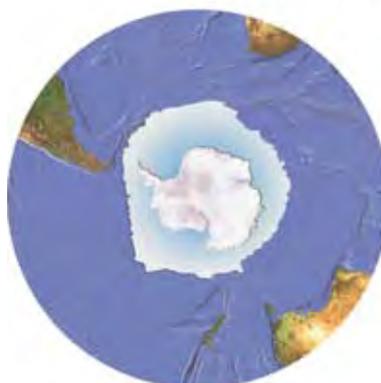
Il ruolo di questa corrente sul sistema climatico globale è di fondamentale importanza in termini di scambi di energia tra le fredde acque antartiche e quelle calde delle latitudini più elevate, di trasferimento delle sostanze chimiche e delle specie biologiche consentendo all'ecosistema antartico di mantenere le sue peculiari caratteristiche uniche sul nostro pianeta.

Gli scambi energetici con l'atmosfera avvengono, in particolare, in corrispondenza di aree frontali, cioè aree di contatto tra masse d'acqua a diversa temperatura e salinità, che caratterizzano l'Oceano Antartico, attivando movimenti verticali che assicurano il rinnovo continuo dei contenuti di ossigeno e garantendo un ambiente favorevole alla vita anche nelle fredde acque antartiche.

Di particolare rilievo in questo quadro è la zona frontale polare limitata a sud dal fronte polare e a nord dal fronte subantartico. Questa zona è fortemente variabile nel tempo e nello spazio con ondulazioni di lunghezze comprese tra 100 e 250 km.



Estensione del ghiaccio marino



luglio/agoosto



gennaio/febbraio

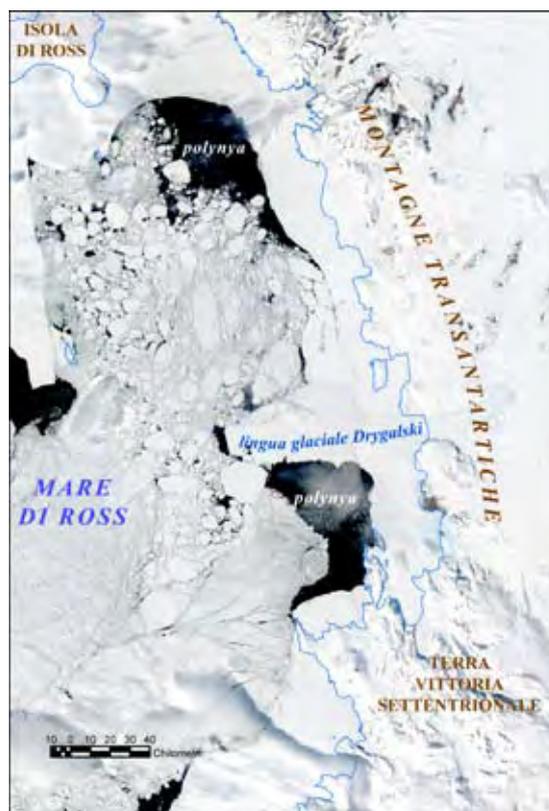
Gli obiettivi della ricerca oceanografica

Nel periodo 1986-1993, la ricerca oceanografica italiana era finalizzata alla prima caratterizzazione delle acque marine di Baia di Terra Nova. Nelle prime campagne oceanografiche stagionali è stato costituito un patrimonio strumentale ed acquisita un'esperienza basilare per l'impostazione delle successive ricerche estese a porzioni rilevanti dell'Oceano Antartico. Le successive ricerche (6 campagne oceanografiche e 7 *mooring* posizionati) sono state rivolte a identificare, quantificare e localizzare la formazione e la diffusione dei diversi tipi di masse d'acqua che si producono sulla piattaforma del Mare di Ross, a valutarne i tempi di residenza e a caratterizzarle anche in termini dei flussi biogeochimici. E' stato, inoltre, studiato il bilancio radiativo del Mare di Ross ed analizzata la variabilità spazio-temporale della corrente circumpolare antartica nel settore Pacifico dell'Oceano Antartico.

12 anni di sezioni ottenute con lanci a distanza ravvicinata di sonde a perdita di temperatura denominate XBT, ripetute per ogni traversata tra la Nuova Zelanda e il Mare di Ross, hanno consentito di delineare la struttura termica dell'oceano con i relativi fronti che caratterizzano le oscillazioni dell'intero sistema antartico. E' risultata una maggiore stabilità del fronte polare, mentre il fronte subantartico si divide in due distinti rami intorno a 58°S innescando vortici e meandri che regolano i flussi meridionali di calore e altre proprietà.

Processi di *polynya*

Un aspetto di particolare importanza nella dinamica dell'Oceano Antartico è rappresentato dai processi di *polynya* (aree perennemente deglacciate per l'azione dei venti catabatici che spazzano la superficie del mare allontanando il ghiaccio in formazione). L'idrodinamica verticale di queste aree è particolarmente complessa, ma fondamentale per la formazione di acque salate che caratterizzano la piattaforma continentale del settore occidentale. Nell'area di Baia Terra Nova è stata calcolata la produzione annuale di ghiaccio espressa in spessore per un valore compreso tra 11 e 22 metri. Dalla produzione di ghiaccio si ottiene un valore medio di produzione di acqua ad elevata salinità (HSSW) pari a 0.4 Sverdrup. Gli aspetti ecologici della *polynya* sono condizionati dalla elevata variabilità dei flussi di particellato, documentata dai campionamenti delle trappole posizionate lungo la catena di strumenti ancorata sul fondo.



Polynye costiere a calore latente lungo la Terra Vittoria da una immagine da satellite in periodo invernale

La formazione di correnti fredde

Il ruolo del bilancio radiativo è di estrema importanza in un ambiente a forte interazione aria – mare – ghiaccio; i ricercatori italiani hanno calcolato i valori settimanali medi sull'intero Mare di Ross (a partire dal 1994) di tutti i componenti del *budget* totale di calore alla superficie. Esso varia da -87 W/m^2 a -102 W/m^2 con un valore medio di -96 W/m^2 , che può essere considerato come riferimento per la perdita di calore alla superficie. Questa perdita può essere compensata soltanto dal trasporto di calore che avviene con le correnti marine profonde e con i processi di mescolamento (*mixing*) in zone di scarpata tra le acque di piattaforma e la Corrente Circumpolare Antartica, quando questa s'insinua sulla piattaforma continentale.

Questo flusso di CDW (*Circumpolar Deep Water*) che deve penetrare nell'area di piattaforma per compensare la perdita di calore nel *budget* globale è stato valutato dai ricercatori italiani ottenendo un trasporto medio di 2.9 Sverdrup.

Le acque della piattaforma

Le acque di piattaforma, ricche di ossigeno, interagiscono con la corrente circumpolare attraverso delicati meccanismi di convezione, a piccola scala, che sono ancora oggetto di studio nell'ambito di progetti internazionali che coinvolgono anche i ricercatori italiani.

In questo contesto, la stima della distribuzione non solo dei parametri chimici tradizionali, come l'O₂ ed i nutrienti, ma anche di micronutrienti e di traccianti conservativi come i clorofluorocarburi CFC11 è di cruciale importanza. Le variazioni della concentrazione di tali parametri negli strati intermedi e profondi della colonna d'acqua sono strettamente collegati con i processi di produzione e di mescolamento (*mixing*) delle masse d'acqua. Pertanto, la concentrazione in acqua di mare è stata utilizzata per valutare il tempo di residenza delle acque di piattaforma, che oscilla tra 3 e 6 anni (prima che queste trasformino le proprie caratteristiche mescolandosi con le acque del vortice di Ross che lambiscono la scarpata continentale). Inoltre, le concentrazioni misurate a partire dal 2001 hanno consentito di determinare il periodo di esposizione all'atmosfera delle acque della CDW presente all'epoca della misura. Tale ventilazione risale ad un periodo compreso tra il 1973 ed il 1979 cioè a circa 22-28 anni prima.



a) Circolazione delle acque intermedie e profonde nel settore occidentale del Mare di Ross; b) Schema di flusso di caduta delle acque di piattaforma in prossimità di Capo Adare

Produzione primaria e sottrazione di CO₂

Misure dirette in continuo di pCO₂ hanno fornito una prima quantificazione dell'entità di sottrazione di CO₂ atmosferica da parte del Mare di Ross, particolarmente intensa in concomitanza con la fioritura stagionale del fitoplancton.

Per evidenziare il ruolo del plancton nei flussi di carbonio è stata raccolta un'ampia mole di dati di tutte le componenti planctoniche (e della relativa attività), consentendo in tal modo di evidenziare le principali traiettorie trofiche nelle differenti aree del Mare di Ross.

A dispetto di quanto genericamente affermato, i risultati più recenti hanno evidenziato che le acque oceaniche non sempre funzionano da *sink* di CO₂. Infatti in alcune aree prevalgono i processi di produzione fitoplanctonica (*sink* di CO₂) mentre in altre i processi respiratori (*source* di CO₂). Questo meccanismo sembra essere a macchia di leopardo modificando le precedenti ipotesi di comportamento uniforme dell'oceano.

Un oceano che cambia

Un mondo più riscaldato intensifica il ciclo idrologico: l'affondamento di acque dense superficiali rallenterebbe o cesserebbe del tutto, riducendo di conseguenza il trasporto di calore attraverso la circolazione termoalina così come la ventilazione del carbonio lungo la colonna d'acqua.

Questa preoccupazione è già stata messa in evidenza nel Mare di Ross, a Baia Terra Nova. I ricercatori italiani hanno documentato una progressiva desalinizzazione di queste acque, che sembra dovuta all'effetto di una combinazione di fattori quali l'aumento delle precipitazioni e la riduzione della produzione di ghiaccio nelle persistenti *polynya* costiere, a calore latente, della Terra Vittoria. Infatti, dal 1995 al 2005 si è riscontrato un evidente dolciificazione delle acque di fondo passando da 34.86 a 34.82 con una tendenza che sembra confermare questa dolciificazione.



La vita e l'adattamento degli organismi



Nella regione antartica esiste un enorme contrasto fra l'ecosistema terrestre e quello marino. La vita, per affermarsi nel continente, deve adattarsi a delle condizioni ambientali estremamente ostili: una superficie coperta quasi completamente da ghiaccio (circa il 98%), bassissime temperature, oscurità continua per sei mesi l'anno seguita da intensa e continua irradiazione solare nei restanti sei mesi, e conseguente grande escursione termica annua. Ma il principale ostacolo per la vita è l'estrema scarsità di acqua allo stato liquido o di vapore, dovuta anche all'azione del vento. Nell'ambiente marino, per la sua maggiore stabilità termica, abbondanza di ossigeno disciolto e disponibilità di nutrienti, la vita è caratterizzata da un numero limitato di specie presenti, però in abbondanza e costituisce una catena trofica semplificata e singolare. Un elemento fondamentale per l'ecosistema marino antartico è il ciclo annuale dei ghiacci marini che controlla la salinità, la luce e la produzione fitoplanctonica.

L'Italia è stata tra i primi paesi ad affrontare il grande tema della biodiversità in Antartide. Agli studi tradizionali di sistematica biologica si sono affiancati studi di genetica, biochimica, fisiologia ed ecologia, perseguiti anche con approcci molecolari. I progressi della conoscenza della biologia dell'Antartide si devono anche alla continua e rapidissima evoluzione tecnologica, e all'uso intensivo di tecniche d'avanguardia di biologia molecolare, genomica e proteomica. Sotto questo aspetto, la ricerca italiana ha avuto un ruolo trainante, ed il numero di nazioni che oggi puntano su questo tipo di indagini innovative è in continuo aumento.

Genetica delle popolazioni e biologia molecolare

Prendendo a modello il krill antartico, che occupa nell'ecosistema marino una posizione chiave, è stato evidenziato un differenziamento genetico debole ma significativo, in parte legato a barriere oceanografiche. Questi studi hanno consentito di comprendere l'effetto delle condizioni oceanografiche sul differenziamento genetico in un ambiente di enormi dimensioni caratterizzato da un sistema stabile di correnti circum-continentali. Differenziazioni genetiche sono state rilevate anche in numerose specie di crostacei e pesci.

Un contributo pionieristico è venuto dalle ricerche molecolari sull'origine e sulle relazioni delle diverse specie dei Nototenoioidei, sottordine largamente dominante tra i pesci antartici e, più in generale, dell'Oceano Meridionale. Queste ricerche si sono sviluppate in due direzioni: analisi del DNA mitocondriale (un frammento circolare di DNA





Il krill - specie chiave nella catena trofica antartica

Il krill, *Euphausia superba*, è la principale specie chiave della catena trofica antartica, capace di passare da un modello alimentare criopelagico (alghe simpagiche che vivono sotto il ghiaccio) in inverno-primavera (organismi giovanili) ad un modello pelagico in estate (adulti raggruppati in sciame), che coinvolge fitoplancton (diatomee) e zooplancton, fino ai consumatori di grande taglia. I risultati delle ricerche italiane hanno portato in questi anni un notevole contributo scientifico sia per l'identificazione e la quantificazione delle risorse di krill nel Mare di Ross (informazioni utili per la Commissione per la conservazione delle risorse marine viventi in Antartide - CCAMLR), sia per una migliore comprensione dei processi biogeochimici all'interno del ghiaccio marino di Baia Terra Nova, con particolare riferimento al ciclo vitale di *E. superba*, che è il più importante anello trofico tra la produzione primaria delle alghe simpagiche e la colonna d'acqua.



situato nel citoplasma, di origine matrilineare) e studio della struttura primaria dell'emoglobina, proteina adibita al trasporto dell'ossigeno nel sangue.

In entrambi i casi è stato possibile ricostruire le relazioni tra le diverse specie e stimarne i tempi di divergenza, mettendo in luce che l'evoluzione del sottordine si è realizzata soprattutto durante il graduale raffreddamento delle acque continentali avvenuto negli ultimi venti milioni di anni (dopo l'isolamento conseguente all'instaurarsi del Fronte Oceanico Antartico). Inoltre, nell'ambito delle ricerche citogenetiche, grazie a moderne tecniche molecolari quali FISH (*Fluorescence In Situ Hybridisation*), è stato possibile localizzare dei geni delle globine nei cromosomi dei pesci studiati. I Nototenoioidei possiedono caratteristiche uniche, che li rendono un modello eccezionale per lo studio degli adattamenti fisiologici e molecolari: in una delle otto famiglie, quella degli *icefish* - il sangue è incolore perché privo di emoglobina e la respirazione cellulare avviene mediante il trasporto fisico dell'ossigeno che vi si trova disciolto. La scoperta che nel genoma degli *icefish* è rimasto solo un frammento inattivo del gene che produceva l'emoglobina è dovuta a ricercatori italiani, così come lo studio del loro particolarissimo sistema cardiocircolatorio. Altri contributi rilevanti sono legati alla termodinamica ed alla catalisi di enzimi particolarmente importanti nell'adattamento del metabolismo al freddo.

Nello studio del sistema di trasporto dell'ossigeno gli italiani sono stati pionieri. In un numero elevato di organismi che popolano tutti gli ambienti della Terra, il trasporto dell'ossigeno nel sangue è affidato all'emoglobina, proteina sottoposta a una forte pressione evolutiva al fine di adattare le sue caratteristiche funzionali alle condizioni più estreme. La sua struttura tridimensionale tuttavia non può cambiare molto: sono consentite solo modificazioni nella sequenza di aminoacidi.

Nel corso di centinaia di milioni di anni questa molecola non ha dunque subito grandi cambiamenti e, proprio per questo, è stata scelta come modello per lo studio degli adattamenti molecolari ed evolutivi. Su questo tema la ricerca italiana ricopre attualmente un ruolo d'avanguardia nel panorama internazionale.

Dal punto di vista strutturale e funzionale sono state caratterizzate le emoglobine di quasi la metà delle specie delle sette famiglie a sangue rosso dei Nototenoioidei, alcune delle quali di mari temperati e sub-antartici (altre sono in corso di studio). Da questo punto di vista, il sottordine è il gruppo di pesci di gran lunga meglio conosciuto del pianeta. Di recente queste ricerche sono state estese anche ai pesci artici.

I risultati degli studi di evoluzione molecolare hanno mostrato che le condizioni fisico-chimiche costanti dell'Oceano Antartico si riflettono in un chiaro raggruppamento delle sequenze di aminoacidi delle emoglobine, mentre le variazioni tipiche dell'Oceano Artico hanno generato una dispersione evolutiva.

Infine, ricercatori italiani hanno analizzato il trasporto dell'ossigeno nell'apparato circolatorio anche in altri organismi marini che rimangono a lungo immersi: mammiferi (foche) ed uccelli tuffatori e migratori (pinguini e skua).

La vita nel ghiaccio marino

Il ghiaccio marino costituisce uno dei più estesi e complessi biota della Terra. Le comunità biologiche del ghiaccio marino sono una componente significativa degli ambienti polari. Taxa specializzati vivono sia al di sopra, sia al di sotto del ghiaccio, mentre una quantità di microrganismi come piccole alghe ed invertebrati, noti come organismi



simpagici, vivono all'interno del ghiaccio. Le ricerche svolte dai gruppi italiani, specialmente nell'ambito del progetto RossMIZE, hanno evidenziato che lo sviluppo delle comunità dentro il ghiaccio è dinamico e che queste comunità hanno una grande influenza sui vari livelli della rete alimentare oceanica. Per esempio, il krill, in inverno, si alimenta unicamente con le alghe del ghiaccio ed il suo ciclo vitale è strettamente connesso alla formazione, al mantenimento ed alla fusione del ghiaccio.

I sistemi biologici legati al ghiaccio marino forniscono un contributo di circa il 30 per cento alla produttività degli ecosistemi polari. E' stato, inoltre, osservato che una grande percentuale della produzione algale simpagica, costituita in gran parte da diatomee bentoniche, sedimenta rapidamente verso il fondo, creando un forte legame tra il ghiaccio marino e l'ambiente bentonico.

Lo studio e la quantificazione dei flussi energetici che si instaurano fra i biota della banchisa (mare solido) e l'oceano rivestono un ruolo fondamentale per la comprensione del ciclo del carbonio dell'intera regione antartica, al fine di definire il ruolo dell'Oceano Meridionale nei processi globali. I modelli più attuali hanno mostrato che l'Oceano Meridionale è l'elemento critico per predire i cambiamenti futuri.

Ecologia e monitoraggio degli uccelli marini

La zona costiera della Terra Vittoria ospita numerose e importanti colonie di Pinguino di Adelia (*Pygoscelis adeliae*), Pinguino imperatore (*Aptenodytes forsteri*), Petrello niveo (*Pagodroma nivea*), Stercorario di Mc Cormick (*Catharacta maccormicki*) e Petrello delle tempeste di Wilson (*Oceanites oceanicus*).

Alcuni aspetti dell'ecologia di queste specie possono risentire di modificazioni che si verificano nell'ecosistema per cause naturali e antropiche; le variazioni interannuali possono essere quindi considerate un utile indice per la valutazione di tali cambiamenti. Grazie ad una collaborazione con l'*Australian Antarctic Division* nell'ambito della Commissione per la conservazione delle risorse marine viventi in Antartide (CCAMLR) è in svolgimento dal 1994 un programma di monitoraggio a lungo termine sulla riproduzione, alimentazione e dinamica di popolazione del Pinguino di Adelia e dello Stercorario di Mc Cormick nella colonia di Edmonson Point, a circa 60 km N dalla stazione Mario Zucchelli. I parametri riproduttivi sono monitorati ogni stagione utilizzando un campione di 120 nidi e in associazione ai metodi di censimento manuali vengono utilizzati sistemi di identificazione automatici e la telemetria satellitare.

In dieci anni 578 adulti e 717 pulcini sono stati marcati con *transponder* sottocutanei riconoscibili da un sistema di monitoraggio automatico che al passaggio dell'individuo memorizza informazioni importanti quali il tempo di permanenza nella colonia, la durata dei viaggi in mare e la quantità di cibo assunta (peso in entrata e in uscita). Questo sistema di identificazione a radiofrequenza permette di raccogliere una grande quantità di dati evitando di dover ricatturare gli animali. Durante gli anni di studio il numero di coppie riproduttrici a Edmonson Point è aumentato passando da 1825 coppie nel 1996 a 2452 nel 2005. Il





Durante la stagione estiva la formazione di pozze di fusione del ghiaccio favorisce il rapidissimo sviluppo di feltri algali



successo riproduttivo medio per questa colonia è 0.9 pulcini/nido con uova, ed è influenzato dai fattori climatici, dalla disponibilità delle risorse alimentari e in parte dall'elevato rapporto skua-pinguini di 1:20 che determina un alto tasso di predazione di uova e pulcini di pinguino. I pinguini di Edmonson Point, durante la riproduzione, si alimentano in prevalenza di *Euphausia superba* e *E. crystallophias* (50%) e *Pleuragramma antarcticum* (45%), che predano percorrendo distanze variabili (30-170 km) e immergendosi a profondità medie variabili (10-60 m) a seconda della stagione, della fase riproduttiva (*incubation, guard, crèche*) e della tipologia del ghiaccio marino.

Microrganismi estremofili

Rispetto agli altri continenti, l'Antartide presenta una biologia largamente dominata da microrganismi procarioti ed eucarioti. Le loro comunità, infatti, oltre agli ecosistemi acquatici e terrestri, possono colonizzare anche i ghiacci e le nevi, che sono i principali costituenti dell'ambiente antartico. Sebbene le acque dell'Oceano Meridionale siano molto fredde e coperte da ghiacci permanenti o stagionali, comunità microbiche piuttosto complesse si ritrovano anche nei ghiacci marini e nelle acque, comprese quelle superfredde, ipersaline o geotermali. Le ricerche di ecologia e microbiologia nei ghiacci e nei deserti antartici hanno un'origine piuttosto recente, ma il ritrovamento di microrganismi psicrofili in



Ice hummock nelle fumarole alle pendici del Mt Melbourne - in questi microambienti si sviluppano comunità di organismi termofili

tutti i tipi di substrato (purchè vi sia, o vi sia stata una seppur limitatissima disponibilità di acqua allo stato liquido), ha costituito un elemento determinante per lo sviluppo dell'astrobiologia e dell'esobiologia, cioè delle discipline che si occupano, da una parte, dell'eventuale presenza di forme di vita nelle calotte polari di Marte, di Europa o di altri corpi del sistema solare e, dall'altra, di un possibile trasporto di forme di vita tra pianeti (panspermia).

Rispetto alle comunità di microrganismi presenti nelle nevi e nei ghiacci alpini, quelle isolate dai ghiacci antartici sono capaci di accrescersi e riprodursi in ambienti ancora più estremi quali il permafrost e le sezioni profonde delle carote di ghiaccio. Generalmente si tratta di batteri in grado di sopravvivere per molto tempo nel film d'acqua presente tra i cristalli di ghiaccio, oppure in condizioni di anabiosi (forme congelate ed inattive, ma ancora in grado di riprendere il loro metabolismo se le condizioni ambientali divengono più favorevoli).

Anche se con il passare degli anni la maggior parte dei batteri estremofili è destinata a morire, il ghiaccio conserva le membrane cellulari, le proteine e gli acidi nucleici. Questo materiale è importantissimo per ricerche di biologia molecolare su resti "paleontologici" di questi organismi.

Sin dalle prime spedizioni italiane nella Terra Vittoria sono state eseguite ricerche mirate all'isolamento e alla caratterizzazione sia di microrganismi procarioti terrestri (che tollerano valori estremi di temperatura, pH e salinità), sia di microrganismi eucarioti marini, strettamente adattati alla temperatura di congelamento dell'acqua. Risultati particolarmente interessanti, anche in prospettiva di possibili applicazioni biotecnologiche, sono stati ottenuti sia con l'isolamento di alcune specie termofile di batteri dei generi *Bacillus* e *Clostridium* dai substrati geotermali del Monte Melbourne e del Monte Rittmann, sia di protozoi ciliati psicofili del genere *Euplotes*, dalle acque costiere di Baia Terra Nova.

Muschi e licheni

E' stata eseguita un'accurata classificazione e revisione tassonomica della flora lichenica antartica (con una sostanziale riduzione del numero di specie una volta ritenute endemiche del continente) ed è stato predisposto un *database* con le chiavi per l'identificazione delle circa 60 specie presenti nella Terra Vittoria (<http://dbiodbs.univ.trieste.it/antartide/victoria>).

Identificata l'esistenza di numerose specie a distribuzione bipolare è stata ridimensionata l'ipotesi che i licheni antartici si siano evoluti in isolamento ed è stato proposto un meccanismo alternativo di dispersione a lungo raggio.

Nei substrati geotermali dei monti Rittmann e Melbourne è stata trovata

una specie di muschio nuova per il continente, con caratteristiche genetiche simili a quelle di muschi raccolti nei vulcani della Penisola Antartica. Ciò conferma la recente immigrazione di organismi alloctoni pre-adattati negli ecosistemi terrestri dell'Antartide continentale e tale processo potrebbe essere accentuato dai cambiamenti climatici ed ambientali in atto su scala globale.



Associazioni licheniche dominate dalle specie nitrofile dei generi *Xanthoria* e *Umbilicaria*

Ecotossicologia e biomonitoraggio

I licheni, i muschi e varie specie di organismi marini sono stati oggetto di indagini ecotossicologiche e di biomonitoraggio. Gli studi hanno permesso di valutare il grado di contaminazione ambientale da parte di metalli pesanti e di contaminanti organici persistenti (POPs, *Persistent Organic Pollutants*). Pur essendo lontanissima da ogni altro continente, l'Antartide non è infatti immune da processi di accumulo per la presenza, seppur ancora limitata, di alcune attività antropiche (pesca, turismo, basi scientifiche) ma, soprattutto, a causa di fenomeni di trasporto atmosferico e marino di questi contaminanti. Fra i metalli pesanti è stata messa in evidenza una «anomalia» per quanto riguarda il cadmio, determinata dai fenomeni di *upwelling* nell'Oceano Meridionale: le concentrazioni di Cd raggiungono livelli di 95 mg/kg di peso secco nel krill e 110 mg/kg nel fegato delle foche. Fra i contaminanti che giungono in Antartide per fenomeni di trasporto atmosferico, elevate sono risultate le concentrazioni di policlorobifenili (PCBs) nella catena trofica marina; è stata inoltre per la prima volta rilevata la presenza nell'ecosistema antartico dei polibromodifenileteri (PBDE).

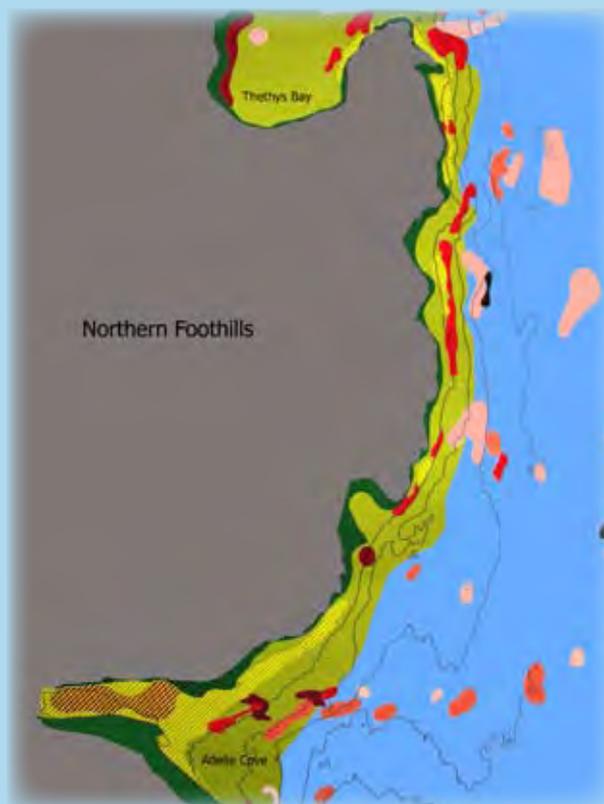


Le comunità bentoniche di Baia Terra Nova



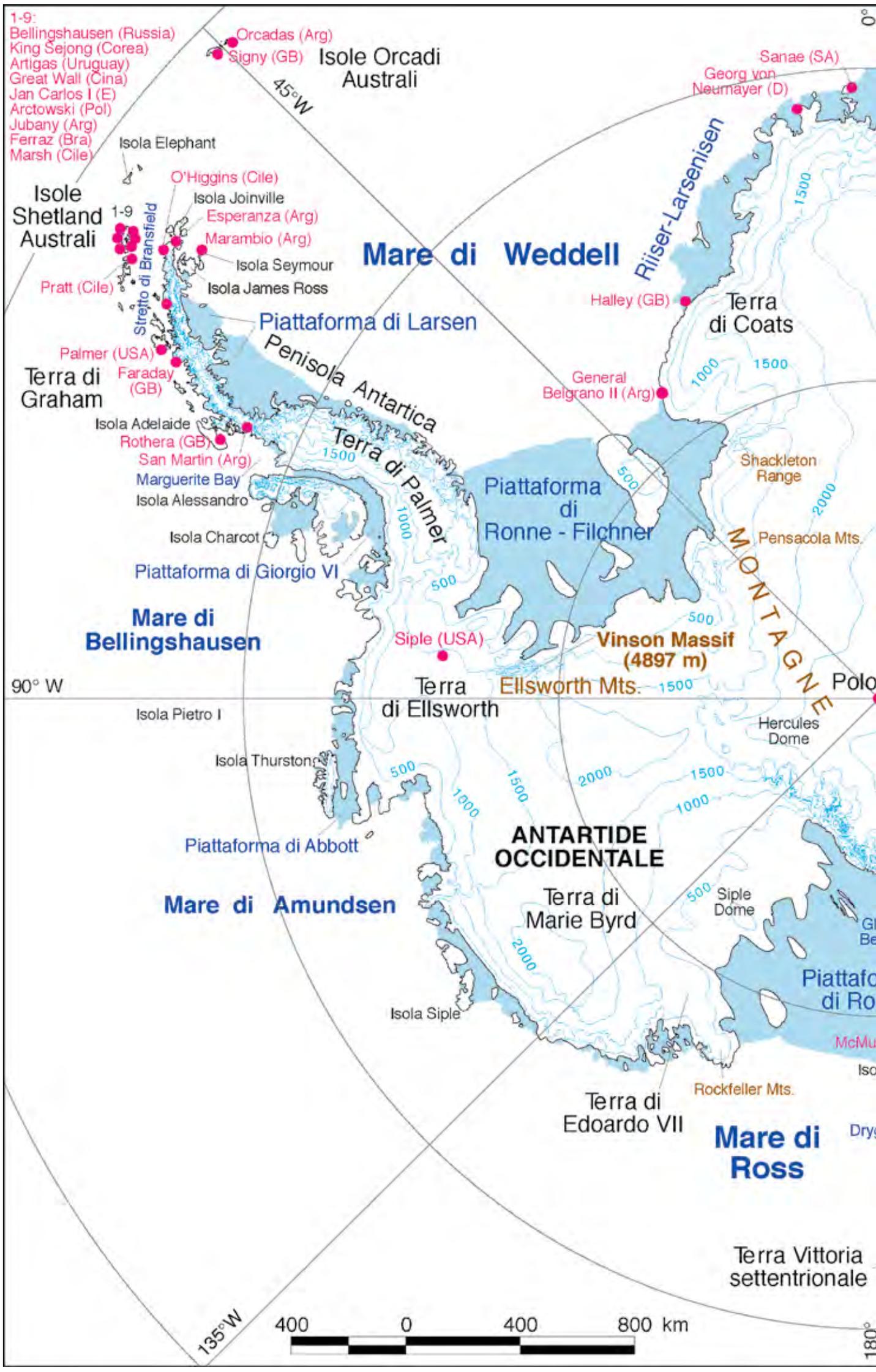
I popolamenti bentonici che vivono nei fondali di Baia Terra Nova sono estremamente ricchi e diversificati, caratterizzati da una varietà di forme e colori che ha eguali solo in ambienti quali le barriere coralline. Solo nelle zone più superficiali, a causa della presenza del ghiaccio marino, le comunità sono estremamente povere. I primi metri di profondità sono dominati da microrganismi (cianobatteri e diatomee) ma, già al di sotto dei 3 m, compaiono le alghe che, alternandosi di specie in specie, raggiungono i 25 m. Tra queste alghe vive un ricco popolamento animale costituito da piccoli crostacei, policheti e, soprattutto, dal mollusco gasteropode *Laevittorina antarctica*. In questa zona, sono molto comuni la stella marina *Odontaster validus*, il riccio di mare *Sterechinus neumayeri* e il corallo molle *Alcyonium paessleri*.

I fondali tra i 40 ed i 100 m di profondità sono caratterizzati da una grande eterogeneità di substrato, dovuto all'alternarsi di fondi sabbiosi e rocciosi, spesso disturbati dagli iceberg che arano il fondale. Sulle rocce si sviluppano un'alga rossa incrostante (*Clathromorphum lemoineanum*), popolamenti di spugne e gorgonie (*Thouarella* e *Dasystemella*) associate da una ricca fauna di predatori quali policheti, stelle marine, il nemertino *Parborlasia corrugatus* e molluschi gasteropodi. Sotto i 130 m di profondità, i fondali rocciosi sono meno comuni e spesso caratterizzati dalla presenza del polichete *Serpula narconensis* e da briozoi. I sedimenti litorali sono dominati, a partire dai 30-40 m, dai molluschi bivalvi *Adamussium colbecki*, *Yoldia eightsi* e *Laternula elliptica*. I fondali sabbiosi sotto i 120 m sono di norma caratterizzati dalla presenza di policheti, piccoli bivalvi e da ricci irregolari (*Abatus*). In questa fascia è possibile incontrare spessi strati di spicole silicee derivate dalla distruzione dello scheletro delle spugne, noti come "spicule mats". In tale *habitat* si annidano popolamenti di piccoli crostacei, policheti e il bivalve *Limatula hodgsoni*. Più in profondità, i sedimenti divengono via via più fangosi e ospitano comunità di policheti fossori, come *Spiophanes tcherniai*.



Distribuzione delle comunità





- 1-9: Bellingshausen (Russia)
- King Sejong (Corea)
- Artigas (Uruguay)
- Great Wall (Cina)
- Jan Carlos I (E)
- Arctowski (Pol)
- Jubany (Arg)
- Ferraz (Bra)
- Marsh (Cile)

Orcadas (Arg)
 Signy (GB) Isole Orcadi Australi

Sanae (SA)
 Georg von Neumayer (D)

Isole Shetland Australi

Mare di Weddell

Riiser-Larsenisen

Pratt (Cile)

O'Higgins (Cile)
 Isola Joinville
 Esperanza (Arg)
 Marambio (Arg)
 Isola Seymour
 Isola James Ross

Piattaforma di Larsen

Halley (GB)

Terra di Coats

Terra di Graham

Palmer (USA)
 Faraday (GB)

General Belgrano II (Arg)

Isola Adelaide
 Rothera (GB)
 San Martin (Arg)
 Marguerite Bay
 Isola Alessandro

Penisola Antartica

Piattaforma di Ronne - Filchner

Shackleton Range

Mare di Bellingshausen

Terra di Palmer

Piattaforma di Giorgio VI

Siple (USA)

Vinson Massif (4897 m)

Pensacola Mts.

90° W

Terra di Ellsworth

Ellsworth Mts.

MONTAGNE Polo

Isola Pietro I

Isola Thurston

Hercules Dome

Piattaforma di Abbott

ANTARTIDE OCCIDENTALE

Mare di Amundsen

Terra di Marie Byrd

Siple Dome

Isola Siple

Piattaforma di Ro

Terra di Edoardo VII

Rockfeller Mts.

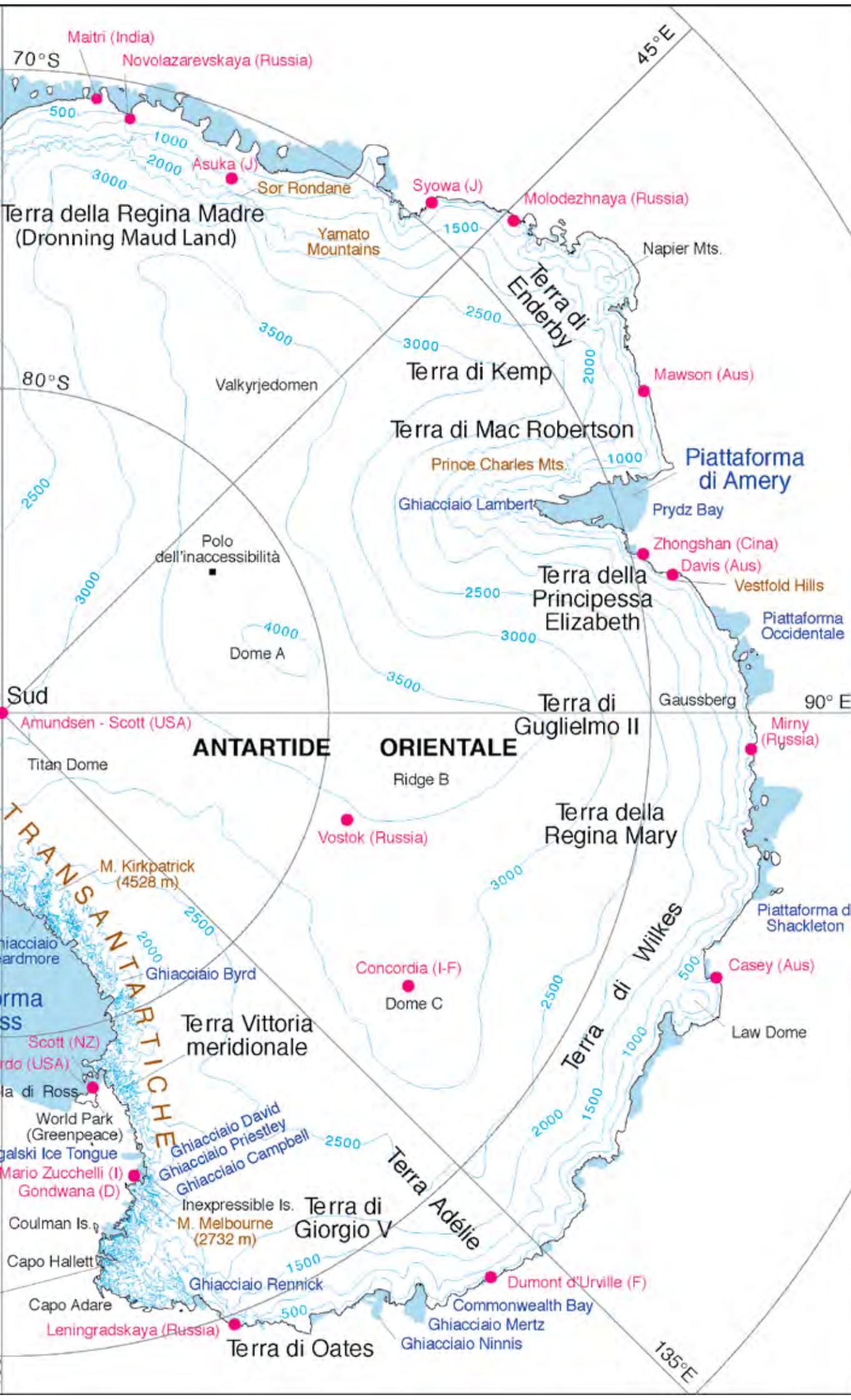
Mare di Ross

Terra Vittoria settentrionale

400 0 400 800 km

135° W

180°





La storia della Terra nelle rocce e nei sedimenti



L'approccio ad un territorio inesplorato

Il primo programma quinquennale di "Geologia e materie prime" (1985-91) prevedeva di svolgere ricerche di esplorazione preliminare (*reconnaissance*) orientate verso una conoscenza di base della Terra Vittoria (a nord e a sud di Baia Terra Nova). Date le caratteristiche del territorio, quasi interamente nascosto dal ghiaccio e da questi significativamente modellato, furono parallelamente avviati programmi di rilievi geologici, geofisici, geomorfologici e glaciologici.

E' noto che nel continente antartico si trovano giacimenti minerali correlabili a quelli più famosi rinvenuti in Africa, India, Australia e Sud America. Le pur scarse conoscenze relative alla Terra Vittoria settentrionale escludevano che questo settore antartico potesse ospitare mineralizzazioni di alto valore commerciale ma, nella fase iniziale delle ricerche, sebbene non si cercasse l'Eldorado, una certa attenzione fu dedicata all'eventuale presenza di risorse minerarie (prevalentemente solfuri, oltre a carbon fossile). Anche l'esplorazione geofisica marina fu in parte attratta dalla ricerca di giacimenti di idrocarburi sulla piattaforma continentale.

In quegli anni, fra l'altro, si sviluppò l'idea di valutare il potenziale geotermico dell'area vulcanica del Monte Melbourne: si pensava di ripetere in Antartide quello che si era fatto in Italia un secolo prima con il noto campo geotermico di Larderello, e cioè si valutò l'idea di utilizzare energia geotermica pulita e rinnovabile per il funzionamento della costruenda base italiana a Baia Terra Nova.

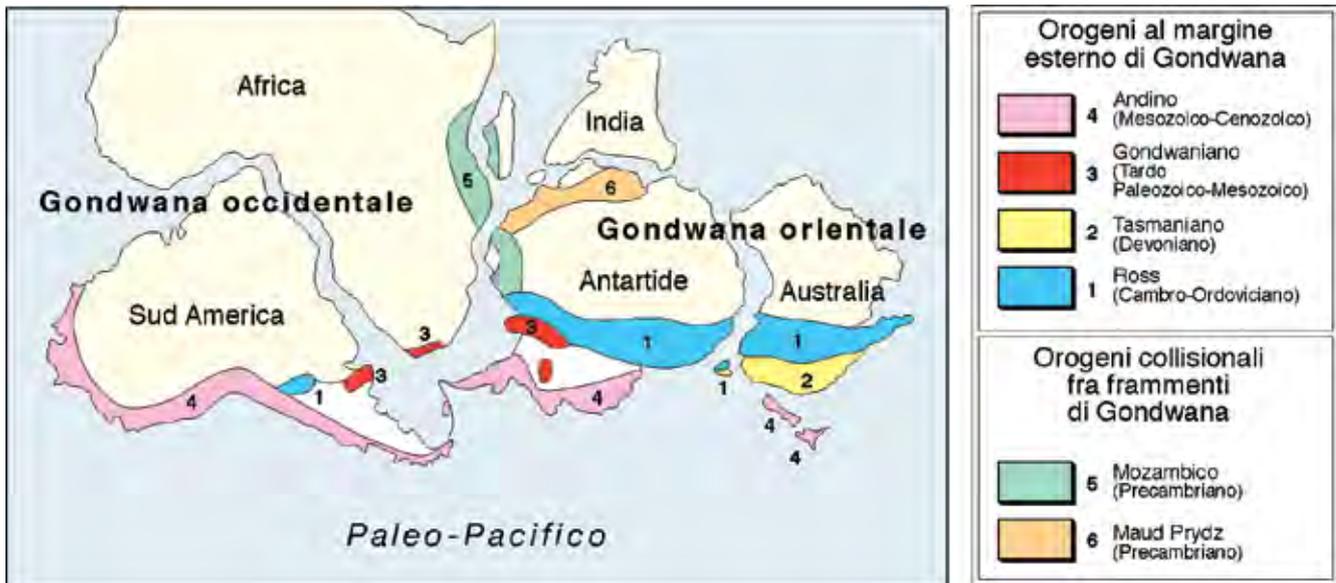
L'Antartide negli antichi supercontinenti

Le Montagne Transantartiche e la Terra Vittoria settentrionale in particolare sono un'area chiave per la comprensione dell'evoluzione geologica del continente antartico e del suo ruolo nell'evoluzione dei supercontinenti (Rodinia >750 Ma; Gondwana ca. 550 Ma). Questa catena montuosa si colloca fra lo scudo antartico che comprende rocce tra le più antiche del pianeta (età > 3.6 miliardi di anni) e la più giovane Antartide occidentale.

Le ricerche italiane sulle rocce del basamento cristallino antico si sono svolte nella Terra Vittoria settentrionale a partire dalla stazione costiera di Baia Terra Nova e, nell'ambito di accordi internazionali, in aree più remote come

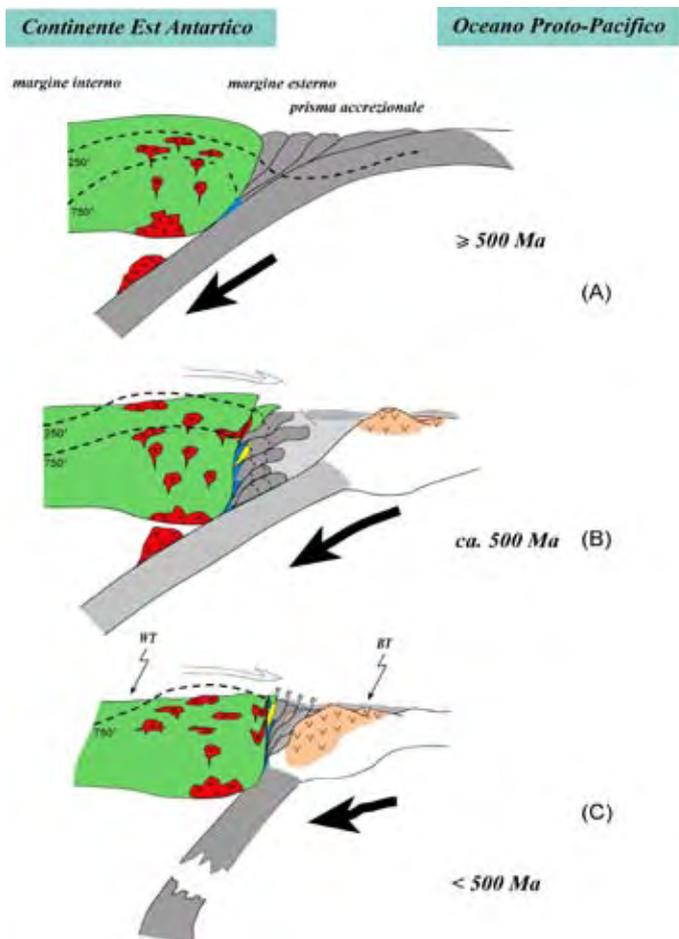


Intrusioni granitiche (rocce chiare) nelle metamorfiti della Terra Vittoria settentrionale



Il supercontinente di Gondwana come costituito circa 550 milioni di anni fa. Con i diversi colori sono indicate le principali fasce orogeniche che attraversano il supercontinente. L'area investigata dalle spedizioni italiane è quella dell'Orogene di Ross.

la Terra Adélie, lo Shackleton Range, la Dronning Maud Land. Le ricerche hanno evidenziato che queste rocce registrano una lunga e complessa storia di deformazioni, metamorfismo e intrusioni di plutoni che ha interessato una fascia di deformazione litosferica che si sviluppava per migliaia di chilometri fra il margine del supercontinente di Gondwana (del quale l'Antartide faceva parte con Australia, Sud America, India e Africa) e l'Oceano paleo-Pacifico. Lungo questa fascia (attiva intorno a 500 Ma fa), che trova analogie con l'attuale Cordigliera Andina, oltre a attività plutonica e vulcanica con tipici caratteri di arco magmatico orogenico, si svilupparono processi di trasformazione ad altissime pressioni, corrispondenti a profondità dell'ordine di 100 km, come testimoniato dalle rocce eclogitiche del Lanterman Range, le uniche sinora ritrovate nel continente.

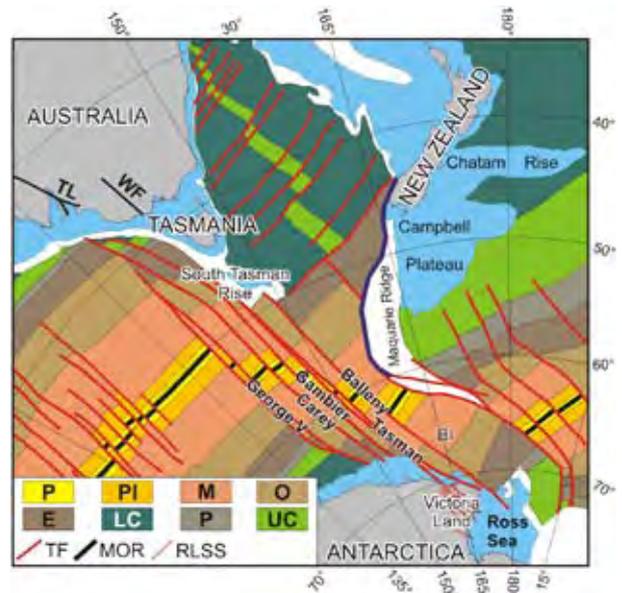


L'orogene di Ross viene quindi interpretato come il prodotto della collisione fra un margine continentale, rappresentato dal cratone est-antartico, e la zolla litosferica dell'Oceano paleo-Pacifico sulla quale insistevano archi vulcanici e microcontinenti. A partire da circa 400 milioni di anni fa, la catena montuosa, formata nel corso di questo ciclo orogenico (noto come Orogene di Ross), vennero erose e demolite. I sedimenti si depositarono sull'Antartide e sui blocchi continentali limitrofi. Evidenze glaciologiche e paleobiologiche costituiscono le prove della perdurante esistenza del supercontinente Gondwana nel corso di tutto il Paleozoico e larga parte del Mesozoico.

Schema tettonico del processo di convergenza fra la placca paleo-pacifica ed il margine del continente est-antartico, elaborato nel 1995. A) Subduzione e metamorfismo di alta pressione nella placca oceanica, magmatismo orogenico e metamorfismo di alta temperatura nel margine continentale. B) Erosione tettonica ed esumazione delle rocce di alta pressione e giustapposizione al margine esterno. C) Collisione del micro-continente (BT), rottura della placca oceanica e termine della convergenza.

La frammentazione del supercontinente Gondwana

Le intrusioni e le effusioni basaltiche del Giurassico-Cretaceo inferiore (180-160 milioni di anni fa), che dominano il paesaggio delle Montagne Transantartiche, sono interpretate come le manifestazioni magmatiche connesse con l'inizio del processo di frammentazione del Gondwana. Il processo di frammentazione, che ha determinato l'isolamento dell'Antartide in posizione polare, ha avuto luogo tra 140 e 36 Ma ed ha portato alla separazione di India, Sud Africa, Australia e, per ultimo, del Sud America. Il sollevamento delle Montagne Transantartiche è coevo all'instaurarsi delle prime manifestazioni glaciali intorno a circa 50 Ma fa. La formazione dei passaggi di Drake e di Tasmania e il successivo instaurarsi della corrente circumantartica ha determinato un progressivo raffreddamento del continente, inducendo la formazione della calotta est-antartica e la scomparsa di numerose specie animali (sia continentali sia marine) e vegetali.



Schema strutturale dell'Oceano meridionale fra Antartide, Australia e Nuova Zelanda. In colore sono indicate le fasce isocrone del fondo oceanico di età decrescente dal Cretaceo inferiore (LC; 100 Ma) al Pleistocene (P; < 2 Ma) procedendo dal margine continentale verso la dorsale medio-oceanica (MOR). Si notino le diverse zone di frattura (in rosso) che dislocano la MOR e interessano anche la Terra Vittoria in Antartide.

La glaciazione antartica

La storia della glaciazione antartica è conservata nei sedimenti dei bacini periantartici, esplorati con metodologie geofisiche e portati a giorno da perforazioni effettuate da navi attrezzate, dalla banchisa costiera e, per la parte più superficiale, mediante *piston corer* da navi oceanografiche.

Gli studi italiani sono stati condotti prevalentemente nel Mare di Ross, ma anche in prossimità della Penisola Antartica, di Prydz Bay e della Terra di Wilkes. Nel Mare di Ross indagini geofisiche e geologico-marine e perforazioni effettuate nell'ambito del progetto internazionale Cape Roberts hanno consentito di mettere in evidenza che la costruzione della calotta glaciale è iniziata a partire da circa 34 milioni di anni fa. La calotta permanente, come appare attualmente, si è formata a partire da almeno 14 Ma fa e, nel tempo, ha mostrato significative variazioni, controllando le variazioni del livello del mare, i cambiamenti climatici globali ed il regime della circolazione oceanica.

Questa storia è in parte registrata e decifrabile anche sul continente che, sui rilievi costieri e sui *nunatak* (rilievi isolati che emergono dalla calotta), conserva depositi glaciali antichi e forme relitte di paesaggi molto antichi. Fino



I paesaggi scolpiti nei tempi più antichi sono stati "congelati" e restano conservati come forme relitte del rilievo, in ampi settori completamente ammantati da una coltre di neve e ghiaccio che copre le forme relitte (come la glassa che copre un bigne').

a circa 34 Ma fa le Montagne Transantartiche sono state erose e smantellate da un reticolo fluviale ramificato ed articolato. I ghiacciai erano confinati nelle aree più elevate dei rilievi. La Terra Vittoria settentrionale ha successivamente conosciuto significativi processi erosivi ad opera di ghiacciai vallivi temperati, che hanno scolpito caratteristiche forme di tipo alpino. Tra 8.2 e 7.5 Ma di anni si è verificato un brusco cambiamento della dinamica glaciale: in luogo di ghiacciai temperati (con acqua di fusione alla base) si sono sviluppati ghiacciai freddi.

La Terra Vittoria settentrionale è pertanto una regione molto particolare. I ghiacciai della regione non sono in relazione con la calotta est-antartica e la loro storia è stata diversa: la calotta ha acquisito caratteri polari molto prima del sistema glaciale della Terra Vittoria settentrionale e rappresenta una tessera del complesso puzzle antartico, meritevole di ulteriori indagini.

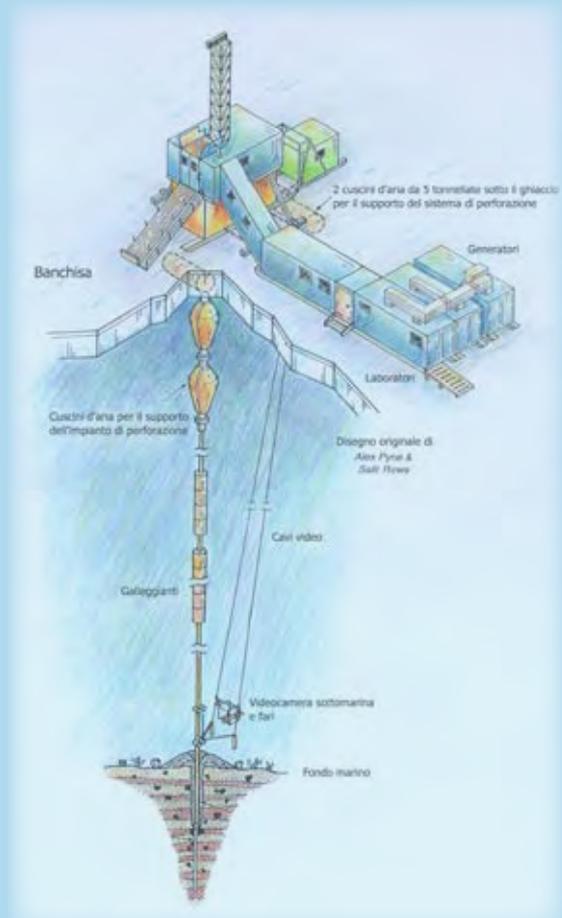
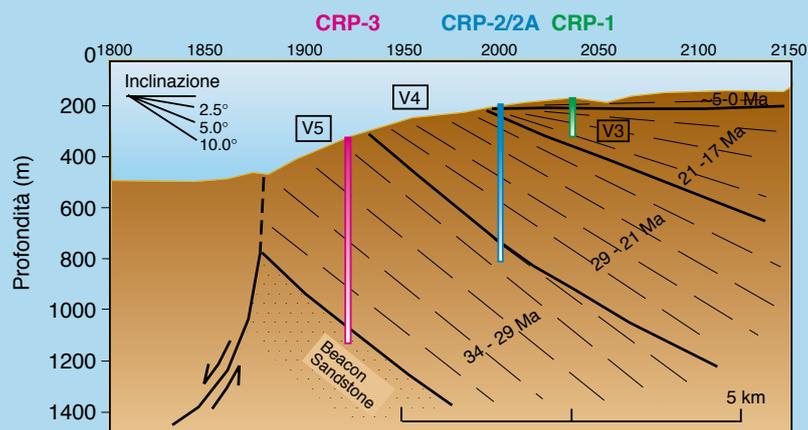


Le perforazioni del Progetto Cape Roberts

Una finestra per le ricostruzioni paleoclimatiche degli ultimi 34 milioni di anni

Perforazioni e finalità

Il programma di ricerca *Cape Roberts Project* (CRP) è un complesso progetto che ha visto la partecipazione dell'Italia e di altri 6 paesi: Australia, Germania, Gran Bretagna, Nuova Zelanda, Olanda e USA. Il progetto si proponeva di studiare e datare il sistema di apertura (*rifting*) del Mare di Ross, di ricostruire la storia antica del clima della regione, di datare le più antiche evidenze glaciali e di conoscere con precisione il momento di formazione della calotta est-antartica. Nel triennio 1997-1999, una équipe di 60 ricercatori ha perforato i fondali del mare di Ross dal ghiaccio galleggiante della banchisa costiera persistente in prossimità di Cape Roberts, prelevando e studiando in estremo dettaglio tre carote (CRP 1, 2 e 3) per un totale di oltre 1700 m di rocce del substrato, sedimenti glaciomarini, continentali e di transizione. Le carote sono conservate presso l'Alfred Wegener Institut a Bremerhaven (Germania) e sono disponibili per ulteriori studi. La correlazione delle tre carote prelevate fornisce una successione di 1500 m di sedimenti di età compresa tra 34 e 17 Ma.



Principali risultati

Gran parte delle Montagne Transantartiche si sono sollevate fino alle quote attuali prima di 34 Ma fa. Prima di 34 milioni di anni (Ma) fa la regione era dissecata da corsi d'acqua che iniziarono il processo di smantellamento della catena. Tra 34 e 24 Ma questo settore antartico era interessato da un clima da temperato freddo a sub-polare (con permafrost) con vegetazione di tipo *low woodland*. Ghiacciai temperati scendevano dai rilievi più elevati e una calotta glaciale di tipo temperato rilasciava iceberg nel Mare di Ross. Il periodo tra 24 e 17 Ma è caratterizzato da un processo di progressivo raffreddamento, con vegetazione sparsa simile a quella della tundra, e da espansioni glaciali. Tra 34 e 29 Ma il bacino della Terra Vittoria è stato interessato da una forte subsidenza, proseguita fino a 17 Ma fa. Nella regione di McMurdo il vulcanismo si è attivato intorno a 24 Ma fa. Il progetto Cape Roberts ha portato un significativo avanzamento delle conoscenze sull'evoluzione climatica, oceanografica e biotica dell'Antartide e dell'Oceano Meridionale negli ultimi 34 milioni di anni. Anche se resta ancora molto da definire sul ruolo esercitato dalla calotta glaciale dell'Antartide sulle variazioni globali del clima, questa enorme mole di dati sarà di estrema importanza per la verifica dei modelli matematici sulla dinamica della calotta di ghiaccio e sull'evoluzione del clima a scala planetaria nel lontano passato.

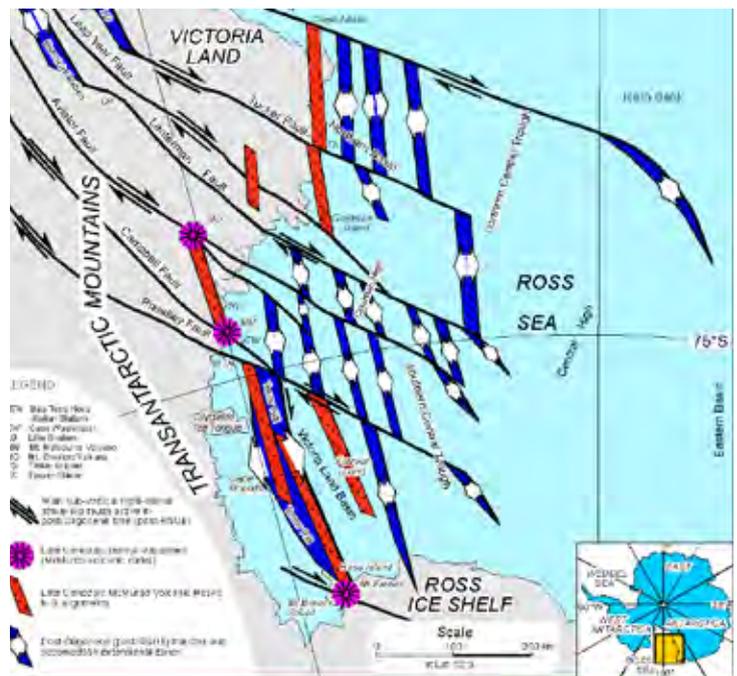


Panoramica del sito di perforazione

Il vulcanismo nella Terra Vittoria

A partire da circa 40 milioni di anni vaste porzioni del Mare di Ross e delle terre emerse circostanti sono state interessate da una intensa attività magmatica che ha, fra l'altro, prodotto vulcani prevalentemente basaltici, sia sub-aerei sia sottomarini: alcuni vulcani sono tutt'ora attivi come il Monte Erebus (Isola di Ross), presso le stazioni di McMurdo (USA) e Scott (NZ), mentre altri sono quiescenti, come il Monte Melbourne, presso la stazione Mario Zucchelli. Le ricerche italiane hanno messo in evidenza la stretta correlazione fra l'attività magmatica e l'interferenza fra la tettonica estensionale del Mare di Ross e le grandi faglie trasformati originatesi nel Pacifico Meridionale.

Le ricerche italiane hanno messo in evidenza che il magmatismo ha origine nel mantello - del quale le lave ne hanno portato a giorno alcune porzioni in forma di noduli peridotitici e che esiste una stretta relazione fra tipi di magmi ed attività tettonica.



Schema strutturale della Terra Vittoria settentrionale e del Mare di Ross. L'attività vulcanica si è sviluppata a partire dal tardo Cenozoico in corrispondenza di sistemi di fratture ad andamento nord-sud. I grandi apparati vulcanici come il M. Overlord, il M. Melbourne ed il M. Erebus sono localizzati in corrispondenza dell'intersezione delle fratture nord-sud con le faglie trasformati ad andamento nordest-sudovest.



Il cratere del M. Erebus nell'Isola di Ross, il più meridionale vulcano attivo della Terra

Il ritrovamento di nuovi minerali

Tre nuove ed interessanti specie mineralogiche del gruppo delle zeoliti (allumino-silicati), la Gottardiite, la Terranovaite e la Mutinaite, sono state trovate nelle rocce magmatiche giurassiche della Terra Vittoria (Doleriti di Ferrar e Basalti di Kirkpatrick). Altre due zeoliti rare (Boggsite e Tschernichite) sono state rinvenute per la seconda volta nel mondo. Le zeoliti, per le loro peculiari proprietà strutturali, (sono caratterizzate da un'alta porosità strutturale e dalla presenza di cationi scambiabili e molecole d'acqua in sistemi di aperture e canali comunicanti con l'esterno) una volta sintetizzate artificialmente, hanno interesse applicativo per la mitigazione di molteplici tipi di danno ambientale.



L'esplorazione dei margini continentali antartici



La nave geofisica OGS-Explora, attrezzata per rilievi sismici multicanale a riflessione, impiegata nel corso di numerose campagne del PNRA

La ricerca geologica marina è stata condotta sia con la nave italiana OGS/Explora sia utilizzando navi appositamente noleggiate, sia nell'ambito di accordi scientifici internazionali. Le ricerche hanno riguardato sia tematiche strutturali e geodinamiche della placca litosferica antartica sia tematiche di tipo paleoclimatico che paleoambientale. Fra il primo gruppo di indagini si evidenziano quelle relative alla formazione ed evoluzione della giunzione tripla presso l'Isola di Bouvet dove si incontrano le placche litosferiche africana, sudamericana e antartica. Le tre dorsali medio-oceaniche che convergono nel punto triplo hanno diversa velocità di espansione e gli studi effettuati hanno consentito di ricostruire la storia e prevedere l'evoluzione di questa giunzione. Nell'area Penisola Antartica - Arco di Scozia - Terra del Fuoco, le ricerche, in questo caso integrate anche con osservazioni a terra, hanno riguardato lo studio degli ultimi stadi del processo di subduzione oceanica che ha interessato il margine occidentale della Penisola Antartica per tutto il Cenozoico e si è concluso solo recentemente.

Nel Mare di Ross le indagini strutturali sono state orientate alla definizione dell'andamento della discontinuità di Mohorovicic, nella zona di transizione fra la piattaforma continentale, le Montagne Transantartiche, il bacino retro-arco e lo scudo est-antartico.

In quest'area indagini di sismica a riflessione ad alta risoluzione hanno contribuito, nell'ambito del progetto internazionale ANTOSTRAT, alla definizione dei principali bacini di sedimentazione e alla ricostruzione stratigrafica delle sequenze sedimentarie. La messe di dati raccolta nell'ambito di ANTOSTRAT ha portato alla compilazione di un ponderoso atlante delle fascie sismiche ed ha costituito la base per l'impostazione delle successive ricerche sul comportamento della calotta antartica in risposta alle variazioni climatiche e sulla sua influenza a scala planetaria. Nel filone delle ricerche a carattere paleoclimatico, le indagini hanno riguardato diverse località peri-antartiche (Stretto di Magellano, Penisola Antartica, Mare di Ross, Mare di Wilkes, Prydz Bay) ed hanno riguardato le variazioni climatiche a diverse scale temporali, dai milioni alle migliaia di anni.

Nell'ambito del progetto WEGA - una collaborazione italo-australiana per lo studio del margine continentale della Terra di Wilkes - è stato ricostruito un lungo periodo di raffreddamento del clima globale, successivo all'*optimum* pliocenico (il Pliocene è il periodo geologico compreso tra 5.3 e 1.8 milioni di anni), che ha determinato il cambiamento del comportamento della calotta da "temperata", simile cioè a quella attualmente presente in Groenlandia, a "polare", come quella attuale.

Alla scala delle migliaia di anni la ciclicità climatica è stata studiata con approccio multidisciplinare e integrando dati marini con osservazioni terrestri nel Mare di Ross e nello Stretto di Magellano per gli ultimi 250 mila anni e, con maggiore dettaglio per gli ultimi 20 mila anni, il periodo successivo all'ultimo massimo glaciale.



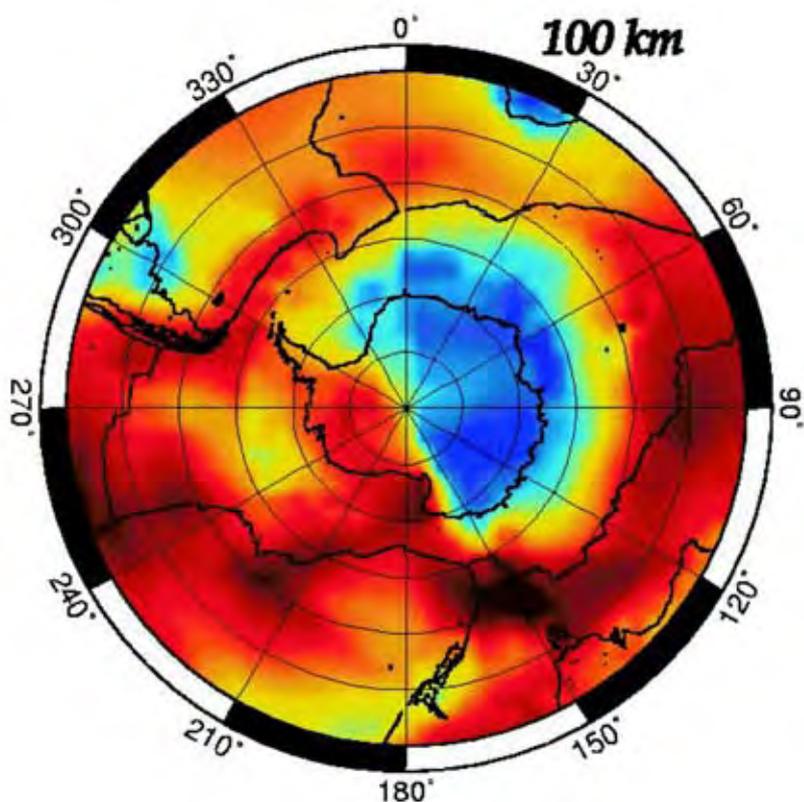
L' interno della Terra dall'Antartide

L'Antartide riveste un grande interesse per i ricercatori che studiano la struttura e la dinamica dei processi dell'interno della Terra. La regione polare meridionale costituisce infatti una vastissima porzione del pianeta scientificamente pochissimo esplorata e scarsamente interessata da misure strumentali a terra (diversa naturalmente è la situazione per le misure da satellite), quindi di per sé meritevole di maggiore impegno osservativo. Questa carenza di informazioni si ripercuote negativamente sulla comprensione generale del 'funzionamento' del nostro pianeta. Tuttavia, ancora più importanti sono gli elementi specifici di interesse dell'Antartide - dallo studio del nucleo a quello della litosfera e della crosta terrestre - dovuti, da un lato, alla sua posizione chiave per lo studio dei fenomeni legati al campo magnetico e, dall'altro, alla sua situazione unica dal punto di vista dei moti del mantello e della tettonica globale della litosfera.

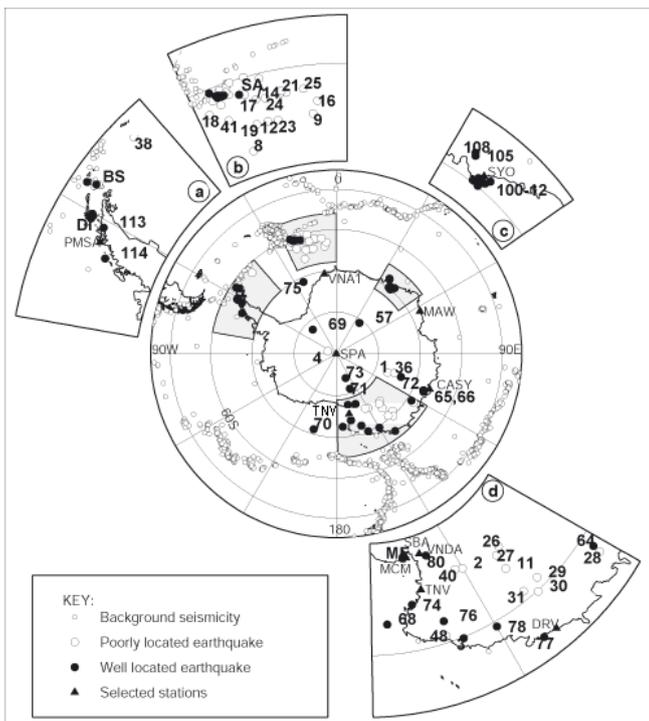
Il programma italiano di ricerche antartiche ha raccolto appieno queste sfide e, in questi vent'anni, ha installato osservatori e raccolto dati che sono entrati a far parte di *network* internazionali dell'emisfero meridionale per il monitoraggio della dinamica dell'interno del pianeta.

Le ricerche sismologiche italiane hanno consentito di realizzare immagini tomografiche dell'emisfero meridionale (vedi figura) dalle quali emerge che, al di sotto dell'Antartide, si riconosce una porzione continentale molto stabile ed antichissima, con profonde 'radici' termiche e forse composizionali nel mantello, simili a quelle di altri analoghi e meglio conosciuti scudi continentali. A questa porzione se ne associa un'altra interessata da movimenti tettonici recenti e da processi dinamici ancora parzialmente incompresi ma sicuramente unici nel mondo.

I dati raccolti dall'osservatorio sismologico installato nel 1988 a Baia Terra Nova presso la stazione Mario Zucchelli hanno contribuito alla comprensione dei processi litosferici responsabili dell'attività sismica (vedi figura) di un continente in condizioni geodinamiche eccezionali che, fino a pochi anni fa, era considerato completamente asismico. Le moderne tecnologie consentono la registrazione continua ed ininterrotta durante tutto l'anno e l'interrogazione remota (dall'Italia) per il controllo dello stato di funzionamento e per il trasferimento di segnali di interesse, come avvenne per esempio in seguito al terremoto di Sumatra che ha scatenato il devastante *tsunami* del 26 Dicembre 2004 (vedi figura).

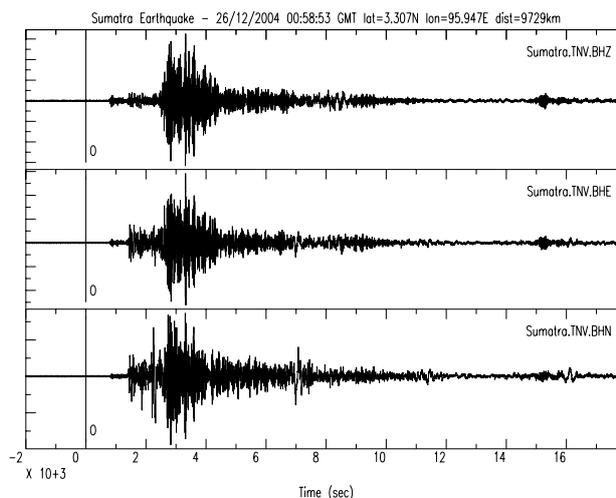


Struttura del mantello terrestre alla profondità di 100 km, ricostruita tramite tecniche di tomografia sismica. I colori rappresentano zone di maggiore (blu) o minore (rosso) velocità delle onde S, che sono in relazione alle temperature del mantello, più elevate nelle zone sottostanti le dorsali medio-oceaniche e il Mare di Ross, e più fredde in corrispondenza del cratone dell'Antartide orientale. Le 'radici' del continente antartico raggiungono i 250 km di profondità.

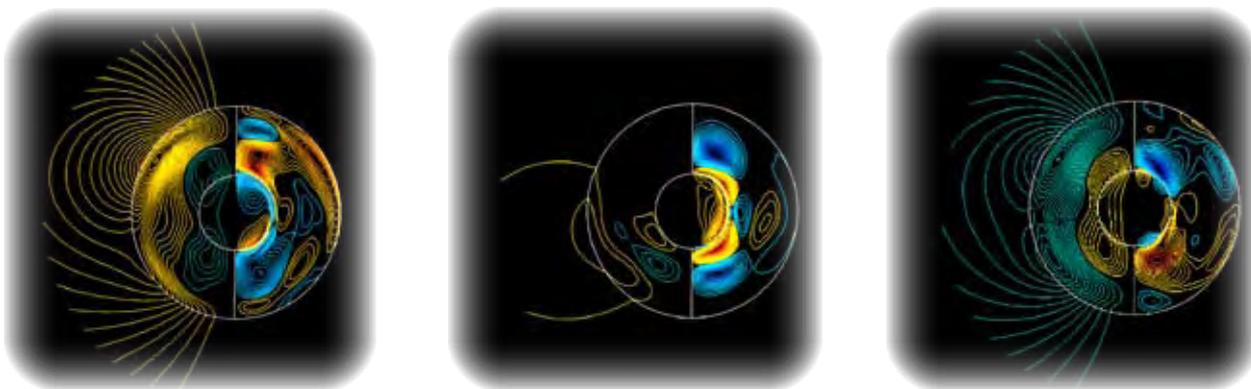


Sismicità del continente antartico e degli oceani periantartici. A causa della poca disponibilità locale di stazioni sismografiche, il rilevamento e la localizzazione dei terremoti resta problematica. L'analisi si basa sui dati rilevati dalla rete globale e dalle poche stazioni ubicate sul continente e su alcune isole oceaniche.

Registrazione del terremoto di Sumatra del 26/12/2004 effettuata dalla stazione TNV ubicata nelle vicinanze della Base Mario Zucchelli. Le tre tracce mostrate si riferiscono alle tre componenti del moto del terreno (verticale, est e nord) e hanno una durata di cinque ore e mezza.



L'analisi di serie temporali di dati relativi al magnetismo terrestre è orientata a determinare l'evoluzione secolare del campo magnetico terrestre, per il quale l'Antartide costituisce un punto di osservazione privilegiato. I segnali che sono stati registrati suscitano particolare interesse, in quanto fanno presagire una prossima inversione di polarità del campo magnetico, come messo in evidenza anche da ricerche italiane.



L'inversione del campo magnetico terrestre passa attraverso una fase nella quale il campo perde progressivamente intensità. Le immagini mostrano le linee di intensità del campo nel nucleo terrestre in tre momenti successivi, secondo una simulazione al computer. Le zone polari riscontrano modifiche intense già nelle fasi iniziali del processo di inversione.



Il campo magnetico terrestre e la ionosfera: relazioni con il Sole

Relazioni Sole-Terra

Lo spazio attorno alla nostra atmosfera è "vivo" e dinamico, poiché il campo magnetico terrestre "reagisce" ai cambiamenti che il Sole con la sua attività produce nel vento solare (flusso continuo di protoni ed elettroni provenienti dal Sole). Le aurore polari e le tempeste magnetiche sono due evidenti e ben noti fenomeni naturali indotti dall'interazione fra il vento solare e gli ioni dell'alta atmosfera terrestre. Il nostro pianeta è protetto da una sorta di "scudo" rappresentato dalla magnetosfera, lo spazio ove il campo magnetico della Terra è confinato dal vento solare. Fanno eccezione - in Artide ed in Antartide - due finestre attraverso le quali il vento solare può raggiungere direttamente l'alta atmosfera terrestre.

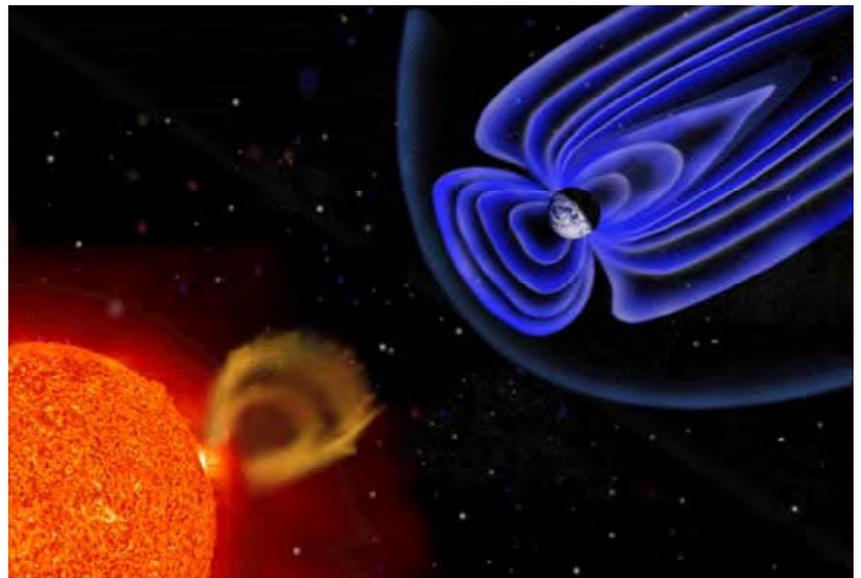
Il PNRA ha sviluppato osservazioni e ricerche sull'interazione tra vento solare, campo magnetico terrestre e ionosfera, installando diverse infrastrutture presso la Stazione Mario Zucchelli (MZS) a Baia Terra Nova (osservatori geomagnetico, ionosferico, aurorale e riometrico).

La dinamica del campo magnetico terrestre

Tra le ricerche effettuate sono importanti quelle sulle perturbazioni del campo magnetico terrestre dette pulsazioni.

Dalla parte rivolta verso il Sole, al confine esterno della magnetosfera, l'azione del vento solare produce delle onde (mediante la cosiddetta "instabilità di Kelvin-Helmholtz"), in maniera simile al meccanismo con il quale il vento che soffia sul mare genera un fenomeno ondoso. Queste onde vengono registrate al suolo dai magnetometri. Fra le pulsazioni vanno annoverate anche le cosiddette *upstream waves*, onde magnetiche generate, lungo le linee di forza del campo magnetico interplanetario dai protoni riflessi dall'onda d'urto che risulta dall'interazione del vento solare "supersonico" con la magnetosfera terrestre (in maniera in qualche modo analoga all'onda sonora prodotta da un *jet* che si muove a velocità supersonica).

Tra i risultati ottenuti dalle ricerche effettuate dagli osservatori del PNRA in questo ambito, ricordiamo l'osservazione sistematica, intorno al mezzogiorno locale, dell'inversione del verso di propagazione delle onde magnetiche che si propagano in direzione antisolare all'interno della magnetosfera, cioè verso ovest di mattina e verso est di pomeriggio.

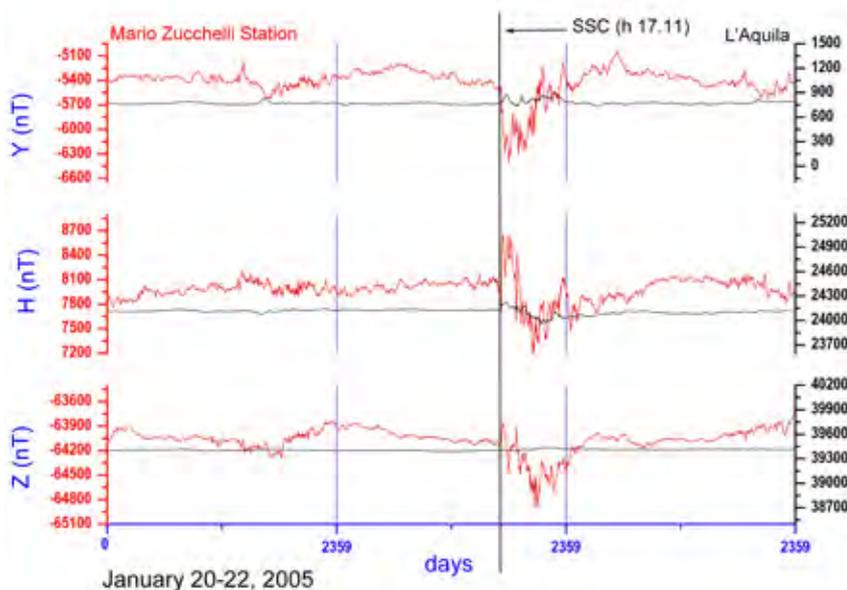


Schema del campo magnetico deformato - Il Sole emette vento solare ad elevata velocità (qualche centinaio di km/s in prossimità della Terra) che "trascina" con sé il campo magnetico del Sole, "intrappolato" dall'elevata conducibilità elettrica del plasma stesso. All'altezza della nostra magnetosfera, le linee di forza del campo magnetico terrestre sono deformate dall'interazione con il vento solare: nella parte frontale le linee di forza sono compresse, mentre quelle situate sul lato opposto vengono prolungate fino a distanze molto elevate.

Osservazione sistematica dell'atmosfera ionizzata

Alcune particelle del vento solare vengono deflesse dalla magnetosfera, altre fluiscono attraverso aperture a forma di imbuto (*cusps*) che caratterizzano le regioni polari. Le aurore sono l'evidenza visiva di questo fenomeno.

Osservazioni delle variazioni dei campi elettrici nella ionosfera terrestre e della circolazione del plasma ionosferico da essi determinata, vengono regolarmente effettuate mediante tecniche basate sull'osservazione del moto delle



Andamento giornaliero delle tre componenti del campo magnetico

Il grafico riporta la variazione temporale delle tre componenti del campo magnetico terrestre per i giorni 20-22 Gennaio 2005. I dati provengono dagli osservatori magnetici della stazione Mario Zucchelli, a Baia Terra Nova (colore rosso), in Antartide e L'Aquila, in Italia (colore nero). Risulta evidente che alle ore 17.11 (TU) del giorno 21 parte una perturbazione magnetica planetaria con un inizio brusco su tutte le componenti e con notevole violenza in Antartide rispetto ai valori osservati all'Aquila. Si tratta di una tempesta magnetica di intensità medio-forte che in zona polare ha fortemente perturbato il campo per diverse ore. In concomitanza con questo evento sono comparse aurore polari e si sono avuti interruzioni nei radio collegamenti a onde corte.



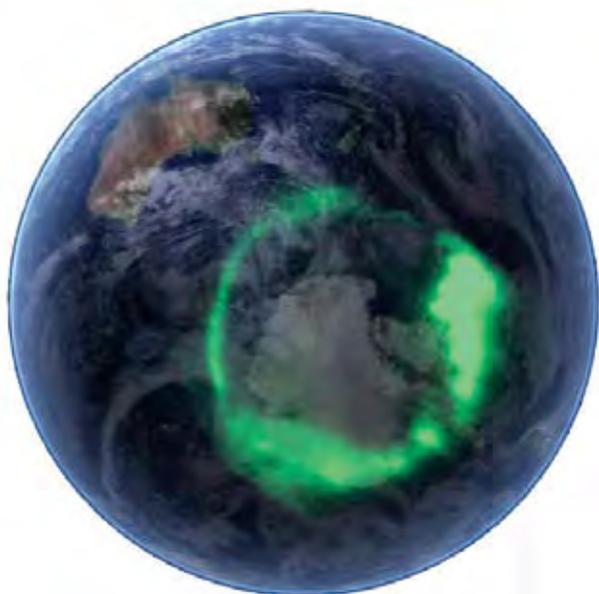
A sinistra un'immagine di un'antenna radar di un Superdarn.

onde ionosferiche con coppie di radar incrociati. Il radar italiano è installato sull'isola di Kerguelen (situata fra 48° 35' e 49° 54' di latitudine Sud e fra 68° 43' e 70° 35' di longitudine Est nelle Terre australi e antartiche francesi) come parte di una rete antartica.

Meteorologia spaziale

Il monitoraggio dei parametri fisici caratteristici dell'alta atmosfera ionizzata contribuisce ai programmi di climatologia e meteorologia spaziale noti come *space weather* (l'insieme delle condizioni ambientali dello spazio determinate dall'interazione tra vento solare e campo interplanetario con il sistema magnetosfera-ionosfera, in grado di interagire con i satelliti artificiali e con sistemi tecnologici o altri apparati terrestri).

Le ricerche hanno consentito di determinare l'estensione spaziale degli effetti geomagnetici prodotti dall'arrivo all'orbita terrestre di strutture del vento solare come protuberanze della corona solare (*coronal mass ejections*), onde d'urto e altri tipi di discontinuità, per diverse orientazioni del campo magnetico interplanetario. Le *coronal mass ejections* sono la sorgente delle "nubi magnetiche", cioè delle strutture che si propagano attraverso il mezzo interplanetario e innescano fenomeni anche violenti, spesso sotto forma di tempeste geomagnetiche, nell'impatto con la nostra magnetosfera.



Dallo spazio l'aurora appare come una corona di luce che circonda ciascuno dei poli terrestri. Il satellite IMAGE ha preso questa immagine dell'aurora australe l'11 Settembre 2005. L'anello di luce che la tempesta solare ha generato sopra l'Antartide in questa immagine ha un colore verde brillante. Dalla superficie terrestre l'anello di luce appare come un festone di luce brillante nel cielo notturno.



Lo Spazio osservato dall'Antartide



L'Antartide come osservatorio per ricerche astrofisiche

L'atmosfera terrestre agisce come una tenda davanti ad una finestra: quanto più è sottile e ferma, non agitata dal vento, tanto meglio si possono distinguere ed osservare oggetti anche lontani. Il ridotto spessore dell'atmosfera antartica, la sua scarsa turbolenza, il bassissimo contenuto di vapor acqueo, determinano un'eccezionale trasparenza del cielo nelle bande dell'infrarosso vicino e millimetrico, permettendo di osservare oggetti nello spazio anche di debole emissione (molto lontani o molto antichi). Inoltre, la stabilità dell'atmosfera riduce il fenomeno del brillamento delle stelle e l'interferenza delle attività umane è sostanzialmente trascurabile.

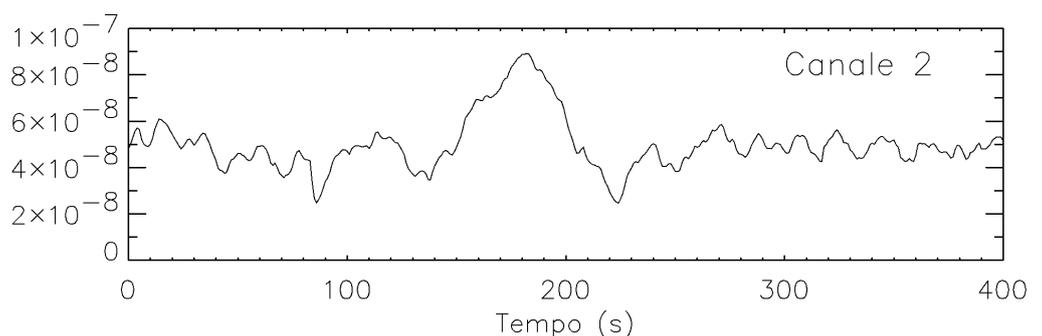
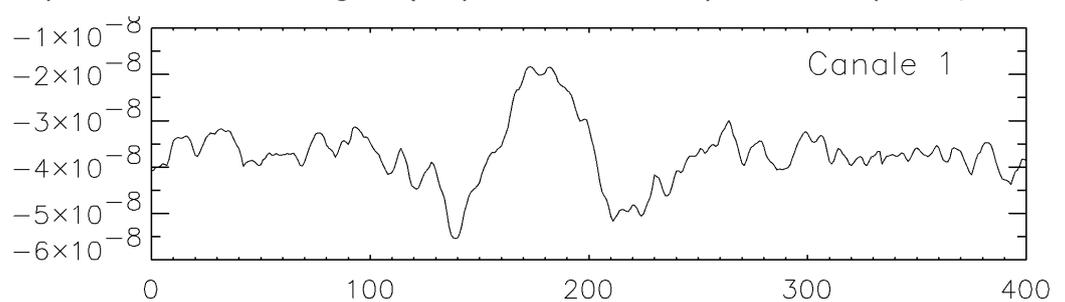
L'Antartide è pertanto un perfetto laboratorio per ricerche astrofisiche sull'origine e la struttura dell'Universo, sulla formazione di galassie, stelle e pianeti, per lo studio di quasar e altri oggetti celesti.

Il telescopio della Stazione Mario Zucchelli

Con il telescopio OASI (Osservatorio Antartico Sub-millimetrico e Infrarosso) installato alla Stazione Mario Zucchelli, in questi anni sono state condotte importanti osservazioni su sorgenti galattiche ed extragalattiche. Per la prima volta in assoluto è stato rivelato un eccesso di emissione a 1.2 e 2 mm di lunghezza d'onda dovuto alla presenza di polvere fredda, con temperatura di pochi Kelvin, presente nelle due Nubi di Magellano e nella nostra Galassia.

Sempre per la prima volta in assoluto, sono state effettuate osservazioni millimetriche di regioni HII della nostra galassia: si tratta di regioni entro le quali sono in atto intensi processi di formazione stellare che provocano la ionizzazione del gas e il riscaldamento della polvere che circonda il *cluster* di stelle. Le osservazioni nel millimetrico hanno permesso di ottenere informazioni sui parametri fisici delle sorgenti (temperatura ed indice spettrale della polvere, massa

totale, luminosità bolometrica della regione, luminosità e numero delle stelle del cluster che la eccita, ecc.). Osservazioni più accurate sono previste dal telescopio COCHISE, in corso di installazione presso la Stazione Concordia.



Una regione HII osservata da OASI in due bande millimetriche



Il telescopio OASI presso la stazione Mario Zucchelli

L'esperimento BOOMERanG e la mappa delle radiazioni del fondo cosmico



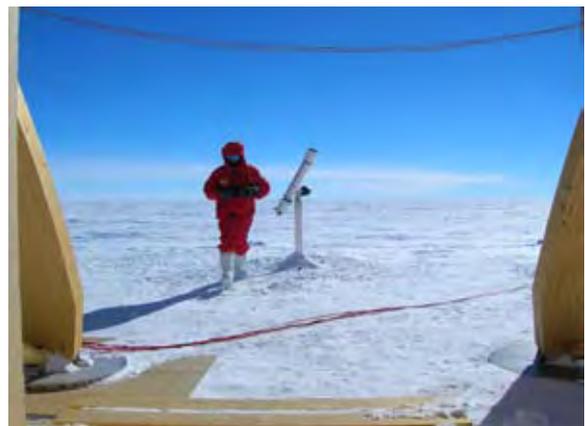
Lancio del pallone di BOOMERanG dalla Piattaforma di Ross

Lanciato dall'Antartide nel 1998 e nel 2003 per due voli che hanno circumnavigato il continente antartico a una quota di circa 38 km di altezza, l'esperimento internazionale BOOMERanG ha impiegato per l'osservazione del cielo un telescopio a microonde, del diametro di 1.3 m, montato su una navicella agganciata ad un pallone stratosferico. Le misure hanno riguardato la radiazione cosmica di fondo (*cosmic microwave background*: equivalente alla radiazione di corpo nero alla temperatura media di 2.7 gradi Kelvin) ed è la testimonianza del periodo iniziale di formazione dell'Universo, circa 15 miliardi di anni fa.

Osservazioni nel campo dell'infrarosso presso la stazione Concordia

IRAIT (*Italian Robotic Antarctic Infrared Telescope*) prevede la costruzione ed installazione, presso la stazione Concordia, di un telescopio per effettuare osservazioni astronomiche nell'infrarosso per ricerche nel campo dell'evoluzione stellare sia per la Galassia che per le Nubi di Magellano. Le osservazioni verranno effettuate con un telescopio con riflettore ad infrarosso con diametro di 80 cm.

Il telescopio mini-IRAIT (foto a fianco) per misure fotometriche è stato





La vita e la salute dell'uomo in Antartide



Continente di tutti gli estremi, l'Antartide è un luogo dove la sopravvivenza umana è impossibile senza idonei mezzi di sostentamento e di protezione. Per questa ragione i programmi di ricerca nazionali e le agenzie spaziali hanno sempre considerato l'Antartide come un laboratorio naturale privilegiato per studiare la capacità e i meccanismi psicofisici dell'adattamento umano a una situazione estrema.

La ricerca biomedica del PNRA ha privilegiato inizialmente lo studio dei rischi legati al freddo e all'isolamento, così come lo sviluppo di misure di assistenza remota dei partecipanti alle campagne antartiche, per poi espandersi ad altre aree specialistiche. Le ricerche svolte negli ultimi 20 anni riguardano il sistema vascolare, neurologico ed endocrino, cardiocircolatorio, immunologico, ma anche la microbiologia, l'alimentazione, l'adattamento psicosociale, la telemedicina e il monitoraggio delle attività biologiche (*biomonitoring*).

Fisiologia

I risultati ottenuti nella ricerca vascolare sia nella micro che nella macro-circolazione mostrano l'esistenza di alcuni particolari meccanismi di adattamento alle condizioni ambientali e climatiche antartiche. E' stata sviluppata dalle ricerche vascolari l'angiografia teletermografica delle mani. Gli studi finora compiuti sulla circolazione cerebrale, condotti con metodiche non invasive (come il *transcranial doppler*), su un campione esiguo della popolazione antartica hanno lo scopo di ottenere parametri prognostici per predire la peggiore complicanza del mal di montagna, l'edema cerebrale.

La ricerca nutrizionale-metabolica ha permesso di stabilire una dieta adeguata ai fabbisogni energetici e nutritivi al fine di garantire uno stato di buona salute, soprattutto in situazioni di scarsa attività fisica e di ridotta esposizione alla luce solare.

Telemedicina

L'area di telemedicina ha effettuato le prime trasmissioni di elettrocardiogrammi e Doppler dall'Antartide nel 1987: oggi garantisce un'assistenza continuativa dall'ospedale San Camillo di Roma alla Stazione Mario Zucchelli. L'esperienza sviluppata è stata utilizzata dal 118 della Regione Lazio, dal CIRM per l'assistenza medica alle navi sui mari di tutto il mondo, nella stesura delle linee guida dell'Unione Europea per la Telemedicina, in un Master di II livello in e-Health.

L'adattamento psicosociale

La ricerca psicosociale ha permesso di affinare i criteri di selezione e di preparazione psicologica del personale delle spedizioni italiane, e di identificare gli elementi predittivi e le manifestazioni comportamentali dell'adattamento. Studi successivi hanno evidenziato - durante l'esperienza antartica - la sostanziale stabilità emotiva, la stabilità o la riduzione di alcuni indicatori dello stress, un soddisfacente livello di relazioni interpersonali e di coesione, la soddisfazione nel rapporto di coppia quando uno dei due partner partecipava alla spedizione.

Una strategia di adattamento basata sulla riduzione della reattività nei confronti del disagio, una sorta di "economizzazione" delle risorse, denominata "congelamento" è stata osservata nelle spedizioni estive italiane e invernali argentine.



Presso la stazione Concordia, dove le temperature durante l'inverno scendono fino a -80°C , l'attività all'esterno comporta l'utilizzo di un sofisticato abbigliamento. Talvolta anche un contributo artigianale, può risolvere problemi imprevedibili come il sistema escogitato da due ricercatori per evitare che l'aria espirata raggiunga le maschere trasparenti. Il vapore si congelerebbe immediatamente, impedendo la visione.



Le immersioni nelle acque gelide dell'Oceano Antartico richiedono, oltre che un'adeguata selezione e preparazione del personale anche sofisticate apparecchiature di sicurezza quali ad esempio camere iperbariche.



Tecnologie in ambiente polare



Fin dalle prime fasi esplorative del continente di ghiaccio, ogni spedizione ha impiegato in Antartide quanto di meglio la tecnologia del momento potesse fornire. Dal vestiario alle tende, dalle slitte agli aerei, tutti i materiali utilizzati hanno dovuto essere provati a lungo per resistere a sollecitazioni termiche e meccaniche difficilmente immaginabili a tavolino. Materiali e strumenti che oggi sono di uso comune sono stati messi a punto grazie all'esperienza acquisita in oltre cent'anni di spedizioni. In tal senso, l'efficacia e l'affidabilità di materiali e strumentazioni deriva anche dall'abilità di chi ha saputo far tesoro degli inevitabili insuccessi che hanno caratterizzato le prime sperimentazioni sul campo.

La ricerca moderna richiede talvolta l'impiego di strumenti complessi e sofisticati. Il loro utilizzo in Antartide non può prescindere da un'attenta progettazione e, soprattutto, sono necessari accurati test nell'ambiente estremo nel quale devono essere impiegati. L'Antartide è anche un luogo per sperimentare il comportamento di materiali in ambienti estremi sia marini sia terrestri, simili a quelle delle missioni spaziali.

Per quanto riguarda la tecnologia a supporto delle attività tecnico-logistiche, l'impegno di gran lunga più rilevante del PNRA è stato la costruzione delle stazioni scientifiche. La realizzazione della stazione Mario Zucchelli a Baia Terra Nova ha consentito di acquisire quell'esperienza necessaria per affrontare la sfida della costruzione della stazione Concordia a Dome C, a oltre 3000 metri di altitudine e 1000 km di distanza dalla costa. Concordia ha implicato l'utilizzo di soluzioni tecnologiche avanzate come per esempio: le carovane di trasporto dei materiali per la costruzione e l'alimentazione della stazione, la cogenerazione ed il riutilizzo delle acque, lo smaltimento dei rifiuti, l'isolamento termico e la resistenza dei materiali, le telecomunicazioni e la sicurezza.

L'utilizzo di strumenti di acquisizione di dati in aree remote anche durante l'inverno australe comporta la necessità di disporre di energia sufficiente per il loro funzionamento, con sistemi in grado di operare per lunghi periodi di tempo senza l'intervento diretto dell'uomo. Inoltre, è di fondamentale importanza la possibilità di controllo remoto del sistema ed il trasferimento delle informazioni in Italia, tramite collegamenti telefonico-satellitari. Sin dagli anni '90 è stato costruito un modulo automatico integrato (AIM-PAT *Automatic Integrated Module*), presso la stazione Mario Zucchelli, in grado di fornire energia anche durante la stagione invernale alle stazioni di monitoraggio geofisiche (meteo-climatici, magnetici, ionosferici, sismologici, geodetici ecc.) e sono stati sviluppati e testati sistemi di generazione eolico-solare da utilizzare per misure di parametri atmosferici in località remote della calotta antartica.

L'opportunità di fornire frutta e verdura fresche per il personale che rimane isolato durante i lunghi inverni australi, analogamente alle missioni spaziali, ha portato allo sviluppo di una serra (*Plant-based Unit for Life Support in Antarctica*) destinata alla coltivazione di specie vegetali in ambiente controllato e alla realizzazione di processi di recupero, trattamento e riciclo di residui organici e liquidi.

Per quanto riguarda invece le tecnologie di supporto alla ricerca sono stati sviluppati dei robot marini e terrestri e della strumentazione dedicata alle problematiche delle aree polari (sistemi Lidar e radiometri, macchine di

La serra realizzata presso la stazione Mario Zucchelli consiste in una unità di produzione di fitomassa, basata sulla validazione di tecnologie idroponiche e di tecniche per l'accrescimento di piante alimentari in ambiente chiuso e controllato.



perforazione in ghiaccio, telescopi astronomici, sistemi di misura geofisiche e astrofisiche su palloni stratosferici). I sistemi robotici marini sono stati sviluppati, realizzati e sperimentati per l'applicazione operativa di dispositivi che permettessero di campionare acque, sedimenti e materiali biologici, di isolare una porzione di ambiente per studiarne in modo dettagliato gli scambi energetici e il ciclo del carbonio, unitamente ad un completo set video-fotografico. Inoltre, alcuni sistemi, quali ad esempio ROMEO, consentono il telecontrollo in Antartide mediante un collegamento satellitare Inmarsat; un veicolo sottomarino, SARA, è stato sviluppato per la manutenzione di impianti sottomarini e un altro, SESAMO, è stato realizzato per il campionamento sia della colonna d'acqua che dell'atmosfera immediatamente sovrastante.

L'osservatorio bentico MABEL è equipaggiato con sensori per il monitoraggio di parametri fisici e chimici dell'acqua di mare, è stato installato il 5 Dicembre 2005 alla profondità di 1874 m sui fondali del Mare di Weddell per una prima missione di durata di almeno un anno. Il sistema di robotica terrestre (RAS) ha sviluppato un sistema di intelligenza artificiale e di sensorialità specializzato agli ambienti polari.

Le esigenze espresse dalla comunità scientifica hanno portato allo sviluppo di specifici sistemi di misura come il Lidar per la misura del fitoplancton, il radiometro UV per lo studio del buco dell'ozono, i palloni stratosferici per misure magnetometriche. Le perforazioni profonde in ghiaccio hanno richiesto lo sviluppo di tecnologie e di soluzioni innovative per perforare e campionare carote di ghiaccio vecchie di migliaia di anni. Queste tecnologie hanno trovato specifica applicazione nelle perforazioni internazionali quali EPICA, dove a Dome C sono stati superati i 3000 m di profondità e TALDICE a Talos Dome.

La stazione Concordia offre alla comunità scientifica astronomica opportunità di ricerca ineguagliabili simili a quelle ottenibili solo lanciando grandi telescopi nello spazio, ma le estreme condizioni climatiche e di isolamento hanno richiesto lo sviluppo di telescopi e strumentazione idonee.

Interno del locale di perforazione presso la Stazione Concordia: in primo piano il carotiere del Progetto EPICA che ha raccolto il ghiaccio più antico (età superiore a 800.000 anni) finora recuperato in sondaggio. Le perforazioni in ghiaccio ed in particolare quelle all'interno dell'Antartide richiedono lo sviluppo di tecnologie altamente specializzate. Il PNRA ha sviluppato e realizzato la componente elettronica di comando e controllo del sistema di perforazione EPICA.





Stazione Mario Zucchelli a Baia Terra Nova

La stazione costiera, che sorge su una propaggine di granito a Baia Terra Nova (Mare di Ross, Terra Vittoria) in una posizione facilmente accessibile dal mare, è stata dedicata alla memoria di Mario Zucchelli nel 2004 (74°42' S, 164°07' E). La sua costruzione iniziò durante la seconda spedizione (1986-1987). Alla fine della campagna la stazione era formata da due file di 17 moduli prefabbricati ISO 20', affiancati e separati da un corridoio, e da 3 moduli esterni, ad una decina di metri dal corpo principale, contenenti la centrale elettrica e l'officina, per una superficie totale coperta di circa 670 m². Dodici moduli erano adibiti ad alloggi, per una recettività massima di 48 persone, i rimanenti erano dedicati a: servizi igienici, cucina, mensa, magazzini, celle frigorifere, infermeria, sala radio, uffici e laboratori scientifici. Gli edifici della stazione vennero poggiati su una struttura metallica disposta su piedi di 1,5 m di altezza, per evitare l'accumulo di neve, ancorati rigidamente al terreno, per resistere ai forti venti catabatici che nel periodo invernale possono soffiare fino a oltre 220 km/ora. Tra le infrastrutture esterne furono realizzate anche la viabilità, un helipad, un'area deposito carburanti e banchine di ormeggio per piccole imbarcazioni. L'energia elettrica era fornita da 2 gruppi Mercedes da 175 kVA di potenza ciascuno. Per le comunicazioni a lunga distanza fu installato un sistema di comunicazione via satellite (SATCOM), inserito nella rete INMARSAT, sistema all'epoca utilizzato da diverse stazioni scientifiche, tra cui la stazione di McMurdo, che dista poco più di 350 km da Baia Terra Nova.

Nel corso degli anni la stazione è stata ampliata, per rispondere alle crescenti esigenze ed alla complessità dei programmi scientifici di ricerca. Questa operazione cominciò già dalla spedizione 1987-1988, quando fu aggiunta un'ala composta da 6 moduli prefabbricati da adibire a laboratori e fu posto, a circa 500 m di distanza dal corpo principale, il primo container di quella struttura che sarebbe diventata l'Osservatorio Antartico Sub-millimetrico e Infrarosso (OASI). Sempre in questo periodo, in 2 container affiancati e tra loro comunicanti, fu installato un inceneritore, in grado di smaltire l'intera produzione di rifiuti combustibili della stazione. Per quanto riguarda le telecomunicazioni fu acquisito un secondo terminale INMARSAT (TBAY), per aumentare sia la sicurezza dei collegamenti sia la qualità del livello di ricezione. Per le medie distanze veniva inoltre utilizzato un apparato ad onda



Tende e prefabbricati nel 1985 nel sito dove verrà costruita la stazione italiana di Baia Terra Nova

Mario Zucchelli (1944-2003)

Uomo di talento - ingegnere, manager, stratega

Mario è scomparso improvvisamente il 24 Ottobre 2003 a Bologna, una settimana dopo aver ricevuto la medaglia d'oro per i suoi meriti in campo culturale ed educativo da parte del Presidente della Repubblica, Carlo Azeglio Ciampi.

Mario si è laureato in Ingegneria nucleare presso l'Università di Bologna ed ha lavorato per molti anni all'ENEA. Nel 1987 gli fu affidata la direzione del Progetto Antartide dell'ENEA che aveva il compito di attuare il Programma Nazionale di Ricerche in Antartide.

Mario è stato un entusiastico e instancabile manager del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide al quale ha dedicato più di 17 anni, con particolare interesse alla costruzione e allo sviluppo della stazione scientifica di Baia Terra Nova (adesso stazione Mario Zucchelli) e all'organizzazione delle spedizioni in Antartide.

E' stato uno dei fondatori dell'European Polar Board. Dal 1991 al 1994 è stato chairman del COMNAP. All'inizio degli anni 90 è stato uno dei più convinti promotori dell'accordo franco-italiano per lo sviluppo di ricerche scientifiche sul plateau polare a Dome C che ha condotto, fra l'altro, alla costruzione della stazione permanente Concordia. Il grande sogno di Mario era che Concordia divenisse una piattaforma aperta alle ricerche della comunità scientifica europea. Mario ha fornito un contributo fondamentale al grande successo del programma europeo di perforazioni di ghiaccio in Antartide (EPICA). Negli stessi anni è stato un attivo manager del progetto Cape Roberts e del successivo progetto ANDRILL.



corta (HF) di piccola potenza. Per una riserva di carburante adeguata per l'operatività del PNRA sono stati installati nel tempo 3 serbatoi da 600 m³ ciascuno, che vengono riforniti di volta in volta dalla nave cargo-tanker. Presso la Stazione Mario Zucchelli è anche possibile effettuare attività subacquee per la presenza di una camera iperbarica. Allo stato attuale la stazione ha una superficie coperta di circa 7500 m², è dotata, a regime, di 80 posti letto, che, in casi eccezionali, possono diventare 120. I servizi sono stati adeguati di conseguenza, non solo dotando la stazione di laboratori commisurati alle varie attività di ricerca, ma anche migliorando le prestazioni dei vari impianti. In particolare, i sistemi interessati sono quello di produzione e distribuzione di energia elettrica e termica e l'impianto di cogenerazione che permette il recupero dell'energia termica prodotta dai generatori. La stazione è inoltre dotata di un dissalatore ad osmosi inversa, con una produzione media di acqua dolce di 14 m³/giorno, un depuratore per le acque reflue, un inceneritore, un liquefattore per l'azoto e uno per l'elio ed un acquario, composto da 6 vasche con sistema di controllo della temperatura, per lo studio degli organismi marini.

Per controllare a distanza i dati rilevati dai vari osservatori, è stato messo a punto il sistema di alimentazione AIM (Modulo Integrato Automatico) tramite piccoli generatori diesel che hanno funzionato in esercizio continuo da Gennaio 1991 fino a Ottobre 1997. In tale data è stato installato un nuovo modulo per la produzione e distribuzione di energia elettrica agli osservatori scientifici, denominato PAT (Piattaforma Automatica Telecontrollata). Il modulo comprende sei elettrogeneratori Diesel più un quadro di controllo, il tutto inserito in un container ISO 30' permette



Baia Terra Nova - 20 anni dopo

la trasmissione dati in condizioni di base non assistita. Tra i servizi presso la Stazione Mario Zucchelli, oltre ad una piccola sala chirurgica e pronto soccorso, esiste una sala operativa, attiva 24h24 per il coordinamento di tutte le operazioni, anche remote. Il servizio di meteorologia fornisce previsioni meteo per la pianificazione e l'assistenza a tutte le attività della stazione, in particolare a quelle aeree. Allo scopo vengono utilizzate sia misure in loco (15 stazioni meteo + 2 stazioni di radiosondaggio), sia i risultati di due modelli numerici; completano il quadro due stazioni per la ricezione di immagini dai satelliti meteorologici, dalle quali sono anche ricavate le mappe dei ghiacci quale ausilio alla navigazione, e la fornitura settimanale, dall'Italia, di immagini radar ad alta definizione del ghiaccio marino.

Stazione Concordia

Già dalla IX spedizione (1993-1994) furono effettuate le prime ricognizioni sul plateau antartico, nell'ambito dell'accordo italo-francese, per la realizzazione di una stazione scientifica. Per la costruzione venne scelta la località di Dome C, considerata il sito di eccellenza per le ricerche di astronomia e astrofisica, scienze dell'atmosfera, glaciologia e paleoclima, biologia e medicina, telerilevamento. La stazione, denominata Concordia, si trova a 3233 m s.l.m., 75° 06' S, 123° 21' E, è distante 1200 km dalla stazione Mario Zucchelli e 1100 km dalla stazione francese Dumont d'Urville.

La sua costruzione ha richiesto un lungo periodo preparatorio, durante il quale i materiali per la realizzazione furono trasportati tramite traverse (convogli di mezzi cingolati trainanti slitte e/o rimorchi) che partivano da Cape Prud'Homme, in prossimità della stazione francese di Dumont d'Urville; soltanto durante la XV spedizione (1999-2000) furono gettate le basi per la stazione permanente. Nel frattempo, durante la campagna 1996-1997, fu iniziata l'installazione di un campo, denominato "campo di montaggio", dedicato al personale logistico ed al personale del programma di perforazione profonda EPICA che veniva svolto in parallelo. All'inizio delle attività le strutture di supporto a disposizione erano: 1 caravan 10x3 m, dotato di 6 posti letto, cucina, doccia, WC elettrico e gruppo elettrogeno, 1 container con 4 posti letto, 1 container con 1 WC elettrico e spazi uso deposito ed 1 container deposito attrezzi. Durante la campagna furono costruite 4 tende dormitorio da 6 posti letto, 1 tenda multiuso adibita a sala mensa - uffici - tempo libero, 2 tende deposito, 1 tenda perforazione; un gruppo di 3 container ISO 20' contenevano 2 gruppi elettrogeni da 200 kVA ed il sistema di produzione acqua. L'infermeria, una cabina letto e la sala radio erano alloggiati in altrettanti container; 2 depositi di carburante, uno di gasolio e di benzina ed uno di kerosene avio Jet A1 furono realizzati in aree appositamente predisposte. A fine campagna erano disponibili complessivamente 35 posti letto. Durante la spedizione successiva furono migliorate le comunicazioni con nuove installazioni di antenne HF da 12 m, di un sistema interlink VHF-HF ed un sistema satellitare digitale INMARSAT standard B; fu installata e posta in esercizio una stazione meteorologica VAISALA AW11; fu montata la zona giorno del campo di montaggio (8 container) corredata di impianti idraulici ed elettrici; furono altresì montati 1 tenda officina, 1 tenda garage, edifici buffer, laboratorio 1 (43 m²) e 2 (25 m²). Per l'immagazzinamento durante l'inverno delle carote di ghiaccio fu



Le due torri della stazione franco-italiana Concordia a Dome C

realizzato un magazzino a 6.4 m sotto la superficie nevosa. Il campo di montaggio, ancora funzionante nonostante l'apertura della Stazione Concordia, può alloggiare, durante il periodo estivo (per cui è detto anche campo estivo) fino ad un massimo di 55 persone.

La stazione Concordia è costituita da 2 edifici cilindrici uniti da un corridoio. In uno dei cilindri, denominato "rumoroso", si trovano: cucina, mensa, zona tempo libero, magazzini, officine, uffici; nell'altro, denominato "calmo", si trovano: zona notte, infermeria, laboratori, altri uffici. Ogni edificio ha un diametro di 18,5 m, un'altezza di 11 metri su 3 piani, ciascuno di 250 m², ed un'altezza totale di 14 m; il tutto per una superficie utile complessiva di 1800 m² (compresi gli impianti di servizio). Ogni edificio poggia su 6 grandi piedi esagonali che possono essere alzati o abbassati per compensare lo sprofondamento nella neve degli edifici. La ricettività prevede 32 persone nella stagione estiva e 16 in quella invernale. Ogni persona può usufruire di 200 litri di acqua al giorno, di cui 50 sono ottenuti dalla fusione della neve, e 150 sono prodotti dal riciclo delle acque grigie. La stazione, nella XX spedizione (2004-2005), è divenuta operativa rimanendo aperta durante l'inverno australe.

A partire dalla XX spedizione, ed in concomitanza con il primo inverno in cui la Stazione Concordia è stata operativa, sono state installate una stazione meteorologica di riferimento per il sito ed una stazione di radiosondaggi, che misura i profili verticali delle grandezze meteorologiche dal suolo a circa 20-30 km di quota.

I mezzi di trasporto navale

Di solito una spedizione in Antartide richiede almeno una nave idonea alla navigazione tra i ghiacci. La nave è scelta tenendo conto delle esigenze della spedizione, che comprendono il trasporto di persone, di materiali e carburante, oltre alle attività di ricerca, tipicamente oceanografia e geofisica in mare.

Per arrivare in Antartide le spedizioni italiane hanno utilizzato, nel corso degli anni, navi appartenenti a varie società armatrici. Fino alla V spedizione le navi erano utilizzate per trasferire, dall'Italia, materiali e mezzi e, dalla Nuova Zelanda, il personale. Ancora oggi ricercatori e tecnici giungono a Christchurch (Nuova Zelanda) con voli di linea e da qui proseguono per l'Antartide con mezzi noleggiati dal PNRA. Le spedizioni italiane all'inizio hanno utilizzato navi noleggiate nel Nord Europa. La prima nave, la *Polar Queen*, apparteneva ad una compagnia norvegese, era una rompighiaccio di classe A1 e salpò dal porto di Genova il 27 Ottobre 1985 per arrivare nel porto di Lyttelton, Christchurch, il 6 Dicembre 1985. Durante questo anno, e nei due anni successivi, la nave ebbe la funzione anche di nave appoggio. Il personale veniva trasferito a terra la mattina per svolgere le proprie attività, chi scientifiche, chi logistiche, e riportato in nave la sera; questo fino a quando la base non fu idonea per ospitare in sicurezza tutto il personale.

Nelle spedizioni successive furono impiegate nell'ordine le seguenti navi: la motonave *Finnpolaris* della Finlines di Helsinki (1986-1987 e 1987-1988); la motonave *Barken* della società svedese Ahlmark (1988-1989 e 1989-1990).

A partire dalla VI spedizione, fu noleggiata l'*Italica* una grossa nave da carico della società di navigazione Diamar, con sede a Napoli, costruita nella ex Unione Sovietica ed opportunamente modificata e attrezzata. Da allora l'*Italica*



è stata utilizzata in tutte le spedizioni, oltre che per il trasporto di passeggeri, merci e combustibile, per svolgere ricerche di oceanografia fisica, chimica e biologica. Per ricerche geofisiche in mare, in area antartica e periantartica, sono state impiegate varie navi; tra cui, più volte, la nave *OGS-Explora* dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale di Trieste (dalla spedizione 1987-88 alla 1991-92, nelle 1993-94, 1994-95, 1996-97 e 2003-04). Inoltre, per specifici programmi nell'ambito di collaborazioni bilaterali con la Russia e con l'Argentina sono state usate anche le navi russe *Strakhov* (1993-94) e *Gelendzhik* (1995-96) e l'argentina *Puerto Deseado* (1999-2000); in un programma congiunto con l'Australia è stata utilizzata la nave *Tangaroa* (1999-2000). La nave *Polar Queen* è stata impiegata anche durante la terza spedizione (1987-88) per ricerche di oceanografia fisica e biologica, mentre la nave *Cariboo*, della società francese Feronia International Shipping, è stata utilizzata nella quinta (1989-90) e sesta (1990-91).

I mezzi di trasporto aereo

A partire dalla V spedizione (1989-1990) entra in scena, complementare alla nave, il mezzo aereo, oltre a ridurre i tempi di percorrenza dalla Nuova Zelanda all'Antartide, ha ampliato di due mesi la durata della spedizione; esso utilizza

una pista preparata sul ghiaccio marino antistante la stazione. Per 11 anni è stato usato un Hercules C-130 dell'Aeronautica Militare, a partire dalla XVII spedizione (2001-2002), a causa di impegni operativi da parte dell'Aeronautica Militare Italiana in missioni di pace, è stato noleggiato un L 382-G, della società SAFAIR, del tutto simile al C-130, ma più confortevole. Fin dalla prima spedizione sono stati regolarmente presenti gli elicotteri (da 2 a 4 in ogni spedizione in base alle attività), insostituibili per i collegamenti nave-terra e per i trasferimenti a medio raggio di personale e di attrezzature leggere e poco ingombranti. Per



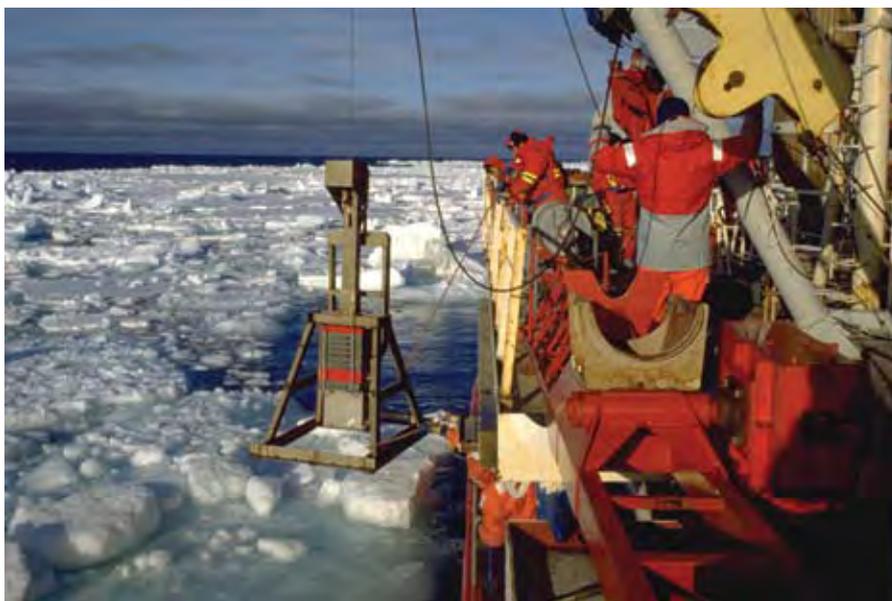
aumentare il raggio d'azione delle varie attività di ricerca, e per poter raggiungere rapidamente il sito di Dome C, dove è stata realizzata la stazione Concordia, a partire dalla XI spedizione (1995-1996) sono stati impiegati 1-2 velivoli bimotore turboelica leggeri DHC "Twin Otter", equipaggiati con sci per atterrare su piste naturali innevate. Questi aerei sono stati noleggiati presso una società canadese, che già forniva lo stesso tipo di aerei al programma polare USA che opera presso la vicina stazione di McMurdo, con evidenti vantaggi reciproci in caso di manutenzione o di avaria. I Twin Otter si sono rivelati molto versatili sia per le ricerche scientifiche che per la logistica.



Grandi Infrastrutture di Campagna

Il sistema delle Grandi Infrastrutture di Campagna (GIC) ha lo scopo di potenziare il Programma Nazionale di Ricerche in Antartide in termini di infrastrutture e/o strumentazioni da impiegare sia presso le basi scientifiche sia sulle navi da ricerca. Il GIC è articolato in cinque aree tematiche che sono, a loro volta, articolate in pool di strumenti, piattaforme complesse e osservatori consolidati:

- Esplorazione in aree continentali e osservatori per la geofisica della Terra solida
- Osservatori atmosferici
- Esplorazione geologico-geofisica marina
- Oceanografia fisica
- Laboratori presso stazioni antartiche



Box-corer per campionare i sedimenti del fondo marino

Sistema Interlaboratorio Antartico

Il Sistema Interlaboratorio Antartico (SIA) ha lo scopo di potenziare in modo coordinato una rete di laboratori in Italia, dove sono concentrate strumentazioni di rilevante valore scientifico e tecnologico, di ampio interesse per la comunità scientifica antartica (nazionale e no) e da essa immediatamente utilizzabili, e destinate all'esame, caratterizzazione e analisi dei materiali inorganici e organici raccolti in Antartide.

I sei nodi disciplinari su cui è articolato il SIA sono:

- Chimica e tossicologia ambientali
- Chimica e fisica del ghiaccio
- Chimica e fisica dei materiali geologici
- Cartografia e telerilevamento
- Biologia dei sistemi antartici
- Taratura di apparecchiature oceanografiche e di campagna



Particolare dello spettrometro di massa per gas nobili



Il Museo Nazionale dell'Antartide

Felice Ippolito

"... Esiste nel nostro pianeta un laboratorio naturale per lo studio dei grandi problemi del futuro. Questo laboratorio è l'Antartide, il continente più affascinante e inesplorato della Terra. ..."

Felice Ippolito

Lo svolgimento delle ricerche in Antartide ha comportato la raccolta di reperti e la costituzione di importanti collezioni biologiche, glaciologiche, geologiche, mineralogiche e paleontologiche. La valorizzazione di queste collezioni e, soprattutto, la diffusione e divulgazione delle problematiche affrontate dalla ricerca italiana in Antartide hanno portato alla costituzione del Museo Nazionale dell'Antartide, istituito con decreto del Ministro dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica, 2 Maggio 1996, e dedicato a Felice Ippolito che ne fu il primo Presidente. Il Museo ha il compito della conservazione, dello studio e della valorizzazione dei reperti acquisiti nel corso delle spedizioni scientifiche e di ogni altra testimonianza relativa alla presenza italiana in Antartide. Al Museo è, altresì, affidato il compito di promuovere la diffusione dei risultati dell'attività scientifica svolta in Antartide.

Il Museo è strutturato come centro interuniversitario tra gli atenei di Genova, Siena e Trieste. Presso ogni Università è stata organizzata una sezione del Museo differenziata per competenze scientifiche: biologico-ecologiche (sezione di Genova), geologico terrestri e glaciologiche (sezione di Siena) e geologico marine (sezione di Trieste).



L'area dedicata alla spedizione di Cepparo in Antartide presso la sede espositiva di Trieste.

Centri espositivi

I centri espositivi sono strutture dedicate in modo prioritario alla diffusione delle conoscenze sull'Antartide ed alla migliore fruibilità del patrimonio scientifico e del materiale espositivo da parte del visitatore ed all'ampliamento degli strumenti interattivi. La sede espositiva principale si trova a Genova, presso il Porto Antico, è stata inaugurata il 2 Ottobre 1998 e ogni anno è visitata da migliaia di persone.



Visitatori "sotto il pack" ricostruito presso la sede espositiva di Genova

Centri studi e sorting centre

Centri studi e *sorting centre* sono strutture dedicate alla raccolta, catalogazione e conservazione dei reperti. La sede di Genova coordina il *sorting* di organismi biologici animali e vegetali che riguarda campioni di benthos, plancton e necton. A Genova sono conservati 1500 campioni di plancton, 1500 di benthos e 120 di necton. Presso il Dipartimento di Biologia ed Ecologia Marina dell'Università degli Studi di Messina sono presenti circa 500 ceppi batterici. Presso il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale di Genova, la Banca Campioni Ambientali Antartici conserva, a basse temperature (-30°C per le matrici abiotiche e a -80°C per le matrici biotiche), le matrici di circa 2092 campioni. Uno specifico *data base* raccoglie tutte le informazioni sui campioni (spedizione, anno, dati relativi alla classificazione, ubicazione del campione).

Il *sorting* di rocce, minerali, fossili e ghiaccio è coordinato dalla sezione di Siena. Il numero totale di campioni di rocce conservate e catalogate presso la petroteca è di 17500 e comprende i campioni delle 20 spedizioni italiane in Antartide. Il *data base* GeoData contiene informazioni su tutti i campioni collezionati durante le 20 spedizioni in Antartide. Il GIS delle rocce antartiche conserva le localizzazioni geografiche di 13.000 campioni provenienti da diverse località antartiche. Questi dati GIS sono illustrati e liberamente scaricabili dalle pagine web del Museo.

La collezione di meteoriti consiste di 1110 esemplari di cui circa 750 antartici recuperati nel corso delle sette campagne di ricerca effettuate in ambito PNRA. E' una delle collezioni più importanti d'Italia per numero e varietà ed è la quarta al mondo per numero e varietà di meteoriti antartiche dopo la collezione statunitense, giapponese e quella cinese. Il *data base* METBASE raccoglie tutte informazioni sulle meteoriti. Cataloghi cartacei della collezione vengono pubblicati regolarmente su riviste internazionali di settore, oltreché in formato elettronico nella pagina web del Museo. Per le meteoriti antartiche è stato, inoltre, realizzato un GIS con la localizzazione geografica di ritrovamento.

Il *sorting* del ghiaccio è curato dalla sede tematica Glaciologia, presso l'Università di Milano Bicocca. I campioni conservati riguardano principalmente le carote prelevate dalle perforazioni superficiali condotte a Baia Terra Nova e nelle traverse ITASE, oltre a campioni di ghiaccio prelevati in Groenlandia, sulle Alpi e dalla perforazione EPICA a Dome C.

Il *sorting* del materiale sedimentario marino è curato dalla sede di Trieste. La collezione consiste di 240 carote di sedimenti, 1061 campioni di sedimenti marini e complessivi 487 campioni di sedimenti non marini. I dati sono raccolti in un *data base* che, oltre alle caratteristiche del materiale, riporta la mappatura e l'ubicazione della zona di prelievo.

Centri di documentazione

I centri di documentazione sono dedicati a raccogliere riviste, materiale librario, audiovisivi, prodotti multimediali sempre aggiornati ed a completa disposizione sia di ricercatori specializzati, sia di scuole ed insegnanti che possono trovare supporto per approfondimenti sulle tematiche antartiche.



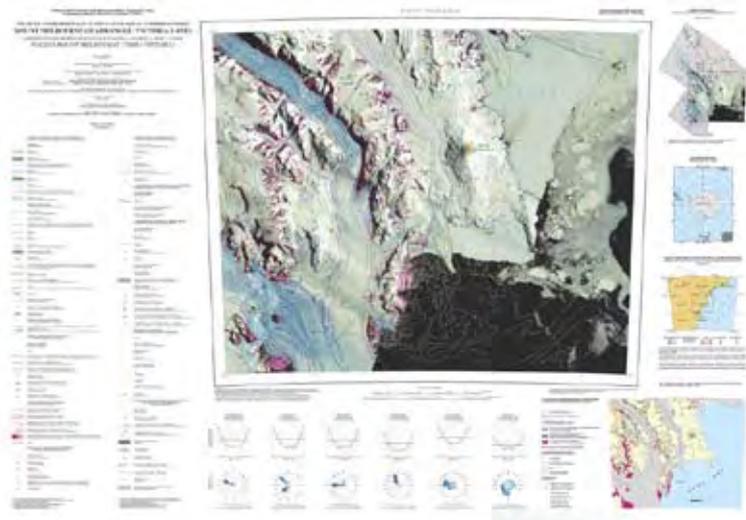
La biblioteca e cartoteca presso la sezione di Siena

La biblioteca del Museo Nazionale dell'Antartide raccoglie oltre 8000 titoli, pubblicati a partire dal 1840, riguardanti i molteplici aspetti dell'Antartide, dal diritto internazionale alle scienze della Terra, dalla conservazione dell'ambiente alla divulgazione scientifica, dalla biologia all'esplorazione.

Attività editoriale

Il Museo, mediante *Terra Antartica Publication*, cura dal 1994 la pubblicazione e distribuzione di *Terra Antartica – An international Earth Science Journal* e, dal 1998, del bollettino *Terra Antartica Reports*, oltre che di volumi tematici quali *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes* e *Antartide – Terra di scienza e riserva naturale*, volume finanziato dal MURST nell'ambito dei progetti della diffusione della cultura scientifica.

Cura inoltre la stampa e la diffusione di tre serie di carte tematiche alla scala 1:250000: *Antarctic geological map series*, *Antarctic geomorphological and glaciological map series*, *Antarctic magnetic map series*.



Sito internet www.mna.it

Il Parlamento in Antartide

Il Parlamento si è occupato dell'Antartide a partire dal 1980 con la ratifica del Trattato Antartico (legge 963/1980). L'istituzione e il finanziamento del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA) sono legati ai nomi di L. Granelli (legge 284/1985), A. Ruberti (legge 380/1991) e P.L. Bersani (legge 266/1997). Il Museo Nazionale dell'Antartide è regolato dai decreti ministeriali 02.05.1996 (G. Salvini) e 01.08.1996 (L. Berlinguer). Il decreto 26.02.2002 (L. Moratti e A. Marzano) ridefinisce gli organismi di attuazione e di gestione del PNRA.

Nel corso dei 20 anni alcuni parlamentari italiani hanno visitato l'Antartide e qui raccontano la loro esperienza.

Sen. Giovanni Urbani: Nell'estate antartica 1997-98 sono stato il primo uomo politico a visitare la base antartica italiana di Baia Terra Nova. Sono stati quindici giorni straordinari: sulla costa e sull'immenso plateau continentale; poi al ritorno sulla nave Italica fra i ghiacci del Mare di Ross e le burrasche dell'Oceano Meridionale.

La più intensa delle moltissime emozioni? A Mid Point dove il piccolo aereo che ci portava alla base italo-francese di Dome C, è sceso per rifornirsi di carburante. Fermo e solo, guardo il piatto di ghiaccio, sgombro di tutto, che si estende a perdita d'occhio fino al lucido orizzonte; cerchio perfetto da cui si alza come una cupola di ghiaccio la volta del cielo. Sottile sgomento e intensa ammirazione di fronte alla bianca infinitezza che, affascinante e paurosa, mi circonda ed avvolge in un silenzio totale. La più significativa delle constatazioni? Il grande successo organizzativo e scientifico dell'Italia. Giunto, fra gli ultimi, oltre vent'anni fa, in ritardo rispetto agli altri paesi di lunga tradizione antartica, il nostro paese - grazie a uomini come Stocchino, Ippolito e il vulcanico Zucchelli - si è collocato ai primi posti, acquisendo grande autorevolezza nella collaborazione con gli altri paesi: sul campo e negli stessi organismi internazionali di "governo" dell'Antartide. Prima di tutto per l'efficacia del modello logistico-organizzativo che in una quotidiana, insonne interazione con gli altri sistemi logistici specie contigui - come quelli francesi e americani - deve costruire l'ambiente idoneo al dispiegamento delle attività di ricerca scientifica in condizioni ottimali e di massima sicurezza. Un grande cantiere: così mi è apparso il sistema logistico di Zucchelli, ma operante nelle condizioni estreme dell'ambiente antartico fra i più ostili e proibitivi della Terra. Altrettanto riconoscimento negli intensi programmi di collaborazione internazionale ha ottenuto nel corso degli anni la comunità scientifica antartica italiana. Nei numerosi colloqui con scienziati e ricercatori - ricordo per tutti il glaciologo Orombelli -, ho potuto cogliere l'impegno, la forte motivazione, la serietà ed anche il rigore dei ricercatori italiani in Antartide. Ma la cultura delle "grandi imprese" pacifiche non è consolidata nel nostro paese che crede ancora troppo al piede di casa e che il piccolo è bello. Lo dimostra anche l'impegno della politica - governi e parlamento - verso il PNRA. La scelta politica c'è stata e significativa nel corso degli anni. E tuttavia è stato un impegno sempre difficoltoso, con alti e bassi. Non si è consolidato sulla base di una forte coscienza del fine e di una cultura popolare diffusa, come in altri paesi.

Sen. Antonino Cuffaro (già Sottosegretario di Stato): Una riunione dei ministri della ricerca scientifica dei paesi firmatari del Trattato Antartico sul finire del '98, promossa dalla Nuova Zelanda col suggestivo nome di "Ministerial on ice" mi ha offerto l'eccezionale occasione di visitare l'Antartide e di essere il primo (e credo ancora l'unico) uomo di governo, in carica, a mettere piede nella nostra stazione scientifica di Baia Terra Nova. Non è il caso qui di descrivere le emozioni profonde che ho provato durante il viaggio e le tracce che sono rimaste nella mia memoria della straordinaria esperienza che ho vissuto.

Mi interessa invece ricordare con quale interesse e con quale crescente orgoglio io abbia avuto modo di constatare l'alto livello con cui si manifesta la presenza italiana nel panorama della ricerca antartica, il prestigio internazionale di cui godono i nostri ricercatori e la nostra stessa organizzazione, l'efficienza della nostra base. E posso ricordare le espressioni ammirazione che essa suscitava nei Ministri degli altri Paesi. L'ho visitata, la base, laboratorio per laboratorio, angolo per angolo incalzato dall'entusiasmo e dalla tenacia dell'indimenticabile ingegner Zucchelli felice di incontrare sul posto finalmente "un ministeriale" per potergli mostrare i risultati di tanti sforzi e di tanto impegno. Ho incontrato, si può dire, tutti i ricercatori, i tecnici, gli operai della nostra stazione. Ho trovato serietà, passione, competenze eccezionali, convinzione per i progetti che si stavano realizzando e che, debbo dire, fanno onore al nostro paese. Dall'esperienza sono uscito con la profonda convinzione che ciò che il nostro Paese ha impiegato di risorse in Antartide è servito a costituire un grande patrimonio di conoscenze, di rapporti internazionali, di legami preziosissimi per tutto il sistema di ricerca nazionale. Ne ho tenuto conto nei miei successivi atti al Ministero e negli interventi in Parlamento. Credo che proprio dalla prova diretta a Baia Terra Nova sia venuto il mio impegno per aumentare i fondi per il PNRA, cresciuti infatti nei due anni successivi, spostare il peso dei finanziamenti sulla ricerca, le misure per creare una struttura di coordinamento della gestione stessa del programma, la ristrutturazione della nave *Explora*, il rilancio della sua attività. Mi auguro che in futuro si possa garantire sostegno e tranquillità a chi fa un lavoro d'eccezione in un luogo di eccezione per lo sviluppo delle conoscenze e direttamente ed indirettamente a grande vantaggio del nostro Paese.

On. Giuseppe Rossetto: Raccontare l'esperienza di una visita antartica senza indulgiare sulle emozioni personali che un viaggio simile dà non è facile, ma credo sia più gradito a coloro che hanno lavorato, lavorano e lavoreranno alle spedizioni scientifiche italiane. Il PNRA si trovava nel 1999, come è accaduto spesso - anzi credo sempre - a dover negoziare la propria sopravvivenza alla scadenza del rifinanziamento, che la solita legge di bilancio, da qualsiasi parte politica portata avanti, valutava di non garantire. Ricordare invece il grande valore della missione in termini di crescita di immagine del nostro paese, grazie ai nostri scienziati che lavorano in un luogo senza frontiere, alla pari con i più importanti ricercatori delle migliori università del mondo e di altri uomini, quelli che garantiscono la logistica, facendo della base italiana un gioiello di accoglienza e di efficienza, credo sia il migliore modo per testimoniare della positività assoluta del PNRA.

Sono i denari pubblici meglio spesi che nella mia vita di parlamentare ho potuto vedere. Non che io abbia "tracciato" tutto il bilancio dello stato, dove sicuramente ci sono voci riferite alla salute ed al sociale che non devono nemmeno entrare in classifica, ma certamente il ritorno in immagine a livello di relazioni internazionali nella "elite che conta" e soprattutto il contributo scientifico delle ricerche per la salvaguardia ambientale del nostro pianeta sicuramente valgono molto di più del budget annuale destinato.

In conclusione il mio augurio, non al PNRA, non alla comunità scientifica, ma all'Italia stessa non può che essere quello di sperare in una lunga vita di questa eccezionale esperienza.

Sen. Sauro Turroni (già *Presidente della Commissione Ambiente della Camera*): Nel 1999 ho avuto il privilegio, come ebbe a dirmi una gentile signora a Christchurch, di recarmi in Antartide in qualità di *distinguished visitor* per prendere visione delle attività del progetto internazionale Cape Roberts al quale partecipava l'Italia e delle altre attività svolte nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerca in Antartide. Si è trattato di una esperienza eccezionale sotto diversi punti di vista: l'eccezionalità dei paesaggi e la straordinaria bellezza dei luoghi uniti alla eccezionalità della fauna si coniugavano con l'eccellenza delle nostre ricerche, con la stima ed il prestigio acquisito sul campo dai nostri ricercatori, con l'efficienza e la sicurezza del nostro sistema logistico. In particolare, partecipando ad alcune riunioni collegiali degli studiosi dei diversi paesi impegnati nel progetto Cape Roberts, che vedeva impegnati Stati Uniti, Australia, Nuova Zelanda, Germania, Regno Unito e Italia, per ricostruire il clima del passato attraverso lo studio di carote di sedimenti prelevate ad oltre mille metri di profondità al di sotto del fondale marino, ho potuto apprezzare l'alta considerazione di cui godono i nostri ricercatori. Anche gli altri esperimenti scientifici che vengono svolti in Antartide dagli italiani mettono in evidenza la qualità della ricerca e il suo strettissimo collegamento con le principali emergenze ambientali del pianeta, a cominciare dai cambiamenti climatici.

L'Antartide deve essere assolutamente preservato dallo sfruttamento e conservato come un santuario ambientale unico e preziosissimo, dalla cui integrità dipende l'equilibrio del pianeta e nel quale possono e devono essere compiute tutte le necessarie ricerche scientifiche per comprendere i fenomeni naturali e di origine antropica che influiscono su di esso. Per tutti questi motivi il Governo deve assicurare la continuità delle risorse e una programmazione pluriennale delle attività polari.

Relazionando al parlamento sulla missione compiuta ebbi a dire che era necessario evitare la proliferare di basi, limitare la loro espansione incontrollata e evitare che la stessa ricerca potesse diventare fonte di inquinamento o di alterazione di un equilibrio fragilissimo, che il nostro paese doveva impegnarsi per la limitazione del turismo il cui impatto poteva provocare danni irreversibili: tutti principi assolutamente attuali ed è per questo che diventa indifferibile approvare finalmente una legge che dia attuazione agli obblighi derivanti dal Protocollo di Madrid sulla Protezione Ambientale dell'Antartide.

On. Salvatore Cherchi: Nel gennaio del 2001, ho avuto la fortuna di visitare l'Antartide, con il collega Guido Possa, nell'ambito di una missione ufficiale della Camera dei Deputati. Come relatore della legge finanziaria per il 2001, avevo studiato il PNRA, al fine di valutare la congruità del finanziamento. Fu la Commissione Scientifica Nazionale per l'Antartide a sollecitare la ricognizione sul posto per dare conto dell'uso degli importanti, ancorché insufficienti, finanziamenti assegnati al Programma, dal Bilancio dello Stato. La visita ha riguardato la stazione italiana della Baia di Terra Nova, la stazione americana di Mc Murdo e la stazione italo-francese di Concordia. Siamo stati accompagnati dal compianto Direttore del Progetto Antartide, Ing. Mario Zucchelli, persona seria, organizzatore di un pezzo d'Italia che vidi funzionare bene, in un ambiente difficile, prematuramente scomparso cui è stata giustamente intitolata la base di Baia Terra Nova. La visita ha consolidato, in me, due conclusioni. La prima è di carattere strettamente politico: l'Italia deve avere un ruolo attivo, come condizione per essere un soggetto autorevole nell'ambito del Trattato per l'Antartide che sperimenta un modo nuovo di gestire un continente appartenente a tutta l'umanità. Quel modello potrebbe tornare utile anche per altre situazioni. Il controllo dell'accesso allo spazio non è forse argomento di stretta attualità? La seconda conclusione è di carattere scientifico: in Antartide si accumulano conoscenze essenziali, sul passato, sul presente e sul futuro prevedibile dello stato della Terra. Ciò che si studia in Antartide, influenza le decisioni politiche sullo sviluppo sostenibile. Il ruolo scientifico dell'Italia è rispettato. La logistica è efficiente. Questo è possibile anche grazie ad un modello operativo ben funzionante, imperniato non su un ente finalizzato ma su un programma che stimola apporti scientifici dalle istituzioni scientifiche italiane con notevole beneficio in rapporto al costo. La cooperazione internazionale è un altro forte risultato ottenuto dal PNRA: cooperazione sul piano scientifico, delle relazioni politiche e umane. A Dome C, dove la perforazione del ghiaccio aveva già raggiunto una profondità di quasi 1500 metri, all'ora di cena, intorno alla tavola c'erano italiani, francesi, un giapponese, un russo, un danese e due canadesi. Avevano passato la giornata, tutti insieme, ad estrarre carote, lavorando a trenta gradi sotto lo zero, per analizzare il passato e anticipare il futuro di questa nostra Terra.

Riconosciuto il merito del buon risultato, vorrei assicurare che i fondi del PNRA sono ben spesi e che il PNRA andrebbe coerentemente rafforzato.

Senatore Guido Possa (già *Vice Ministro*): Fine gennaio 2001. Antartide. Base USA di Mc Murdo. Dopo un viaggio aereo di trentasei ore dalla madrepatria l'on. Salvatore Cherchi ed io arriviamo su quel continente ghiacciato. Siamo in visita alle attività italiane su incarico del Presidente della Camera dei Deputati, on. Violante. Luminosità abbacinante. Neve d'ogni dove. Una corona di grandi montagne e strepitosi ghiacciai. Cielo trasparentissimo. Sole, non una nuvola. 20 ° C sotto zero. E' stato un amore a prima vista. Ringrazio ancora Salvatore per aver insistito per questo faticoso viaggio. Dopo poco incontriamo l'Ing. Mario Zucchelli, che finalmente conosco di persona. Affabile, ci dà una mano a caricare i bagagli su un piccolo aereo con gli sci al posto delle ruote, un Twin Otter. Subito dopo si parte: dobbiamo raggiungere a Dome C la base italo-francese di Concordia, situata su plateau antartico a oltre 3000 metri di quota. Pur limitata a pochi giorni, la visita fu estremamente interessante. Ricordo in particolare l'impressione molto positiva avuta nella permanenza nella bellissima base italiana di Baia Terra Nova e negli incontri con il personale operativo della base e con le varie équipes di ricercatori al lavoro nei dintorni. In questa occasione ho potuto personalmente constatare le grandi doti organizzative e realizzative dell'ing. Zucchelli e la sua formidabile naturale autorevolezza nella guida del personale. Del PNRA ho avuto poi la fortuna di occuparmi per cinque anni, dal 2001 al 2006, nella responsabilità di viceministro con delega alla ricerca del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. In tale veste mi sono potuto personalmente rendere conto dell'eccezionale rilievo del PNRA nel panorama della ricerca italiana, sia per l'alto livello scientifico delle tante ricerche svolte in questi venti anni in un ampio spettro di discipline, sia per l'ottima capacità organizzativa e logistica dimostrata nelle difficilissime condizioni ambientali di quel territorio, sia per le proficue collaborazioni internazionali sviluppate. Tale successo è stato reso possibile per merito della piena collaborazione delle università e dei principali enti di ricerca italiani. Tra questi una responsabilità primaria ha avuto l'ENEA, su cui è gravato il peso principale dell'impegno organizzativo per la realizzazione delle due basi antartiche e per la logistica.

Apprezzo molto l'iniziativa di questa pubblicazione che contribuirà a far conoscere meglio un'attività che onora l'Italia.



Il contesto politico internazionale e le norme nazionali

Nel 1959 su iniziativa di dodici paesi nasce il Trattato sull'Antartide per far sì che quella regione venga usata esclusivamente a fini pacifici, non divenga luogo di discordie internazionali bensì teatro di collaborazione scientifica internazionale come quella realizzata nel corso dell'Anno Geofisico Internazionale del 1957-58.

L'Italia ha sottoscritto il Trattato sull'Antartide nel 1980. Nel 1985, con la legge n. 284 - "... al fine di assicurare la partecipazione italiana al Trattato sull'Antartide, ..., è autorizzato per il periodo 1985-1991 un programma di ricerche scientifiche e tecnologiche" - viene istituito il PNRA. La prima spedizione viene effettuata nel 1985: inizia l'esplorazione del continente bianco e viene identificata l'area dove insediare la stazione scientifica, la cui edificazione inizia nel 1986. L'Italia diventa membro consultivo dell'*Antarctic Treaty Consultative Meetings* (ATCM) nel 1987; nel 1988 è ammessa come membro effettivo allo *Scientific Committee on Antarctic Research*.

La legge n. 380 del 1991, sulla base dei risultati conseguiti nel quinquennio precedente, stabilisce che il PNRA continui senza limiti temporali, fissa in almeno il 20% le risorse finanziarie da destinare alla partecipazione ad iniziative internazionali ed istituisce il Museo Nazionale dell'Antartide. Il finanziamento è assicurato fino al 1997.

Nel 1995, con legge n. 54, l'Italia ratifica il Protocollo di Madrid del 1991 ed i suoi annessi sulla protezione ambientale della regione antartica. Per consentire il proseguimento delle attività del PNRA, nel 1997, nell'ambito della legge n. 266, vengono assegnati i finanziamenti per gli anni 1998 e 1999. Mediante il rifinanziamento di questa legge si è giunti a garantire il fabbisogno finanziario e la continuazione del PNRA fino al 2005. Nel 2002, in applicazione della legge n. 266 del 1997, con decreto interministeriale del 26.02.2002, viene ridisegnata la struttura di pianificazione ed attuazione del PNRA.

Le spedizioni in Antartide

Ogni anno, dal 1985, durante l'estate australe è stata condotta una spedizione in Antartide. Nei primi anni, le campagne erano essenzialmente rivolte alla costruzione della stazione costiera di Baia Terra Nova (adesso dedicata alla memoria di Mario Zucchelli) e alla esplorazione delle aree circostanti. Nel tempo le aree investigate si sono via via estese sia sul continente sia a varie porzioni dell'Oceano Meridionale. Parallelamente è aumentato il fabbisogno di supporto tecnico-logistico, di mezzi di trasporto aerei e navali, così come è aumentato il numero dei partecipanti alle attività di campagna. Nel 1993, nell'ambito di un accordo franco-italiano è iniziata la costruzione della stazione continentale Concordia sul plateau polare.

Attualmente le campagne estive si svolgono da metà ottobre a metà febbraio dell'anno successivo; dal 2005, presso la stazione Concordia, vengono effettuate ricerche che vedono coinvolte una quindicina di persone, in completo isolamento, anche durante l'inverno australe, da febbraio ad ottobre.

Una spedizione "standard" prevede l'utilizzo di una nave cargo per il rifornimento delle stazioni e il trasporto di personale e materiali, un aereo intercontinentale per i collegamenti fra Antartide e Nuova Zelanda, mezzi aerei e navali per l'esplorazione del continente e dell'Oceano Meridionale e la partecipazione di circa 250 persone fra ricercatori e tecnici.

Dal 1985 al 2002, l'organizzazione e la conduzione delle campagne è stata effettuata dall'ENEA che ricopriva il ruolo di attuatore del PNRA; dal 2003, come stabilito nel decreto ministeriale del 2002, questo compito è stato assunto dal Consorzio appositamente costituito da ENEA, CNR, OGS ed INGV.

Lo sviluppo della complessità delle campagne antartiche è sinteticamente riassunto nella tabella sinottica.

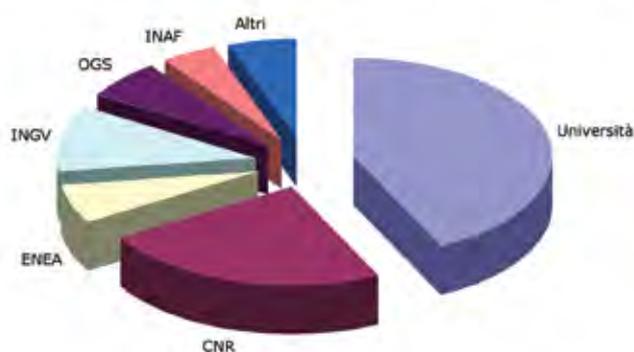
La ricerca

All'inizio l'esperienza italiana nelle ricerche in Antartide era praticamente assente. Il dibattito che fin dall'inizio ha coinvolto Ministero, università ed enti di ricerca ha riguardato l'individuazione delle tematiche e dei meccanismi di pianificazione ed attuazione dei programmi scientifici. Il PNRA era dapprima svolto all'interno di cosiddetti "poli di coordinamento scientifico" con un processo prevalente di tipo "top-to-bottom". Gradualmente, per esplicita indicazione ministeriale e in risposta al "lodo Ruberti" di destinare almeno il 20% del finanziamento ad incentivare l'internazionalizzazione, il PNRA si è progressivamente aperto, sia in termini di tematiche di ricerca, sia in termini di composizione della comunità scientifica. Le ricerche, inizialmente, erano rivolte alla caratterizzazione dei principali comparti del sistema antartico; progressivamente hanno assunto un carattere più ampio di tipo tematico sino all'attuale approccio sistemico, realizzato attraverso una matrice che vede il convergere di varie competenze disciplinari su tematiche generali di interesse globale. Queste includono il clima ed il paleoclima, l'adattamento biologico e la biodiversità, le osservazioni sistematiche verso l'interno e l'esterno della Terra (atmosfera e spazio), la geodinamica, il monitoraggio dello stato dell'ambiente globale, gli ecosistemi estremi, l'innovazione tecnologica.

Alcuni elementi di 20 anni di presenza italiana in Antartide

Anno	Finanziam. Milioni di €	Personale in campagna	Navi	Mezzi aerei	Accordi scientifici internazionali
1985	1	38	Polar Queen	2 elicotteri	
1986	15	71	Finnpolaris	2 elicotteri	
1987	26	141	Finnpolaris, Explora, Cariboo, Polar Queen	4 elicotteri	
1988	26	161	Barken, Explora	4 elicotteri	
1989	23	242	Barken, Explora, Cariboo	Hercules, 4 elicotteri	
1990	35	250	Italica, Explora, Cariboo	Hercules, 4 elicotteri	
1991	1	96	Italica, Explora	Hercules, 2 elicotteri	
1992	16	33		1 elicottero	
1993	29	225	Italica, Explora, Strakhov	Hercules, 4 elicotteri	Concordia
1994	33	340	Italica, Explora	Hercules, 4 elicotteri	CRP, Concordia
1995	23	205	Italica, Gelendzhik	Hercules, Twin Otter, 2 elicotteri	CRP, APE, Concordia
1996	24	203	Italica, Explora	Hercules, Twin Otter, 4 elicotteri	CRP, Concordia, EPICA
1997	27	287	Italica	Hercules, Twin Otter, 2 elicotteri	CRP, Concordia, EPICA
1998	25	233	Italica	Hercules, Twin Otter, 2 elicotteri	CRP, Concordia, EPICA
1999	22	270	Italica, Puerto Deseado, Tangaroa, Polar Duke	Hercules, Twin Otter, 2 elicotteri	CRP, Concordia, TESAC, BACKTAM, WEGA, EPICA
2000	22	237	Italica	Hercules, 3 Twin Otter, 2 elicotteri	Concordia, EPICA
2001	29	264	Italica	Hercules, Twin Otter, 2 elicotteri	Concordia, EPICA
2002	28,5	245	Italica	Hercules, Twin Otter, 4 elicotteri	Concordia, EPICA
2003	28,5	308	Italica, Explora	Hercules, 3 Twin Otter, 4 elicotteri	Concordia, EPICA
2004	28,5	249	Italica	Hercules, Twin Otter, 2 elicotteri	ANDRILL, Concordia, EPICA
2005	28,9	282	Italica, Explora Strakhov	Hercules, 4 Twin Otter, 4 elicotteri	ANDRILL, Concordia

Partecipazione delle istituzioni nazionali alla ricerca

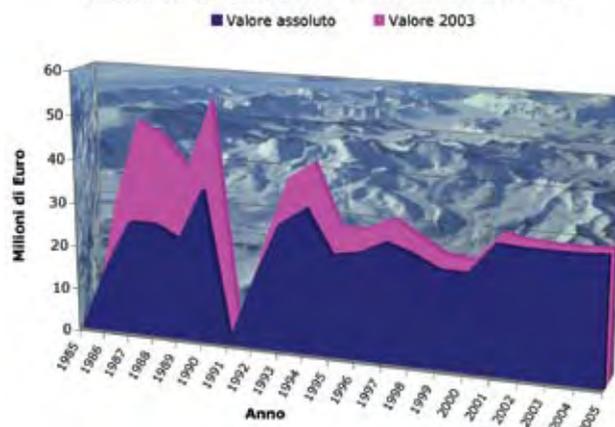


Attualmente la conduzione della ricerca vede coinvolta l'intera comunità nazionale che partecipa attraverso la presentazione di proposte di attività, valutate per il loro merito scientifico, fattibilità logistica e congruità finanziaria. Negli ultimi tre anni risultano in attività circa 100 progetti di ricerca, basati su circa 350 unità operative, che coinvolgono circa 1800 ricercatori. La composizione della comunità nazionale nella ricerca antartica è sinteticamente illustrato nella figura a sinistra dalla quale emerge il carattere "aperto" del PNRA e il contributo delle diverse istituzioni scientifiche.

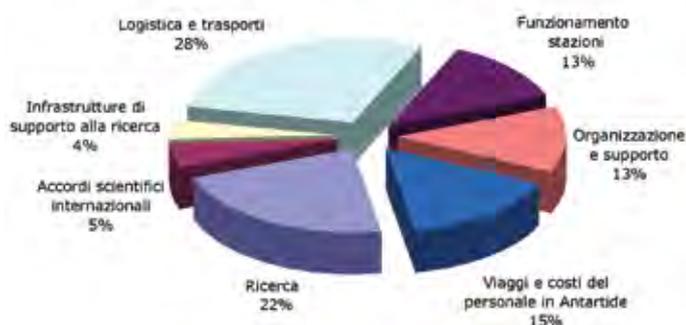
Il finanziamento e la spesa

Il finanziamento complessivo del PNRA nel corso di 20 anni è stato di circa 500 milioni di Euro e quello medio annuo è stato quindi di 25 milioni di Euro. Le assegnazioni annuali e la loro distribuzione nel tempo sono riportate nella figura a destra. Nell'ultimo triennio il finanziamento si è assestato intorno ai 29 milioni di Euro l'anno. D'altra parte, l'andamento della curva superiore, che descrive il finanziamento rivalutato secondo le rilevazioni ISTAT al 2004, indica che nell'ultimo quinquennio il finanziamento, in termini di valore reale è stato inferiore a quello del quinquennio 1985-1990 di almeno 30%.

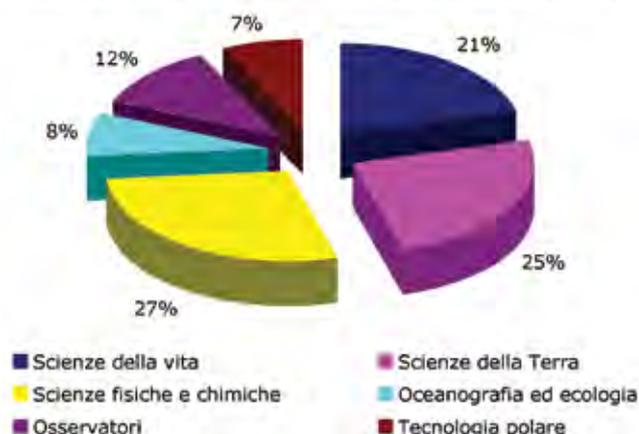
Finanziamenti annuali del PNRA dal 1985 al 2005



Ripartizione della spesa annuale



Ripartizione del finanziamento in macro-settori scientifici



La figura in alto a sinistra, che riporta la ripartizione del budget annuale fra le principali voci di spesa, mostra che quella direttamente destinata allo svolgimento delle ricerche copre circa il 30 % del budget annuale; circa il 28% della spesa è destinato alla logistica e ai trasporti, il 13% è il fabbisogno per il funzionamento del stazioni, il 15% è quanto necessario per viaggi e trattamento di missione del personale impegnato nella campagna antartica, mentre circa il 13% va coprire le spese sostenute in Italia per l'organizzazione ed il supporto alle campagne.

In termini di finanziamento di macro settori scientifici, la ripartizione è riportata nella figura in alto a destra dove emerge che circa il 75% del finanziamento è quasi equamente ripartito a sostenere le ricerche nei campi delle scienze fisiche, scienze della Terra, scienze della vita, il 12% è la spesa per le ricerche connesse agli osservatori permanenti, l'8% alle ricerche a carattere oceanografico-ecologico marino ed il 7% alla tecnologia polare.

Prospettive future

L'Italia è entrata, vent'anni fa, in punta di piedi in un ambiente ostile e sconosciuto; ha costruito un suo ruolo ed una sua credibilità sia per l'individuazione delle tematiche di ricerca di respiro globale, sia per le modalità della loro conduzione basata su un sistema a rete - nuovo nel panorama nazionale -, sia per le attività svolte nel contesto scientifico internazionale come ad esempio nello *Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR)* e nel *European Polar Board (EPB)*, ed anche nel contesto politico internazionale per l'azione svolta nell'ambito del Sistema del Trattato sull'Antartide. Un elenco dei più significativi eventi internazionali che si sono svolti in Italia è riportato nella tabella a fianco.

Meeting internazionali in Italia

1989	<i>Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) Executive Committee meeting, Siena</i>
1991	<i>III Council of Managers of National Antarctic Programmes (COMNAP), Bologna</i>
1992	<i>XVII Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM), Venezia</i>
1994	<i>XXIII SCAR, Roma</i>
1994	<i>VI COMNAP, Roma</i>
1994	<i>VI SCAR Symposium on Antarctic Biology, Venezia</i>
1995	<i>VII International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Siena</i>
1995	<i>SCAR Executive Committee meeting, Siena</i>
2003	<i>VII International Symposium on Antarctic Glaciology, Milano</i>
2005	<i>III International Conference on the Oceanography of the Ross Sea, Venezia</i>

Il sistema scientifico è adesso da considerarsi maturo e ben consolidate appaiono l'esperienza e la competenza tecnico-logistica. Le regioni polari della Terra, oltre alle loro specifiche peculiarità, mostrano sempre più evidenti caratteri di complementarità, e sono sempre più al centro dell'interesse scientifico internazionale per la possibilità di studiare e comprendere i processi a scala sia regionale sia globale. La prospettiva dell'Anno polare internazionale (Marzo 2007 - Febbraio 2009) con il suo carattere bipolare rafforza l'esigenza di un più stretto coordinamento sia scientifico sia tecnico-logistico per affrontare la ricerca nella regione antartica ed in quella artica.

Al fine consentire la presenza viva del paese nel sistema internazionale del Trattato antartico, per garantire la partecipazione italiana all'Anno polare internazionale è necessario che sia garantita la continuità di azione del PNRA. Non si può pertanto prescindere da un tempestivo e adeguato sostegno legislativo e finanziario per il mantenimento delle infrastrutture esistenti, per il rispetto degli impegni internazionali e per lo sviluppo della ricerca scientifica e tecnologica.

Ministero dell'Università e della Ricerca

P.le Kennedy 20, 00144 Roma

www.miur.it

Commissione Scientifica Nazionale per l'Antartide

c/o Ministero dell'Università e della Ricerca
Palazzo Italia, P.za Marconi 25, 00144 Roma

www.csna.it

Consorzio per l'attuazione del PNRA

c/o CR Casaccia
Via Anguillarese 301, 00123 Roma

www.pnra.it

Museo Nazionale dell'Antartide

Scienze Biologiche, Università di Genova
Via Benedetto XV 5, 16132 Genova

Scienze della Terra, Università di Siena
Via del Laterino 8, 53100 Siena

Storia dell'Esplorazione, Università di Trieste
Via E. Weiss 2, 34127 Trieste

www.mna.it

COPIT onlus

Comitato di parlamentari per l'innovazione tecnologica e lo sviluppo sostenibile
Circonvallazione Appia 113, 00179 Roma

www.copit.net

