

ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE

ANNO 51 MAGGIO-GIUGNO 2005

Il contenuto degli articoli pubblicati è di esclusiva responsabilità degli autori. La riproduzione di articoli o parte di essi deve essere autorizzata dall'ENEA.

Finito di stampare nel mese di giugno 2005

The ENEA logo consists of the word "ENEA" in a bold, sans-serif font. The letters "E", "N", and "A" are white, while the letter "E" is filled with a solid orange color. The logo is positioned on the left side of the page, above a horizontal orange line.

Direttore responsabile Sergio Ferrari

Comitato di redazione Maria Antonietta Biancifiori, Fausto Borrelli, Vincenzo Di Majo, Marco Martini, Antonio Nobili, Vito Pignatelli, Emilio Santoro, Franco Vivoli

Redattore capo Alida La Croce

Redazione Giuliano Ghisu

Collaboratori Daniela Bertuzzi, Gabriella Martini, Paolo Monaci, Elisabetta Pasta

Responsabile editoriale Diana Savelli

Redazione ENEA

Lungotevere Thaon di Revel 76, 00196 Roma, Tel. 06-36272401, Fax 06-36272720
E-mail/lacroced@sede.enea.it, Sito web/www.enea.it

Progetto grafico Bruno Giovannetti

Ada Cerrato, Nicoletta Troncon

In copertina Leonardo da Vinci, Tavola XXXIX del "De divina proportione" di L. Pacioli

Stampa Tipografia Primaprint, Via dell'Industria n. 71, 01100 Viterbo

Registrazione Tribunale Civile di Roma

Numero 6047 del 2 dicembre 1957 del Registro Stampa. Modifiche in corso

Pubblicità Primaprint di S. Badini e M. Greto s.n.c.

Abbonamento annuale Italia € 21,00, Estero € 21,00; una copia € 4,20

C.C.P. n. 59829580 intestato a Primaprint di S. Badini e M. Greto s.n.c.

Via dell'Industria, 71 - 01100 Viterbo - Tel. 0761-353676 - Fax 0761-270097

e-mail: info@primaprint.it

www.enea.it

4

PRIMO PIANO

PROGRAMMA NAZIONALE PER LA RICERCA 2005-2007

NATIONAL RESEARCH PROGRAMME 2005/2007

Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca

Migliorare la qualità della vita, accrescere la competitività delle imprese, favorire lo sviluppo sostenibile a livello globale: sono questi i tre obiettivi strategici del Programma Nazionale della Ricerca 2005-2007 approvato il 18 marzo scorso dal Comitato Interministeriale per la Programmazione economica su proposta del Ministro dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca

Improve the quality of life, raise the competitiveness of enterprises and encourage sustainable development worldwide: these are the three strategic objectives of the 2005-2007 National Research Programme approved in March 18th by the Interministerial Economic Planning Committee as proposed by the Minister of Education, Universities and Research

16

SPAZIO APERTO

IL FUTURO DELLA POLITICA EUROPEA DELLA RICERCA

THE FUTURE OF EUROPE'S RESEARCH POLICY

Segreteria tecnica della DGSSIRST del MIUR

Questo documento rappresenta il contributo italiano al dibattito sulla strategia per la ricerca europea e sugli obiettivi del 7° Programma Quadro, così come sono delineati nella comunicazione della Commissione Europea

This document represents Italy's contribution to the debate on EU research strategy and the objectives of the 7th Framework Programme, as set forth in the European Commission's communication of June 16, 2004

23

IN RICORDO DEL PROF. CARLO SALVETTI

IN MEMORY OF PROF. CARLO SALVETTI

Devana Lvrenčič e Giulio Valli

25

STUDI & RICERCHE

EBOLLIZIONE IN CONVEZIONE FORZATA IN CONDIZIONI DI MICROGRAVITÀ

FORCED-CONVECTION BOILING UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS

G. P. Celata, A. D'Orazio, M. Gervasi, A. Lattanzi, L. Simonetti, G. Zummo

L'ebollizione in convezione forzata, utilizzata nella produzione di energia e nell'industria di processo, viene ritenuta interessante anche per i satelliti per telecomunicazione e le piattaforme spaziali, a cui occorreranno sistemi di raffreddamento più sofisticati ed in grado di rimuovere elevate quantità di calore

Forced-convection boiling, a technology used in power generation and process industry, also holds interest for communications satellites and space platforms, which will need more sophisticated cooling systems that can remove large quantities of heat

38

VERSO LA NOZIONE DI BIODIVERSITÀ: EVOLUZIONE DEI PRINCIPALI CONCETTI ECOLOGICI

TOWARDS THE NOTION OF BIODIVERSITY: THE EVOLUTION OF THE PRINCIPAL ECOLOGICAL CONCEPTS

Donato Bergandi, Giulia Massini, Laura Padovani

La diversità biologica viene ormai considerata dalla comunità scientifica come una proprietà fondamentale della natura. Per comprendere il ruolo e la portata degli attuali studi sulla biodiversità, è necessario analizzare il processo storico-scientifico attraverso il quale si è arrivati alla definizione del concetto di biodiversità

The scientific community has come to recognize biological diversity as a fundamental property of nature. To understand the role and implications of current biodiversity studies, it is useful to look at the historical-scientific process whereby the concept of biodiversity was defined

51

IL CONFINAMENTO GEOLOGICO DELLA CO₂: UNA METODOLOGIA

PER AFFRONTARE IL PROBLEMA IN ITALIA

GEOLOGICAL SEQUESTRATION OF CO₂: A METHODOLOGY FOR ADDRESSING THE PROBLEM IN ITALY AA.VV.

Fattori economici e ambientali spingono il confinamento della CO₂ nel sottosuolo più profondo. L'affermarsi di tale tecnologia risulterà legata alla fattibilità tecnica, all'esistenza di sufficienti spazi di stoccaggio, alla sicurezza delle operazioni e, soprattutto, all'accettazione da parte della pubblica opinione e alla definizione dei costi

The thrust of economic and environmental factors is to confine CO₂ deep underground. The success of this technology will depend on its technical feasibility, the existence of sufficient storage space, safety during operations, and above all acceptance by public opinion and the definition of costs

73 IL CONTRIBUTO DEL GIS NELLO STUDIO DI ANALISI AMBIENTALE THE CONTRIBUTION OF GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE IN ENVIRONMENTAL ANALYSIS

Emanuela Caiaffa

L'interesse suscitato dalla Scienza dell'Informazione Geografica ha fortemente incentivato lo sviluppo di nuovi campi di applicazione seguito dalla messa a punto di nuove tecnologie, sia hardware che software, atte a soddisfare le più svariate richieste provenienti sia dal mondo della ricerca scientifica sia da quello delle politiche ambientali

Widespread interest in GIS has strongly encouraged the development of new application fields and new hardware and software technologies. Theme maps created with GIS technology make it possible to locate, analyze and improve critical environmental, social, economic and anthropogenic situations; that is, all the kinds of situations involved in the governance of a territory

81 IL TUFFATORE E LA BALLERINA: BREVE STORIA DEL MOMENTO ANGOLARE - Parte II

SCIENZA, TECNICA, STORIA & SOCIETÀ

THE DRIVER AND THE DANCER: A BRIEF STORY OF ANGULAR MOMENTUM - Part II

Fabrizio Cleri

Una sintesi storico-scientifica dello sviluppo della moderna teoria del momento angolare, e delle sue implicazioni per lo sviluppo della meccanica quantistica. La formalizzazione ad opera di due grandi figure di scienziati, Giulio Racah e Eugene Wigner

An historical and scientific account of the development of the modern theory of angular momentum and its implications for the development of quantum mechanics. The theory was formalized by two great scientists: Giulio Racah and Eugene Wigner

89 NUOVE TECNOLOGIE PER LA MEMORIA: RIPRODUZIONE DIGITALE DELLE SCULTURE DI LUCIANO MINGUZZI

NOTE TECNICHE

NEW MEMORY TECHNOLOGIES: DIGITAL REPRODUCTION OF SCULPTURES BY LUCIANO MINGUZZI

Sergio Petronilli

91 NOTIZIE DAL MONDO, DALL'UNIONE EUROPEA, DALL'ITALIA, DALL'ENEA. INCONTRI E LETTURE

CRONACHE

NEWS FROM THE WORLD, THE EUROPEAN UNION, ITALY AND ENEA.
INFORMATION ABOUT MEETINGS AND RECENTLY PUBLISHED WORKS

- dal Mondo
 - Celle a combustibile a carbone 91
 - Il Brasile punta sui biocombustibili 91
 - Scienza e Tecnologia: avanza l'Asia 91
 - Accordo spaziale Europa-India 91
- dall'Unione Europea
 - Un portale aperto per la scienza 92
 - Nucleare di terza generazione per Francia e Finlandia 92
 - La futura politica spaziale europea 92
- dall'Italia
 - XX Spedizione italiana in Antartide 93
 - Pirelli *International Award*2004 93
 - Giornata mondiale per l'ambiente 93
- dall'ENEA
 - Strumenti *on line* per prodotti verdi 94
 - Trisaia: un modello per i ricercatori per i centri di ricerca 94
- Incontri
 - Festambiente 2005 95
 - Fuel Cells Forum a Milano 95
 - HYPOTHESIS VI: l'idrogeno nei PVS 95
 - Applicazioni innovative per Galileo 95
- Letture
 - State of the World 2005 96
 - Linee guida per la definizione di un Piano Strategico per lo sviluppo del vettore energetico 96
 - I costi della non scienza 96

Programma Nazionale per la Ricerca 2005-2007

Ministero dell'Istruzione,
Università e Ricerca

primo piano

Migliorare la qualità della vita, accrescere la competitività delle imprese, favorire lo sviluppo sostenibile a livello globale: sono questi i tre obiettivi strategici del Programma Nazionale della Ricerca 2005-2007 approvato il 18 marzo scorso dal Comitato Interministeriale per la Programmazione economica su proposta del Ministro dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. Pubblichiamo un ampio stralcio degli elementi di contesto e delle indicazioni elaborate nel documento

National Research Programme 2005-2007

Improve the quality of life, raise the competitiveness of enterprises and encourage sustainable development worldwide: these are the three strategic objectives of the 2005-2007 National Research Programme approved in March 18th by the Interministerial Economic Planning Committee as proposed by the Minister of Education, Universities and Research. We publish extensive excerpts from the background provided in the document and from its recommendations

Secondo quanto previsto dal D.L. 204/1998, e a seguito delle indicazioni delle "Linee Guida" per la Politica Scientifica e Tecnologica del Governo", approvate il 19.4.2002 dal C.d.M e dal CIPE, gli obiettivi del PNR 2005-2007, sono quelli di:

- definire gli obiettivi generali e le modalità di attuazione degli interventi alla cui realizzazione concorrono, con risorse disponibili sui loro bilanci, le pubbliche amministrazioni, ivi comprese, con le specificità dei loro ordinamenti e nel rispetto delle loro autonomie ed attività istituzionali, le università e gli enti di ricerca;
- analizzare le principali prospettive e campi di intervento dell'attività di ricerca scientifica e tecnologica nel paese, approfondendone le caratteristiche e aggiornando le necessità di intervento nei settori strategici definiti nelle "Linee Guida";
- presentare il quadro complessivo degli interventi previsti in questo settore, e le scelte del Governo in merito alle priorità da attivare;
- fornire alle amministrazioni dello Stato, alle regioni, alle istituzioni, ai docenti, ai ricercatori e agli altri operatori del settore, pubblici e privati, un quadro di riferimento complessivo.

Si sottolinea particolarmente il carattere programmatico del presente documento (Programma e non Piano per la Ricerca). Esso infatti a differenza di un Piano di carattere centralizzato è diretto principalmente a definire il quadro di contesto, gli obiettivi generali, le opportunità per la ricerca italiana nel contesto internazionale e il quadro dei possibili interventi.

Occorre sottolineare da questo punto di vista che nell'ambito delle priorità nelle politiche di sviluppo e di crescita l'attività di R&S riveste, direttamente ed indirettamente, un ruolo prioritario. Essa infatti nella società della conoscenza non solo concorre all'innalzamento generale della cultura del paese, e risulta essenziale per i processi di formazione dei ricercatori, dei docenti e dei quadri tecnici di alto livello, ma rappresenta un importante fattore per stimolare e promuovere i processi di innovazione e incrementare quindi la competitività del sistema economico e produttivo. La competitività si basa naturalmente su un sistema del valore che partendo dalla ricerca trova altri importanti punti nei processi di innovazione, di interiorizzazione delle conoscenze sviluppate a livello mondiale, di sviluppo, e di supporto del mercato. Con questi processi l'attività di ricerca deve confrontarsi e, ove possibile, integrarsi.

Una trattazione organica del collegamento tra ricerca ed innovazione trascende gli obiettivi del PNR così come definiti dal D.L. 204/98. Necessari collegamenti tra innovazione e ricerca trovano trattazione in diversi dei punti analizzati dal presente Programma.

Occorre altresì tenere in debito conto che la materia concernente la ricerca scientifica e tecnologica è in costante cambiamento, sia dal punto di vista tecnico, in relazione ai continui ed incessanti avanzamenti nelle conoscenze, che per quanto riguarda l'azione di "governance" politica, la situazione internazionale e gli orientamenti in tema di finanza pubblica; per questi motivi il PNR, rappresentando un settore in rapido mutamento presenta contenuti naturalmente soggetti a rapidi ed importanti aggiornamenti; perciò il PNR sarà aggiornato annualmente, secondo quanto previsto dal D.L. 204/1998.

Ciò è reso ancora più necessario dagli elementi di discontinuità che con frequenza sempre maggiore rispetto al passato si verificano in molti settori di ricerca avanzata.

Gli elementi di contesto e le indicazioni per il PNR

Le "Linee Guida" hanno già fornito una ampia trattazione dello scenario complessivo in cui si colloca l'attività di R&S del paese. Ad esse si rinvia per una trattazione complessiva degli elementi e degli indirizzi alla base del PNR. Tuttavia i numerosi ed importanti mutamenti avvenuti a livello internazionale e le azioni sviluppate dal Governo negli ultimi anni richiedono in questa sede un opportuno aggiornamento.

l'attività di R&S riveste un ruolo prioritario

Le missioni affidate dal PNR al sistema di R&S italiano

All'attività di R&S il PNR affida quattro missioni principali:

- svolgere attività di ricerca fondamentale, libera ma di eccellenza - ricerca in quanto valore in se, da tutelare e promuovere secondo il dettato costituzionale, per lo sviluppo culturale del paese e come fonte di nuove idee e nuovi avanzamenti nella conoscenza; è l'attività che tradizionalmente è stata svolta, spesso con successo, dal nostro sistema scientifico;
- svolgere attività di alta formazione, finalizzata all'incremento qualitativo e quantitativo del capitale umano, un fattore decisivo per assicurare lo sviluppo scientifico, economico e sociale del paese;
- contribuire (anche) attraverso l'assimilazione della nuova conoscenza prodotta a livello mondiale al suo trasferimento al sistema produttivo del paese;
- contribuire con lo svolgimento di queste funzioni alla competitività del paese, in collaborazione con il sistema produttivo, per lo sviluppo di nuove tecnologie, di nuovi prodotti, processi e servizi, competitivi sul mercato globale; si tratta di un aspetto fondamentale spesso sottovalutato, che richiede una forte attenzione e un potenziamento.

Nonostante la stretta correlazione esistente nello svolgimento di queste missioni, solo recentemente, nell'ambito della definizione delle priorità nelle politiche di sviluppo e di crescita, è emerso, a livello nazionale, comunitario e internazionale, il ruolo prioritario che l'attività di R&S riveste: essa nella società della conoscenza risulta infatti direttamente determinante per la competitività del sistema economico nazionale e quindi fattore fondamentale per la generazione di ricchezza, posti di lavoro e coesione sociale.

Sono questi, in sintesi, i motivi di fondo che sono alla base del PNR.

Le linee direttive di questo programma in generale prevedono:

- di diffondere nella nostra società la considerazione che l'intero settore dell'educazione e della ricerca deve essere considerato di interesse strategico, alla base della competitività del paese, prioritario per il futuro del paese;
- di prevedere in questo ambito strategie, indirizzi ed interventi del Governo di carattere fortemente innovativo, nel quadro del programma di modernizzazione del paese;
- di allineare a questo fine il nostro sistema scientifico e tecnologico a quello dei paesi più avanzati, mettendolo in grado di fornire un contributo decisivo alla competitività del paese.

Le azioni necessarie per il raggiungimento di questi obiettivi, previste e dettagliatamente descritte nel presente PNR e con cui il Governo intende attuare i processi di cambiamento del nostro sistema scientifico e tecnologico, possono essere ricondotte alle seguenti parole chiave:

- sviluppo e valorizzazione del capitale umano per e attraverso la ricerca;
- eccellenza nelle attività di ricerca di base;
- multidisciplinarietà;
- internazionalizzazione;
- collaborazione pubblico-privato;
- concentrazione su punti di forza e settori strategici;
- utilizzo di una pluralità di fonti di finanziamento;
- valutazione.

I settori strategici di intervento, già identificati nelle "Linee Guida" sono analizzati nell'Allegato al PNR e sono rappresentati da:

- settori di rilevante interesse per l'economia del paese (beni strumentali e sistemi di produzione, microelettronica, optoelettronica, sistema agroalimentare);
- settori finalizzati ad una migliore tutela dell'ambiente, per il risparmio energetico e per la produzione di energia (energia, trasporti, clima);

R&S come
fattore
fondamentale
per la
generazione
di ricchezza,
posti di lavoro
e coesione
sociale

- tutela della salute dei cittadini (Biotecnologie);
- conservazione e promozione del patrimonio culturale del Paese (Beni culturali materiali ed immateriali).

Per raggiungere gli obiettivi di modernizzazione e quindi di cambiamento del sistema scientifico e tecnologico italiano previsti dal PNR è necessario un impegno comune, del Governo, delle forze politiche, degli stessi attori del sistema di R&S nazionale, Università, enti pubblici di ricerca, imprese, fino agli stessi ricercatori ed addetti, finalizzato a:

- considerare positivamente la necessità di adottare nuovi indirizzi, riforme, modalità operative aventi caratteristiche di discontinuità rispetto al passato,
- cooperare pienamente e contribuire con impegno alla realizzazione di questi obiettivi,
- assegnare una necessaria priorità nell'assegnazione di nuove risorse nell'ambito della definizione di obiettivi condivisi.

Competitività, innovazione e ricerca

La competitività, il cui incremento, per la parte scientifica e tecnologica, rappresenta la nuova missione affidata al sistema di R&S italiano, secondo una definizione largamente accettata, è la "capacità di una economia di produrre beni e servizi competitivi nel mercato mondiale, e di fornire contemporaneamente alla sua popolazione, su base sostenibile, un alto tenore di vita e un alto livello di impiego per tutte le persone abili al lavoro".

Uno dei più importanti fattori della competitività è rappresentato dall'innovazione, di cui l'attività di R&S è una importante determinante; l'innovazione è la capacità di sviluppare nuovi prodotti, processi e servizi, competitivi sul mercato mondiale.

L'attività di R&S risulta fondamentale non solo per lo sviluppo dei settori basati su una elevata intensità di conoscenza, ma anche per la diffusione dell'innovazione nell'intero tessuto industriale, inclusi i settori cosiddetti tradizionali o maturi.

Lo svolgimento di questa attività ha come presupposto indispensabile anche la conoscenza dello stato dell'arte e quindi l'assimilazione e l'utilizzo della nuova conoscenza che viene continuamente prodotta a livello mondiale.

L'importanza di questa attività può essere desunta dal fatto che il nostro paese contribuisce alla creazione di nuova conoscenza per ca il 4% del totale mondiale (un fatto desumibile dal numero di lavori scientifici e di brevetti prodotti dal nostro paese). Una nota di attenzione risulta indispensabile.

L'equazione più ricerca uguale più innovazione-più ricchezza-più competitività non è esatta e la sua soluzione richiede una attenta considerazione di una pluralità di fattori. La catena del valore che parte dalla ricerca e sviluppo, prosegue infatti con la produzione dei beni e servizi, la distribuzione, il marketing ed è strettamente associata a ulteriori cruciali fattori di natura finanziaria (crediti, agevolazioni etc.).

E' l'insieme di questi fattori, tra cui la R&S assume particolare rilievo, a determinare, per un sistema economico o per un paese, più ricchezza, posti di lavoro, e maggiore coesione sociale.

Uno scenario in rapido mutamento

Lo scenario in cui si collocano gli interventi e gli indirizzi nel settore della R&S è in rapido mutamento ed è caratterizzato da un complesso ed accelerato processo di globalizzazione che ha accentuato la debole posizione dell'economia europea e italiana nel quadro dell'economia mondiale.

Le difficoltà nella congiuntura internazionale si sono ripercosse maggiormente su queste eco-

l'attività di R&S fondamentale per la diffusione dell'innovazione

nomie, caratterizzate da rigidità strutturali e da tassi di crescita più bassi rispetto al Nord America e alle economie emergenti.

La globalizzazione, con la rapida diffusione ed accesso alla conoscenza prodotta a costi fortemente ridotti rispetto al passato, ha anche investito lo stesso sistema di ricerca italiano che si trova a competere in un sistema globale e che quindi richiede per continuare a competere con successo rapidi adattamenti nelle strategie, nella dimensione finanziaria, nei sistemi di gestione e di valutazione. Nazioni emergenti sulla scena mondiale – India e Cina particolarmente – invece di affidare il loro futuro sviluppo alla tradizionale catena di crescita utilizzata nel tempo dalle nazioni europee -agricoltura, industria pesante, alta tecnologia- saltano il passaggio intermedio e puntano direttamente sui settori più innovativi. Ad esempio la Cina in pochi anni ha incrementato fortemente la percentuale nel suo export di prodotti high-tech.

L'Europa e l'Italia in particolare si trovano così ad affrontare sul piano della competitività una duplice sfida, da un lato dal sistema scientifico e produttivo americano che gode di formidabili investimenti pubblici e privati nel settore civile e in quello della difesa, e di una nuova politica estremamente flessibile ed innovativa in materia di supporto all'attività di R&S del Governo federale, dall'altro da paesi i cui prodotti, ormai di buona qualità e con contenuti tecnologici medio-alti, possono competere con successo sul mercato globale a causa del minor costo del lavoro.

impossibilità
di sostenere
a lungo
grandi
investimenti
in R&S

Le criticità strutturali del sistema produttivo europeo ed italiano

Tra le criticità strutturali del sistema produttivo europeo e italiano risalta la limitata dimensione delle imprese, la bassa percentuale di valore aggiunto e di occupazione attribuibile al settore "high tech" rispetto all'intero settore produttivo; la scarsa utilizzazione di processi di trasferimento tecnologico che consentano alle imprese di utilizzare nuova conoscenza che proviene dal settore della ricerca di base; la scarsa propensione a generare brevetti o altre forme di tutela della proprietà intellettuale.

Questa peculiarità del tessuto produttivo italiano determina da un lato un'alta flessibilità e capacità di competere con successo, ma dall'altro genera debolezza strutturale e conseguente impossibilità di sostenere a lungo i grandi investimenti in R&S nei nuovi settori ad alta crescita su un orizzonte temporale adeguato.

Tale debolezza è resa ancora più critica dall'accentuarsi di nette discontinuità rispetto al passato nello sviluppo di nuove tecnologie, nel più rapido passaggio dalle scoperte effettuate dalla ricerca di base al mercato, nella tendenza in vari paesi a concentrare competenze e risorse in settori strategici. E' questa situazione che rende ancora più rilevante l'intervento pubblico nel settore della R&S per sostenere il sistema produttivo soprattutto in presenza di una forte competizione da parte di paesi emergenti quali India e Cina la cui dinamica di crescita è sempre più alimentata dall'innovazione tecnologica nei beni e nei servizi.

E' opportuno, anzi necessario sottolineare che i processi di discontinuità nello sviluppo di nuove conoscenze che caratterizzano attualmente il settore della R&S sostenute da processi di convergenza tecnologica particolarmente nei settori delle info, nano e bioscienze determinano spesso e con rapidità una forte riduzione nei vantaggi competitivi detenuti da altri sistemi scientifici o gruppi di ricerca, aprendo contemporaneamente ampi spazi che possono permettere al nostro sistema scientifico di utilizzare proficuamente nuovi investimenti.

La corsa per l'eccellenza in questi ambiti non è affatto perduta anche perchè il nostro paese può contare su un capitale umano di grande qualità, competitivo a livello internazionale.

La situazione di debolezza strutturale dovuta alla presenza dei fattori precedentemente descritti è particolarmente accentuata per il nostro paese, che ormai dispone solo di un numero esiguo di gruppi industriali di grandissime dimensioni 116 – solo quattro con fatturato superiore ai

20 miliardi di euro (ENI, FIAT, Pirelli, Telecom)- e di un numero straordinariamente elevato di imprese medio piccole, (le aziende registrate alle Camere di Commercio nel settore informatica nel 2002 sono 80.834, nel settore biotech 1887, nel settore Tlc 2454 per un totale di 85.175 aziende). Ciò come si è detto rappresenta un fattore di alta flessibilità, ma anche di debolezza. Predomina la specializzazione manifatturiera incentrata sui settori tipici del cosiddetto "made in Italy", supportata però da un forte settore di meccanica strumentale, concentrata in oltre 200 distretti industriali, spesso leader o co-leader mondiali nei loro settori con oltre 2 milioni di addetti e circa 1/3 dell'export nazionale. In Italia operano infine un numero significativo di medie imprese "high-tech" di rilevanza mondiale nei settori della microelettronica, della robotica, dell'optoelettronica, della motoristica, della chimica e delle tecnologie biomediche.

Tra il 1997 ed il 2002, mentre l'incremento degli scambi internazionali di beni e servizi è stato del 28%, le esportazioni italiane sono cresciute solo del 16%, contro il 31% di Francia e Germania. Nei cinque anni dal 1997 al 2002 la produzione industriale italiana è aumentata del 3%, contro l'11% della Francia e un valore ancora superiore della Germania. Le nostre quote di esportazione che tuttavia ancora si attestano su dimensioni assai elevate, ca il 28% del PIL, con una bilancia positiva tra export ed import, stanno lentamente diminuendo in vari importanti settori quali macchine e apparecchi meccanici, autoveicoli, apparecchi elettrici di precisione, mentre il complesso delle nostre esportazioni continuano a concentrarsi in settori a limitata tecnologia, esposti così alla concorrenza di paesi terzi emergenti caratterizzati da un costo del lavoro nettamente minore.

Un'analisi della distribuzione del valore aggiunto tra i più importanti macrosettori, dimostra che il settore "immobiliare e dei servizi per le imprese" contribuisce al totale italiano per 254 miliardi di euro, il "manifatturiero" con 296 miliardi, i "servizi sociali e personali" con 236, e il settore "commercio all'ingrosso e al dettaglio" con 151 miliardi.

La struttura del valore aggiunto lordo dell'Italia (in %) a confronto con quello dei paesi dell'UE, 2001, è la seguente: Agricoltura, Italia 2,7 contro una media UE di 2,1; Industria manifatturiera, 22,9 contro 22,3; Costruzioni 4,9 contro 5,4; Commercio, trasporti, comunicazioni 24,0 contro 21,5; Servizi alle imprese 26,3 contro 27,2; Altri servizi 19,2 contro 21,6.

Tra questi settori quello caratterizzato da una più alta intensità di ricerca (spesa in R&S su valore aggiunto) è quello manifatturiero. Un esame aggregato conferma tuttavia che anche questo settore, cruciale per la produzione di ricchezza e per sostenere l'export italiano, è caratterizzato da una bassa intensità di ricerca rispetto a quello di altri paesi.

Per il totale manifatturiero l'intensità di ricerca è rispettivamente (in %): 2,1 (Italia); 7,4 (Germania), 8,6 (Giappone); 8,3 (USA), 8,1 (UK).

L'insufficiente sforzo in ricerca nel nostro paese anche nei settori cosiddetti "maturi" fornisce una importante chiave di lettura su uno dei vari motivi alla base della costante perdita di competitività del nostro paese anche nel settore del "made in Italy", tuttora cruciale per la produzione di ricchezza nazionale.

Netto risulta il divario dell'intensità di ricerca del settore manifatturiero dell'Italia rispetto alla Germania, nostro benchmark principale in quanto operante nello stesso sistema economico e politico europeo e caratterizzato da una simile tipologia di industrializzazione. La Germania dimostra un'intensità di ricerca nel manifatturiero pari a tre volte quella dell'Italia, dato che dimostra la criticità e il prevedibile accentuarsi della debolezza del nostro sistema produttivo nei prossimi anni.

Esistono quindi anche per il nostro paese, nonostante la peculiare struttura produttiva e la generale bassa intensità tecnologica dei suoi prodotti, ampi spazi di crescita e di necessità di intervento nel settore della R&S.

le nostre
esportazioni
continuano a
concentrarsi
in settori
a limitata
tecnologia

Insufficienti investimenti e necessità di nuove politiche nel settore R&S

Alle criticità strutturali caratteristiche del sistema economico europeo ed italiano si aggiungono i bassi investimenti e l'insufficiente attenzione al ruolo della R&S e all'innovazione.

Dagli anni '90 si è assistito ad un continuo allargarsi del divario nella spesa europea in R&S, rispetto agli USA. Nel 2000 l'America ha investito in questo settore 288 miliardi di euro, contro i 164 dei Quindici e i 154 del Giappone. Nel periodo 1995-2000 le spese americane sono aumentate in media del 5,7% annuo, quelle della UE del 3,4%.

Il numero di laureati nelle discipline di base nei paesi europei (matematica, fisica e chimica) è in costante diminuzione, mentre ad esempio la Cina si propone di raggiungere in breve tempo il traguardo di 1.000.000 di laureati in ingegneria all'anno e le esportazioni di prodotti high-tech da parte dei paesi asiatici sta rapidamente aumentando.

Il ritardo europeo emerge anche dal fatto che il 33% delle richieste di brevetto nella UE sono effettuate da aziende americane, mentre all'UE vanno solo il 19% dei brevetti depositati negli USA.

Anche per quanto concerne il capitale umano investito nella R&S esistono marcate differenze tra le tre aree geografiche. Mentre in Europa 459.000 ricercatori operano nell'industria e circa 445.000 nel settore pubblico (istituzioni governative ed educazione superiore), gli Stati Uniti contano 1.015.000 ricercatori nell'industria e 182.000 nel settore pubblico, mentre per il Giappone di fronte ai 433.000 ricercatori dell'industria solo 208.000 nel settore pubblico.

Un'ulteriore fonte di debolezza per il sistema scientifico europeo e, particolarmente per quello italiano, è rappresentato dal basso livello di spesa pubblica nel settore della ricerca per la difesa, non bilanciato da maggiori interventi in altri settori. La spesa dello stato italiano per la ricerca per la difesa è inferiore all'1% della spesa totale per R&S, mentre U.K spende ca il 30%, la Francia il 22% e la media dei paesi della UE il 14%. Negli USA tale rapporto sale al 57%.

Non si tratta solo di dimensioni del supporto USA di cui beneficiano una molteplicità di settori industriali, ma anche del fatto che mentre nei paesi dell'UE i governi co-finanziano questa tipologia di ricerca, negli USA le agenzie governative finanziano gli interi costi del programma di ricerca e sviluppo affidato alle industrie e alle università.

L'incremento della competitività attraverso l'innovazione richiede anche una riconsiderazione dei modelli tradizionali di intervento.

La logica del modello di sviluppo lineare delle attività di ricerca -ricerca di base, applicata, industriale- secondo la quale i forti investimenti nel settore della ricerca di base pubblica promuovono, in modo quasi automatico, a cascata, importanti effetti sull'attività di ricerca e sviluppo industriale, originando prodotti, processi e servizi innovativi, è stata negli ultimi anni affiancata decisamente negli USA, da una nuova direzione strategica e di sostegno finanziario dell'attività di R&S che prevede una stretta cooperazione tra i diversi attori, università, enti pubblici di ricerca, industria.

La nuova politica di supporto pubblico alla R&S civile è stata così indirizzata, sulla scorta delle esperienze maturate per la conduzione di grandi progetti di ricerca nel settore militare e spaziale, verso il supporto di programmi in settori strategici per l'economia e l'industria – es. nanotecnologie, nuovi materiali, genomica – che vedono la partecipazione congiunta di università, di enti federali di ricerca e di aziende e che prevedono attività coordinate spinte fino allo sviluppo di nuove tecnologie di immediato utilizzo per le imprese del settore e alla prototipazione di prodotti in grado di passare rapidamente in produzione.

Contestualmente, attraverso un diverso orientamento in tema di applicazione della legislazione anti monopolio, si è favorita la concentrazione di più imprese in programmi di alto livello tecnologico che prevedono forti ricadute applicative.

Il fatto che gli enti pubblici e le imprese partecipanti a questi programmi di grandi dimensioni,

esistono
ampi spazi
di crescita e
di necessità
di intervento
nel settore
della R&S

molto vicini alla produzione, vengono finanziati al 100% dei costi, che includono anche quelli del personale impegnato nei contratti, implica un forte vantaggio competitivo rispetto a quanto previsto dalle attuali normative europee di supporto ai programmi del VI Programma Quadro (recentemente aggiornate per quanto concerne gli aiuti alle PMI) e al vigente regime concernente gli aiuti di Stato.

Quanto ai paesi asiatici la "deregulation" per quanto concerne il supporto pubblico alla ricerca e eventuali vincoli ambientali è totale.

Occorre tener ben presente che se si devono alla ricerca di base imprevedibili discontinuità nella conoscenza e quindi l'apertura di ampie e nuove prospettive, è attraverso il rapido utilizzo della nuova conoscenza con ingenti investimenti, attività quest'ultima deficitaria in Europa e in Italia, che si determinano le ricadute economiche di questi avanzamenti. Basti un solo esempio: tutte le più rilevanti scoperte e avanzamenti nelle conoscenze nel settore della scienza della vita sono stati ottenuti in Europa, particolarmente in Gran Bretagna senza praticamente alcuna protezione della proprietà intellettuale, ma è negli Stati Uniti che tali scoperte sono state utilizzate a livello applicativo e industriale, creando l'industria biotech più innovativa, redditizia e competitiva al mondo.

In Italia la carenza negli investimenti, unita per molto tempo, in generale, allo scarso apprezzamento generalizzato della rilevanza del settore R&S per il futuro del paese è documentata da dieci anni di continua caduta in Italia degli investimenti in questo settore, passati dall'1,30% del PIL (1990) all'1,07 (2001), unico caso tra i paesi industrializzati. Tra le maggiori cause, la privatizzazione delle partecipazioni statali e l'assorbimento di grandi imprese italiane nel sistema delle multinazionali. Questo indice per le maggiori aree scientifiche mondiali è di 2,98 (Giappone); 2,69 (Stati Uniti), 1,93 (UE dei 15).

A questa situazione, una delle cause del progressivo indebolimento nella capacità innovativa della nostra industria, si aggiungono spesso forti resistenze nell'ambito dello stesso mondo della ricerca pubblica ad adottare nuove forme organizzative, nuovi meccanismi incentivanti e selettivi per favorire l'eccellenza, la valorizzazione dei giovani talenti e la collaborazione con il mondo produttivo, tutte azioni urgenti e necessarie per poter competere e collaborare con i sistemi scientifici dei paesi più avanzati.

La percentuale del finanziamento pubblico italiano sul totale delle spese di ricerca (effettuate cioè sia dal settore pubblico che da quello privato) risulta rispettivamente del 50,8% (Italia, 1999), 34,4 (UE dei 15), 27,8 (USA) e 18,5% (Giappone), (2001). Tale rapporto è il più alto tra tutti i paesi industrializzati, preceduto solo dal Portogallo (61%). La percentuale del finanziamento governativo, pubblico, a carico del bilancio dello Stato rispetto al PIL di ciascuno dei paesi considerati risultava, prima del 2004, la seguente (dati 2001): Italia 0,53; Giappone 0,57; UE dei 15, 0,66; USA 0,76. Per quanto concerne i maggiori paesi della UE il finanziamento pubblico alla R&S rispetto al PIL è pari a 0,79 (Germania), 0,82 (Francia) e 0,57 (Gran Bretagna, dato praticamente identico a quello italiano).

Le risposte dell'Unione Europea

In questo scenario un fondamentale processo è costituito dalla progressiva strutturazione economica e politica dell'UE, di cui l'Italia è uno dei principali attori.

Secondo le indicazioni del Consiglio Europeo di Lisbona, 2000, l'obiettivo centrale per l'Europa è quello di divenire entro il 2010 "l'economia più competitiva al mondo, basata sulla conoscenza, capace di una crescita economica sostenibile, con più numerosi e migliori posti di lavoro ed una maggiore coesione sociale".

Per dare attuazione all'agenda di Lisbona, l'Unione Europea si è impegnata (Consigli di

dieci anni
di continua
caduta in
Italia degli
investimenti
in R&S

Stoccolma, marzo 2001; Barcellona, marzo 2002, Bruxelles, dicembre 2003) in una serie di azioni e di iniziative nei settori della ricerca e dell'istruzione.

Al riguardo vanno citati:

- la creazione dello spazio europeo della ricerca e dell'innovazione;
- l'obiettivo di aumentare lo sforzo di ricerca e sviluppo europeo fino al 3% del PIL dell'Unione entro il 2010;
- l'iniziativa europea per la crescita (Commissione Europea, novembre 2003 e Conclusioni della Presidenza, Consiglio Europeo, Bruxelles, dicembre 2003);
- l'adozione di un "Piano d'azione" 12 per il raggiungimento degli obiettivi previsti.

Per quanto concerne la ricerca, il "Piano d'Azione" presentato dalla Commissione Europea il 4.06.2003, comprende quattro gruppi di iniziative:

- la creazione di "piattaforme tecnologiche chiave" a livello europeo per la cui definizione, realizzazione e uso si richiede l'azione congiunta di una pluralità di attori, organizzazioni di ricerca, industrie, gruppi di utenti – una piattaforma tecnologica secondo la UE è un meccanismo per riunire una pluralità di attori interessati a sviluppare e realizzare una visione a lungo termine per risolvere uno specifico problema, generando una competitività sostenibile e una leadership mondiale per la UE nello specifico settore;
- un secondo gruppo di iniziative è diretto ad aumentare il supporto pubblico alla R&S, a migliorare la condizione e le opportunità di carriera per i ricercatori, ad incrementare i rapporti di collaborazione tra la ricerca pubblica e le imprese, ad eliminare i vincoli di carattere normativo che impediscono la cooperazione e il finanziamento di programmi tra Stati europei e il trasferimento di tecnologie tra gli stessi Stati;
- nel terzo gruppo di azioni l'UE intende aumentare il monitoraggio, l'efficacia e l'intensità del supporto finanziario pubblico alle attività di R&S, anche attraverso una redistribuzione degli aiuti di Stato che favorisca le attività trasversali quali quelle caratteristiche del sistema di R&S.

• un ultimo gruppo di azioni è diretta al miglioramento delle condizioni di contorno, atte a favorire le attività di R&S; tra queste la necessità di una più generale attenzione al valore della protezione della proprietà intellettuale, con l'approvazione del brevetto europeo, una più incisiva regolazione dei mercati e degli standard, la migliore definizione delle regole per la competizione.

Il raggiungimento di un livello di finanziamento delle attività di R&S del 3% rispetto al PIL (un risultato che, in accordo con studi econometrici promossi dalla Commissione determinerebbe la crescita dello 0,5% del PIL e l'aumento di 400.000 posti di lavoro ogni anno dopo il 2010), richiederebbe per la media delle nazioni europee una crescita dell'8% dello sforzo complessivo, pubblico e privato, in R&S annuale, di cui il 6% per il supporto pubblico e il 9% del supporto privato. Si tratta indubbiamente di un obiettivo assai difficile da raggiungere in mancanza di forti intendimenti politici e dell'adozione di una serie di misure incentivanti dei vari governi europei.

Non è sorprendente registrare a questo proposito che nel piano decennale per la R&S recentemente delineato dal Governo inglese gli obiettivi posti dall'UE sono stati ridimensionati ad una spesa prevista per la R&S del 2,5% del PIL da conseguirsi entro il 2014.

Il rapporto della Commissione specifica per ciascun stato membro gli obiettivi, le politiche da sviluppare e i processi di "governance" richiesti.

Per l'Italia gli obiettivi previsti dalla "Linee Guida 2002" e cioè il raggiungimento per il 2006 di un livello di finanziamento della R&S dell'1,75% del PIL, di cui l'1% pubblico e lo 0,75% privato risultano pienamente condivisi dalla Commissione, anche se tale raggiungimento deve necessariamente correlarsi con l'atteso incremento del PIL e con la situazione della finanza pubblica. Per quanto concerne le politiche, la Commissione concorda con le indicazioni prioritarie formulate dal Governo italiano di utilizzare la leva pubblica per incrementare l'attività di ricerca privata.

Da un punto di vista operativo le azioni previste dal rapporto della UE per ciascun stato membro

divenire entro
il 2010
"l'economia
più competitiva
al mondo
basata sulla
conoscenza"

sono:

- iniziare un processo di coordinamento nelle azioni per il potenziamento del capitale umano e delle infrastrutture;
- sviluppare piattaforme tecnologiche comuni europee;
- sviluppare la collaborazione pubblico-privato;
- promuovere iniziative dirette della UE in materia di R&S;
- adottare nuove misure fiscali e di politica economica per sostenere le attività di R&S;
- raggiungere un miglior bilanciamento tra il previsto incremento degli aiuti di Stato alla R&S e necessità di non produrre distorsioni nella concorrenza;
- migliorare le condizioni generali per promuovere gli investimenti privati nella R&S.

Le azioni del Governo in materia di R&S, propedeutiche al PNR

Dall'inizio della sua attività il Governo, ha assunto una serie di iniziative ed ha svolto numerose azioni che, pur scontando il forte rallentamento dell'economia a livello mondiale e nazionale, hanno tuttavia preconstituito la necessaria base per gli indirizzi e la previsione di interventi di potenziamento, riorientamento e coordinamento del settore della R&S nazionale da prevedersi nel presente PNR.

Gli interventi nel settore della R&S sono stati attuati, per la prima volta, in modo sistematico, nel contesto e coerentemente con una vasta azione di riforma del sistema della formazione primaria, secondaria e terziaria.

La linea direttiva alla base di questa azione è basata sull'adozione di un complesso di azioni interdipendenti che insieme concorrono allo sviluppo della capacità di innovazione e quindi alla competitività del paese:

- la produzione della conoscenza, basata principalmente sulla ricerca scientifica;
- la sua trasmissione attraverso la formazione e l'educazione;
- la sua disseminazione attraverso le tecnologie dell'informazione e della comunicazione;
- il suo uso per la produzione di beni e servizi innovativi.

Le azioni del Governo, svolte principalmente attraverso il MIUR, Ministero cardine per l'attuazione di questo complesso di interventi, sono state pertanto assunte o programmate nel contesto di questa visione unitaria, e sono finalizzati alla modernizzazione e all'adeguamento del sistema educativo, di alta formazione e di ricerca nazionale ai migliori standards internazionali, in stretto collegamento con le linee politiche europee in materia, perseguendo l'obiettivo generale di migliorare significativamente la competitività del paese. Le azioni ed interventi più significativi assunti nel settore della R&S nei primi tre anni del Governo, di particolare rilevanza per il PNR, sono rappresentate da:

- approvazione delle "Linee Guida per la politica scientifica e tecnologica del Governo" che hanno identificato i punti di forza e di debolezza del sistema scientifico italiano, le priorità di settore, il riposizionamento degli attori, il quadro degli interventi finanziari da prevedersi nel PNR;
- ripresa degli stanziamenti nel bilancio dello Stato in R&S con la legge finanziaria 2004-2006, (+14%) e con quelle 2005-2007 dopo un decennio di diminuzione;
- interventi legislativi di sistema per la formazione primaria e secondaria;
- fondamentale contributo all'adozione dell'iniziativa europea per la crescita da parte della Presidenza Italiana della UE;
- approvazione di nuovi provvedimenti legislativi per il riordino ed il potenziamento della rete degli enti pubblici di ricerca vigilati dal MIUR, tra cui CNR, INAF, Agenzia Spaziale, ENEA; di tutto rilievo la ristrutturazione del CNR destinata a rafforzare il maggiore ente nazionale di ricerca e a focalizzarne la sua attività verso settori strategici;

utilizzare
la leva
pubblica per
incrementare
l'attività
di ricerca
privata

- approvazione del Piano Spaziale Nazionale;
- incisivo contributo della delegazione italiana e del MIUR alla definizione del VI PQ europeo (con particolare riferimento agli interventi svolti a favore del settore delle PMI, agroalimentare, trasporti, beni culturali, emergenze naturali);
- approvazione di un piano organico per la valutazione di strutture e programmi di ricerca per tutto il sistema scientifico nazionale;
- definizione della strategia generale per la creazione di distretti tecnologici regionali e istituzione dei primi distretti tecnologici di interesse regionale di Torino, Napoli, Padova, Modena, Milano, Catania, Roma;
- approvazione di una legge di sostegno per l'inserimento di giovani nel settore della R&S;
- approvazione da parte del C.d.M. di un disegno di legge sullo stato giuridico del personale docente e ricercatore universitario;
- istituzione della Fondazione "Istituto Italiano di Tecnologia";
- istituzione del nuovo "Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica" attraverso la fusione di due istituzioni operanti nel settore;
- ristrutturazione della rete degli Istituti di Ricovero e Cura a carattere scientifico.

approfondire
con le
Amministrazioni dello
Stato e con le
Regioni i temi
prioritari di
intervento

Gli indirizzi per il PNR

Gli indirizzi per gli interventi da prevedersi dal PNR partono quindi da una base ormai consolidata di analisi e di indicazioni formulate a livello nazionale ed internazionale.

Tali indicazioni, particolarmente quelle formulate in sede UE, hanno un carattere necessariamente generale, e richiedono nella loro traduzione operativa al sistema scientifico, tecnologico ed economico italiano un opportuno adattamento per superare specifici punti critici esistenti ed inserirsi con profitto nella realtà economica, strutturale, scientifica e tecnologica italiana.

Il MIUR, successivamente all'approvazione delle "Linee Guida", con le quali sono state identificate, in base a criteri ed analisi di carattere generale, le aree strategiche di intervento (in base a: impatto economico, mercato e occupazione, impatto sulla spesa pubblica, anche in termine di riduzione di costi, impatto sociale, in termine di bisogni ed aspettative dei cittadini, posizionamento competitivo del sistema nazionale nelle sue componenti (imprese, istituzioni e operatori tecnico-scientifici, ricadute degli investimenti in R&S sotto forma di prodotti, processi e servizi ad elevata intensità tecnologica), ha provveduto ad approfondire con le varie amministrazioni dello Stato e con le Regioni secondo le procedure previste dalla legge 204/98, i temi prioritari di intervento del PNR. Tutti i Ministeri sono intervenuti con osservazioni e proposte contribuendo sostanzialmente alla predisposizione del PNR.

E' la prima volta che si registra nel nostro paese un concreto processo di coordinamento nelle iniziative a sostegno dell'attività di R&S da parte delle amministrazioni centrali dello Stato e delle Regioni. Si tratta di un processo positivo che, tra l'altro, ha determinato nell'ambito di ciascuna amministrazione e in talune Regioni la costituzione di un nucleo di funzionari e di esperti nello specifico settore della R&S. Le indicazioni programmatiche di cui sopra sono state integrate con analisi e approfondimenti relativi ai settori considerati prioritari, identificati nell'ambito delle "Linee Guida", da parte di specifici gruppi di lavoro.

Ulteriori indicazioni di particolare rilievo per il PNR provengono dall'accordo tra Confindustria e rappresentanze sindacali.

Esso prevede un graduale innalzamento della percentuale tra spesa in ricerca e PIL, per la realizzazione di quattro grandi priorità condivise: ricerca, formazione, infrastrutture e mezzogiorno. Per il conseguimento di questi obiettivi, il rapporto tra spesa per R&S e PIL - secondo l'accordo - dovrebbe passare, per quanto concerne la parte pubblica, a partire dal 2004 fino al 2006, allo 0,75,

0,85 e 1%, in linea con quanto previsto dalle "Linee Guida" del Governo. In cifre le parti sociali propongono di incrementare l'attuale spesa in R&S di 6-14 miliardi di euro nel periodo 2004-2006, a seconda della crescita economica, e di introdurre una Tremonti-bis per gli investimenti in ricerca delle imprese.

Per quanto riguarda le politiche nazionali le parti sociali hanno richiesto di introdurre una agevolazione fiscale per gli utili reinvestiti per le imprese che, attraverso una adeguata certificazione, mostrino di investire in ricerca e sviluppo risorse superiori alla media dei tre anni precedenti.

Un'ulteriore richiesta al Governo è di introdurre, specialmente per le piccole e medie imprese e per i progetti di minore dimensione uno strumento di agevolazione fiscale a carattere permanente per le aziende che investono in ricerca.

La Confindustria, in particolare, in successivi interventi sull'argomento ha chiesto l'abolizione dell'IRAP per il personale impegnato in attività di ricerca e il sostanziale rifinanziamento dei fondi FAR e FTT. La strategia e gli indirizzi del Governo: l'insieme degli elementi raccolti e le azioni propedeutiche già svolte ed illustrate precedentemente permettono di sintetizzare le linee direttive della strategia e le priorità negli interventi che il Governo intende realizzare in questo settore. Da un punto di vista generale:

- dichiarare l'intero settore della ricerca da quella di base a quella applicata, fino allo sviluppo sperimentale, di interesse strategico, prioritario per la competitività e il futuro del paese;
- perseguire: eccellenza nelle attività di ricerca previste, multidisciplinarietà, internazionalizzazione, collaborazione pubblico-privato, concentrazione su punti di forza e settori strategici, utilizzo di una pluralità di fonti di finanziamento e valutazione. Sono, questi i processi con cui il Governo intende caratterizzare il cambiamento del nostro sistema scientifico e tecnologico definiti nel presente programma;
- attuare a questi fini strategie, indirizzi ed interventi fortemente innovativi, nel quadro dell'azione e del programma del Governo per la modernizzazione del paese;
- porre al primo posto nella scala degli interventi quelli dedicati alla piena valorizzazione del Capitale Umano, per e attraverso la R&S;
- ampliare e sostenere attraverso interventi "di sistema", con nuove caratteristiche, l'interazione tra università, enti di ricerca ed imprese in settori strategici per la competitività del paese;
- promuovere sistematicamente una stretta collaborazione tra il sistema scientifico nazionale e quelli dei paesi più avanzati, Ue e USA in primo luogo;
- adottare riforme e meccanismi operativi in grado di allineare rapidamente il nostro sistema scientifico e tecnologico a quello dei paesi più avanzati, mettendolo in grado di svolgere le missioni ad esso affidate.

Da un punto di vista operativo: pur essendo le quattro principali missioni affidate al sistema della R&S fortemente intercorrelate, il loro svolgimento, la loro promozione, finanziamento e valutazione differisce in modo sostanziale, anche perchè gli attori chiamati a svolgere tali missioni – università, enti pubblici di ricerca, imprese - differiscono nella loro organizzazione, finalità, scala di valori.

Sembra utile, anche se per certi aspetti ciò può apparire artificioso, distinguere, essenzialmente da un punto di vista operativo ed illustrativo due aree:

- gli indirizzi e le iniziative previste dal PNR, secondo i quattro assi di intervento definiti dalle "Linee Guida": ricerca di base, ricerca "mission oriented", ricerca industriale, promozione attraverso la R&S della capacità di innovazione delle PM, e creazione di aggregazioni sistemiche a livello territoriale,
- analisi ed interventi in grandi settori trasversali di interesse per tutto il sistema nazionale di ricerca: capitale umano, Mezzogiorno, internazionalizzazione, "non profit", grandi infrastrutture di ricerca.

**allineare
rapidamente
il nostro
sistema
scientifico e
tecnologico
a quello dei
paesi più
avanzati**

Il futuro della politica Europea della Ricerca

Segreteria Tecnica
della DGSSIRST
del MIUR

spazio aperto

Una ampia sintesi del contributo italiano al dibattito sulla strategia per la ricerca europea e sugli obiettivi del 7° Programma Quadro, così come sono delineati nella comunicazione della Commissione Europea del 16 giugno 2004

The future of Europe's Research policy

This document represents Italy's contribution to the debate on EU research strategy and the objectives of the 7th Framework Programme, as set forth in the European Commission's communication of June 16, 2004. Besides illustrating Italy's position on certain aspects highlighted in the communication, the document presents some general ideas on R&D strategy and goals in Europe

Un'analisi delle tendenze che si stanno consolidando a livello mondiale nella ricerca e nello sviluppo tecnologico rappresenta un passaggio necessario per la definizione dei futuri programmi europei.

L'Europa dovrà quindi considerare non solo come affrontare il gap con gli Stati Uniti in termini di conoscenza ed efficienza, ma anche la forte competizione - sia a livello economico che scientifico - con un gruppo di paesi emergenti e fortemente motivati.

Si auspica che questo nuovo scenario internazionale venga analizzato dalla Commissione nell'ambito di uno studio specifico, i cui risultati potrebbero contribuire in modo significativo alla definizione del 7° PQ. In questa ottica, dovrebbe anche essere preso in considerazione un rafforzamento della cooperazione scientifica tra UE e Paesi limitrofi.

Architettura e obiettivi generali dei Programmi Quadro

Si condivide l'impostazione complessiva delineata dalla Commissione per il 7° PQ, in quanto essa promuove la ricerca con mezzi che tengono in maggiore considerazione - rispetto al passato - le esigenze europee di innovazione, di competitività, e quindi di sviluppo economico.

Il principio di sussidiarietà europea viene correttamente tradotto nell'esigenza di creare una massa critica di soggetti mutuamente necessari al successo dei progetti. La concentrazione degli interventi e l'indicazione di nuovi assi di azione sono un aspetto positivo dell'impostazione della Commissione; la proposta relativa al 7° PQ dovrà esplicitare chiaramente gli obiettivi che si vogliono raggiungere ed i connessi strumenti di attuazione. Eventuali proiezioni all'esterno della gestione di particolari azioni comunitarie possono essere accolte, purché ciò non si traduca in appesantimenti procedurali, amministrativi, e finanziari.

Occorre, tuttavia, tenere presente che cambiamenti radicali potrebbero disorientare una parte delle comunità di ricerca, sia nel settore pubblico che in quello privato. Si ritiene quindi opportuno che le modalità operative di eventuali novità introdotte nel prossimo PQ siano definite all'inizio di questo, e non in corso d'opera. In particolare, è consigliabile non introdurre nel PQ strumenti che presentino problemi aperti o richiedano soluzioni di difficile attuazione operativa.

Nel riconoscere la validità e la necessità di nuovi meccanismi di finanziamento, compresa l'attivazione su larga scala dei prestiti della Banca Europea d'Investimento, si auspica che la Commissione possa svolgere un ruolo di promozione e di supporto per un loro concreto utilizzo.

Il ruolo della collaborazione transnazionale va assolutamente salvaguardato ed incoraggiato anche nel 7° PQ. Essa fa perno sul principio di sussidiarietà, che sta alla base dell'UE ed è uno degli elementi fondanti dell'integrazione europea. La ricerca transnazionale rappresenta un valore aggiunto, ed ha determinato un cambiamento nel mondo della ricerca europea, creando i presupposti naturali allo sviluppo di collaborazioni fra competenze integrate, ora e nel futuro: i gruppi partecipanti ad un progetto di successo saranno partner anche in successivi progetti, dando vita ad una stabile rete di scambi e collaborazioni fra specializzazioni locali.

Gli strumenti della collaborazione

La struttura del 6° PQ è risultata complessa, e non ha favorito l'accesso degli operatori medio-piccoli ai programmi comunitari. Il linguaggio utilizzato nella definizione delle aree tematiche spesso non ha trovato corrispondenza nella tradizionale organizzazione delle discipline scientifiche (per esempio, la sesta priorità - "Sviluppo sostenibile, cambiamento globale ed ecosistemi" - comprende i trasporti, l'energia non nucleare, ed il cambiamento climatico).

La stesura delle proposte ha richiesto il reperimento e la conoscenza di un insieme di documenti voluminosi e complessi: bando di gara, programma di lavoro, guide per i proponenti, manuale

**rafforzamento
della
cooperazione
scientifica
tra UE e paesi
limitrofi**

raddoppio dell'attuale bilancio della ricerca

di valutazione, guida finanziaria, modulistica contrattuale. I Progetti Integrati (IP) ed i Progetti Specifici Mirati di Ricerca (STREP) sono risultati gli strumenti più apprezzati dalla comunità scientifica. I primi sono mirati ad obiettivi di ricerca più ambiziosi, rispondendo all'esigenza di sviluppare ed integrare tecnologie innovative. Essi, per la molteplicità di competenze, compiti e ruoli dei partecipanti, hanno – talvolta – consentito la nascita, la crescita ed il consolidamento di rapporti ed interdipendenze potenzialmente capaci di creare legami europei tra imprese ed università, legami fruttuosi ed in grado di sopravvivere al progetto. Gli STREP sono risultati essere strumenti validi, ma più agili degli IP e più adatti a soluzioni circoscritte. La dimensione di tali progetti è risultata efficace dal punto di vista della flessibilità, del coordinamento, dell'omogeneità e dei risultati raggiunti, e quindi della coerenza e dell'eccellenza della ricerca proposta.

Si ritiene pertanto che una quota più consistente dei fondi debba essere assegnata agli STREP. Va però osservato che in alcuni casi gli IP hanno differito da uno STREP solo per le dimensioni e non – come avrebbe dovuto essere – per la caratterizzazione strutturale. In tali casi, non si è ottenuta l'auspicata differenziazione tra i due strumenti; inoltre, il gran numero di partecipanti agli IP ha in genere innalzato i costi di gestione ed ha talvolta scoraggiato la partecipazione industriale. Le opportunità offerte dall'eventuale ampliamento delle partnerships dei progetti IP in corso dovrebbero essere più facilmente reperibili e accessibili a tutta la comunità scientifica.

Per quanto riguarda le Azioni di Coordinamento (CA) e le Azioni di Supporto Specifico (SSA), si tratta di due strumenti validi a supporto delle priorità tematiche del PQ. Va tuttavia osservato che talvolta non sembra chiara la distinzione tra le due tipologie, specie quando si entra nel dettaglio delle attività: studi di fattibilità, workshop, et coetera possono spesso essere svolti indistintamente attraverso entrambi gli strumenti. Si ritiene che i Network of Excellence (NoE) debbano essere rivisti, anche perché il concetto di integrazione duratura è risultato difficile da verificare. Inoltre gli obiettivi di "strutturazione e integrazione" dello Spazio Europeo della Ricerca (ERA), che rappresentano i cardini del 6° PQ, possono essere raggiunti con progetti di dimensioni più ridotte rispetto a quelle attualmente previste; in particolare, assai raramente partnership di 35/40 soggetti consentono di pervenire ad una reale integrazione dei gruppi partecipanti.

Le regole di finanziamento e di rendiconto dovrebbero essere chiare e prive di ambiguità interpretative. Comunque, ove lo strumento dei NoE venisse mantenuto, le attività di nuova ricerca prodotte dalla rete e la formazione dovrebbero avere maggiore rilevanza.

Le procedure

Il problema dei costi elevati di preparazione delle proposte, connesso al basso tasso di successo dei progetti presentati nei vari bandi, fa emergere la necessità di semplificare le procedure di stesura delle proposte.

A tal fine, si propone uno snellimento delle fasi iniziali di preparazione, favorendo la presentazione di domande più compatte e semplici, come quelle previste dalla prima fase di una procedura a due stadi (dove il secondo stadio sarebbe riservato solo ai concorrenti selezionati nel primo). Sarebbe opportuno, inoltre, uniformare lo stile ed i contenuti delle pagine web delle singole priorità tematiche, al fine di facilitare la ricerca e l'usabilità delle informazioni da parte degli utenti.

Il tasso di successo dei progetti si è rivelato troppo basso, anche a causa dell'elevata dimensione finanziaria di alcune delle proposte accettate. Per esempio, l'elevato costo di alcuni IP ha comportato l'esclusione dal finanziamento di un certo numero di progetti STREP, nonostante la positiva valutazione di questi ultimi.

La fase di valutazione dei progetti ha in alcuni casi messo in luce la scarsa preparazione tecnica di alcuni valutatori. Talvolta sono emersi giudizi divergenti non solo tra i valutatori ed i proponenti il progetto, ma anche tra i valutatori stessi.

Inoltre, la fase di negoziazione ha messo in evidenza alcuni problemi: la scarsa conoscenza delle nuove regole che disciplinano la gestione dei progetti da parte di qualche project officer; la mancanza, talvolta, di coordinamento e di informazione tra le varie Direzioni della Commissione; l'adozione di tagli al bilancio richiesto dai proponenti, in forma tale da comportare lo stravolgimento di alcuni progetti. Infine, i tempi che intercorrono tra l'approvazione del progetto e la firma del contratto rimangono piuttosto lunghi (8-9 mesi circa).

L'informazione agli Stati membri è risultata spesso non coerente tra le varie Direzioni della Commissione, e si è svolta con modalità, criteri, e tempi differenti. Ciò ha di conseguenza reso difficile la gestione delle informazioni da parte degli Stati membri. È da notare che dalla consultazione condotta per elaborare questo position paper sono emersi nel complesso giudizi e raccomandazioni riguardo agli strumenti ed alle procedure che coincidono in gran parte con quelle espresse nel Rapporto Marimon.

Iniziative tecnologiche europee

I principi generali cui si è ispirata la Commissione nel proporre la creazione delle Piattaforme Tecnologiche (PT) – riduzione della frammentazione della ricerca europea, coinvolgimento di stakeholder, creazione di una massa critica di risorse umane e finanziarie, definizione di una visione comune - sono senz'altro condivisibili.

In particolare, il principio di base di una marcata focalizzazione dell'azione di ricerca in specifici settori tecnologici a forte impatto sulla crescita e sulla competitività dell'Europa costituisce un contributo concreto della politica di ricerca comunitaria all'agenda di Lisbona. Le PT devono essere una risposta forte alle maggiori sfide tecnologiche e scientifiche, costituire una precisa scelta strategica a livello europeo, ed avere una grande visibilità a livello politico.

Considerata la genericità delle informazioni a disposizione fino ad oggi, e la mancanza di una precisa definizione di meccanismi od azioni specifiche, che non consentono di formulare un giudizio puntuale, si ritiene comunque opportuno sostenere questa iniziativa, verificando che sia incentivato anche il coinvolgimento delle piccole e medie imprese più innovative e dei centri di ricerca nazionali. Per quanto riguarda i settori tecnologici che saranno oggetto delle piattaforme, dovrebbe essere chiaramente delineato il processo e allargata la concertazione attraverso la quale saranno individuati. Questo processo dovrebbe infatti coinvolgere chiaramente gli Stati membri e portare a decisioni condivise dal mondo dell'industria e della ricerca.

Si ritiene che i criteri da utilizzare per l'individuazione dei settori debbano essere l'apertura alla collaborazione delle grandi industrie, gli sviluppi scientifici e tecnologici internazionali, le ricadute applicative e le potenzialità di mercato dei risultati della ricerca, la valutazione dell'impatto economico e sociale, la salvaguardia del patrimonio ambientale, la valorizzazione delle competenze dei singoli Paesi, le priorità politiche e la leadership europee in campo internazionale. Tenendo presenti i criteri appena descritti, si possono già individuare alcuni settori di rilevante interesse per l'Europa: idrogeno e celle a combustibile; nanoelettronica e componentistica; trasporti ferroviari; approvvigionamento idrico; genomica delle piante e biotecnologie; macchinari e processi produttivi; protezione del patrimonio culturale; studio, prevenzione e mitigazione degli effetti di catastrofi naturali; comunicazione mobile; aeronautica; spazio; tessile ed abbigliamento;

sistemi integrati (embedded systems); robotica e mecatronica.

semplificare
le procedure
di stesura
delle
proposte

Ricerca di base

Nel 6° PQ non è chiaramente identificabile un'azione indirizzata a sostenere in maniera esplicita la ricerca di base dato che, sul piano della strategia di ricerca, è apparso opportuno non separare scienza di base e tecnologia. Esistono, tuttavia, alcune misure, nell'ambito del 1° Programma Specifico, rivolte a progetti in "New Emerging Science and Technology -NEST" e in "Future Emerging Technologies – FET", le quali hanno sostenuto ricerche di base e, pur disponendo di un finanziamento limitato, hanno incontrato consensi nell'ambito della comunità scientifica. Anche nel 7° Programma Quadro la ricerca di base deve avere chiare connessioni con la ricerca applicata e quindi con l'innovazione, sia pure a lungo termine. Bisognerebbe quindi evitare una separazione istituzionale tra i vari stadi della ricerca, la cui contiguità è oggi giudicata necessaria, a livello mondiale, per garantire adeguata linfa al processo di innovazione tecnologica.

La Commissione propone ora la creazione dello European Research Council (ERC) che, con strutture ancora da determinare, dovrebbe finanziare solo la ricerca di base, eventualmente anche progetti non basati su una collaborazione transnazionale. La proposta di questo nuovo strumento di finanziamento della ricerca comunitaria – perché di questo si tratta – suscita forti perplessità, per le ragioni seguenti.

scarsa
preparazione
tecnica di
alcuni
valutatori

1) Circa il 95% della spesa europea per ricerca scientifica e tecnologica avviene tramite i programmi nazionali dei paesi membri dell'Unione; uno (scarso) 5% è destinato a progetti europei. Il bilancio previsto per l'ERC è di almeno 1 miliardo di euro all'anno, ovvero dell'ordine di un quinto del prevedibile bilancio del 7° PQ. Si tratta di una cifra che costituirebbe una frazione rilevante della spesa comunitaria per la ricerca. Poiché una caratteristica peculiare dell'ERC sarebbe la possibilità di finanziare singoli gruppi di ricerca nazionali, la percentuale di finanziamento comunitario dedicata a programmi realmente europei potrebbe scendere al di sotto del 5%, forse fino al 4%.

2) Si deve osservare che, dal punto di vista e nell'ambito comunitario, la ricerca di base non dovrebbe essere separata da quella applicata, ma avere una funzione integrata in quest'ultima. La ricerca di base mission oriented può essere di competenza comunitaria, mentre quella curiosity driven è generalmente finanziata dai programmi nazionali; proporre uno spazio autonomo in ambito europeo per la ricerca di base potrebbe quindi essere giustificato solo dalla realizzazione di valore aggiunto per la competitività europea, nel rispetto del principio di sussidiarietà. Non è chiaro come il finanziamento di gruppi di ricerca nazionali possa creare questo valore aggiunto; l'argomento che esso sarebbe dato dallo stimolo alla competizione fra gruppi europei non è convincente: per i ricercatori i finanziamenti sono un mezzo e non un fine, ed ogni serio gruppo di ricerca farebbe comunque del suo meglio per eccellere. E' difficile immaginare un gruppo di ricerca che compia degli sforzi -che altrimenti non avrebbe fatto – solo per ottenere un finanziamento dall'ERC.

3) Inoltre il finanziamento di gruppi nazionali farebbe venire meno il principio di sussidiarietà: poiché i finanziamenti dell'ERC andrebbero solo a gruppi di alto livello, è verosimile che questi gruppi siano già riconosciuti – e quindi finanziati – a livello nazionale; l'ulteriore finanziamento comunitario nulla aggiungerebbe alla capacità di fare ricerca di questi gruppi; piuttosto, è da temere che esso assuma una funzione parzialmente sostitutiva del pre-esistente finanziamento nazionale. In altre parole, la creazione dell'ERC sarebbe in controtendenza rispetto alla costruzione della European Research Area (ERA).

4) A parte la possibilità di finanziare gruppi nazionali, le altre caratteristiche dell'ERC sarebbero: (a) l'applicazione del solo criterio dell'eccellenza nella selezione dei progetti; (b) la gestione diretta dell'ERC da parte della comunità scientifica; (c) l'uso di regole ammini-

strative agili ed efficienti.

È doveroso osservare che queste particolari modalità operative sarebbero più difficili da realizzare di quanto lasci supporre la proposta di questo nuovo strumento: (a) Il criterio dell'eccellenza – certamente ottimale - può essere usato per scegliere fra progetti della stessa area scientifica, ma non fra progetti che si riferiscano ad aree distinte; inoltre, la ricerca dell'eccellenza non va riservata alla ricerca di base, essendo questa una caratteristica necessaria anche allo sviluppo tecnologico avanzato. (b) Una gestione dell'ERC da parte della sola comunità scientifica sembra implicare l'esclusione della Commissione e dei Paesi membri dai suoi organi di direzione. (c) Per quanto riguarda, infine, le procedure amministrative, vi sono limiti stretti alla loro semplificazione, dati soprattutto dalle regole di rendiconto delle spese comunitarie. 5) Il dibattito sulla futura forma che assumerà l'ERC è ancora aperto, ma si prevede di demandare ad esso la gestione della mobilità dei ricercatori europei. Poiché le azioni comunitarie a favore della mobilità dei ricercatori già da anni hanno dato buoni risultati, non appare giustificato un eventuale affidamento all'ERC della gestione dei programmi di mobilità. Inoltre, la mobilità riguarda tutti i tipi di ricercatore, non solo quelli impegnati nelle discipline di base, e quindi un tale affidamento sarebbe incongruo.

Risorse umane

La mobilità dei ricercatori deve avere uno spazio adeguato anche nel 7° PQ, considerato che il programma delle borse Marie Curie ha ottenuto un grande consenso nel 6° PQ, determinando una quantità di domande di gran lunga superiore al bilancio disponibile. E' pertanto necessario incrementare, non tanto il numero delle azioni, quanto lo stanziamento di bilancio a favore di ciascuna di esse, in quanto la mobilità dei ricercatori rappresenta uno dei cardini per realizzare gli obiettivi della strategia di Lisbona; ciò perché la mobilità è un elemento essenziale per formare gruppi di ricercatori di alto livello internazionale. Inoltre, per fronteggiare il fenomeno del brain drain e favorire il brain gain, i programmi comunitari dovrebbero incrementare la mobilità nelle attività di cooperazione, sia con gli Stati Uniti che con i paesi emergenti, incentivare le misure per il rientro dei ricercatori europei nei paesi d'origine, ed attrarre in Europa i migliori ricercatori dei paesi extra UE.

Si ritiene inoltre opportuno intensificare la mobilità intersettoriale, al fine di favorire il trasferimento di conoscenze dal mondo della ricerca alle industrie, non solo nell'ambito delle azioni specifiche ad esse dedicate, ma anche nell'ambito dei progetti svolti in collaborazione (STREP, IP e NoE) e delle PT.

Infrastrutture di Ricerca

La realizzazione di nuove infrastrutture di interesse europeo va incoraggiata, ma garantendo una reale complementarità delle nuove infrastrutture con quelle esistenti. In particolare, il ruolo dell'UE deve essere quello di supporto organizzativo, di garanzia della corretta allocazione delle risorse, e di valutazione dell'effettiva necessità delle infrastrutture proposte. Nel processo di individuazione di nuove infrastrutture, in particolare di quelle che dovrebbero offrire le maggiori prospettive alla crescita di tecnologie chiave, sarebbe opportuno che, analogamente a quanto avviene per le Reti Trans-Europee (TEN), vengano concordate linee guida per l'individuazione dei settori di maggiore interesse per ciascuno Stato membro. Sarà naturalmente necessario valutare per ogni infrastruttura i costi di realizzazione, i costi operativi e di gestione, e le quote di accesso degli utilizzatori. Un aspetto importante è la creazione di infrastrutture di carattere multidisciplinare, che rappresentino centri di eccellenza e di forte sviluppo delle risorse umane.

incoraggiare
la realizzazione
di nuove
infrastrutture
di ricerca a
livello
europeo

Accanto al contributo comunitario è necessario il coinvolgimento di fondi nazionali. L'Italia ha previsto, con un recente decreto ministeriale, il finanziamento di progetti che prevedono il potenziamento di grandi infrastrutture di ricerca pubbliche o pubblicoprivate. Un esempio è l'upgrade della struttura di Elettra, a Trieste, per la realizzazione di un FEL (Free Electron Laser). Un altro esempio è la proposta italiana di realizzare un sistema di due satelliti a larga banda, di cui il primo sarebbe finanziato soprattutto con fondi nazionali, il secondo con fondi europei; questa infrastruttura fornirebbe servizi multimediali a larga banda per utenti fissi e mobili, sosterebbe i servizi strategici delle pubbliche amministrazioni europee, e contribuirebbe al superamento il problema del digital divide.

Si considera opportuno un raccordo tra Fondi Strutturali e fondi del Programma Quadro, in particolare rispetto al nuovo obiettivo "Competitività regionale e occupazione", anche se andrebbero esplicitati i meccanismi di questa integrazione. La politica di coesione e la politica di ricerca sono certamente correlate dato che, se da una parte le regioni fanno ricerca, dall'altra la ricerca favorisce lo sviluppo regionale. I Fondi Strutturali potrebbero aiutare le regioni a valorizzare ed a modernizzare le loro infrastrutture di ricerca, rafforzando in questo modo la politica di coesione economica e sociale dell'Unione Europea, e riducendo le disparità tra le diverse regioni. Coerentemente con queste finalità, un utilizzo complementare dei Fondi Strutturali e del nuovo Programma Quadro permetterebbe di individuare un supporto finanziario integrato in grado di garantire, anche per le regioni interessate all'obiettivo della "convergenza", un adeguato (e necessario) processo di sviluppo della capacità di ricerca.

**maggiore
coordinamento
dei programmi
nazionali**

Coordinamento dei Programmi Nazionali di Ricerca

Riteniamo che un maggiore coordinamento dei programmi nazionali sia indispensabile per realizzare lo Spazio Europeo della Ricerca, per evitare sovrapposizioni e dispersione dei finanziamenti, e quindi ottimizzare i risultati. Tale coordinamento potrebbe esplicarsi sia attraverso il tempestivo e reciproco scambio di informazioni su nuove iniziative nazionali di ricerca (ERA-NET), al fine di verificare le possibilità di una loro attuazione congiunta, sia attraverso la partecipazione dell'Unione a programmi nazionali avviati congiuntamente da più Stati membri sulla base dell'art. 169 del Trattato.

ERA-NET appare lo strumento più idoneo a questo fine, in quanto consente alle amministrazioni nazionali e regionali, che gestiscono programmi di finanziamento della ricerca, di scambiare informazioni, sviluppare strategie comuni, ed eventualmente attivare processi di mutua apertura dei rispettivi programmi. Un elemento critico è rappresentato dall'eccessiva rigidità di gestione di questi progetti, che non ha consentito la partecipazione, accanto alle amministrazioni pubbliche, di altri soggetti con un ruolo di supporto alla gestione. In particolare sarebbe opportuno ampliare la tipologia degli attori eleggibili a partecipare al programma, che attualmente è limitata alle Amministrazioni della Ricerca ed alle funding agencies nazionali. Tale limitazione non consente ai paesi che non dispongono di tali agenzie un adeguato livello di partecipazione ad ERA-NET, che andrebbe estesa anche ad altri soggetti.

Per quanto riguarda l'art. 169, è stato possibile attuare un solo progetto, vista la complessità procedurale richiesta dall'adozione di iniziative di questo tipo (procedura di co-decisione del Consiglio e del Parlamento Europeo).

In ricordo del prof. Carlo Salvetti

di Devana Lavrenčič e Giulio Valli

Ai primi di gennaio avevamo finalmente stabilito l'appuntamento, cui lui aveva subito aderito con molto entusiasmo (nella momentanea assenza della moglie Piera infortunata, che lo ha accompagnato per tutta la vita e lo ha aiutato a mantenere importanti legami con i colleghi e con i discepoli), volevamo tornare a ragionare e riflettere di energia nucleare in Italia. Era un argomento che lo trovava sempre pronto e in prima fila, lui che già nell'autunno 1946, l'Italia appena uscita da una catastrofica guerra, si era adoperato con Giorgio Salvini e Mario Silvestri perché ci fosse assicurata, con il Trattato di Pace a Parigi, la possibilità di sviluppare per scopi pacifici l'energia nucleare e ne aveva guidato i primi passi e i successivi sviluppi, dalla fondazione del CISE a Milano, la realizzazione del Centro di Ricerche di Ispra, di cui fu Direttore Generale, alla Vice-Presidenza del CNEN, in pratica una Presidenza, dopo la crisi Ippolito.

Ci eravamo decisi dopo tante titubanze e rinvii, l'obiettivo degli incontri forse troppo ambizioso per le nostre capacità ci aveva fino allora spaventati: dopo le acute e trancianti analisi di Silvestri nel "Costo della Menzogna" degli anni 60, nessuno, nonostante i tanti saggi e libri prodotti, era più riuscito a descrivere con altrettanta pregnanza e vivacità (o anche vis polemica, più che giustificata in certe situazioni!) le successive vicende nucleari né a misurarsi con l'interrogativo sempre aleggiante tra noi: come era stato possibile che un paese, tra i più civili e considerati nel mondo (membro del G8), e che con tanto entusiasmo si era gettato sullo sviluppo di una nuovissima fonte di energia (un miraggio per un paese allora povero dotato di abbondante capacità di lavoro ma scarse risorse energetiche endogene) investendovi cospicue risorse finanziarie e tutta la passione e l'ingegno dei suoi migliori neo-laureati (fisici, ingegneri, e tanti altri, chimici, geologi, medici, biologi ecc.) in una congiuntura così favorevole da non essere forse mai più ripetibile, ebbene il paese intero, classe politica, media, sistema industriale, mondo scientifico con molti dei suoi illustri esponenti, in un momento di follia collettiva, pur giustificata da un gravissimo incidente in un paese peraltro piuttosto lontano e da noi diverso, tra l'87 e l'88 gettasse a mare un patrimonio umano e di ricerche e strutture anche industriali, che, con pazienza e tenacia, si era cercato di costruire in oltre 30 anni. Quasi una furia distruttrice che repentinamente svaniva, non appena si fossero varcate le nostre frontiere, qualunque fosse la direzione, Ovest, Nord, Est in paesi di analogo livello di civiltà. Considerazioni queste cominciate quasi casualmente con lui nel dicembre 1992, galeotto un bel convegno a Pisa indetto in occasione dei 50 anni dal funzionamento del primo reattore nucleare, la criticità della pila di Fermi a Chicago, presenti alcune figure storiche della grande Fisica Italiana già collaboratori di Fermi, con il commovente abbraccio tra Gilberto Bernardini e Bruno Pontecorvo, appena tornato in Italia dopo la sua scelta per l'URSS. E noi, inaspettatamente gratificati della compagnia di Salvetti e Silvestri, li ascoltavamo discutere più o meno seriamente del disastro economico determinato dal blocco ormai irreversibile delle centrali nucleari (scadeva il periodo di moratoria nella massima indifferenza politica) mentre nell'aria le tempeste di Tangentopoli favorivano battute pungenti sulla conversione a gas della centrale di Montalto.

Silvestri purtroppo scomparve improvvisamente un paio di anni dopo, una grande perdita per noi, che eravamo stati da lui educati e formati. Ma per fortuna quelle prime conversazioni ironiche e profonde con Salvetti continuarono allietando piacevoli serate in casa di comuni amici. Le sue considerazioni ci introducevano, con vivacità e vis polemica, alla conoscenza diretta di tanti fatti di cui era stato protagonista e soprattutto ci portavano a una visione più ampia di problemi e contraddizioni da noi vissute, da lui acquisita dirigendo importanti Istituzioni Internazionali.

Aveva iniziato nei primi anni 50, Visiting Professor in India, assistendo e guidando l'Ente Atomico Indiano verso quelle scelte che hanno poi portato un paese, cosiddetto del Terzo Mondo, al successo nello sviluppo di una filiera nazionale di reattori ad acqua pesante, tipo CANDU, con un'originale linea di sviluppo di combustibili a base di torio. Poi nel 1959, era diventato Direttore di ricerca all'Agenzia internazionale per l'Energia Atomica di Vienna (l'AIEA) e successivamente, prima Governatore per l'Italia e poi Presidente del Consiglio dei Governatori della stessa Agenzia. Non aveva abbandonato l'Italia, proprio allora da lui lanciata nelle prime fasi di sviluppo dell'energia atomica, ma non aveva condiviso né voluto subire l'infausta decisione, velleitaria e tutta politica, di cedere all'EURATOM il Centro di Ispra, appena inaugurato e frutto di tanti appassionati sforzi; e per coerenza aveva dato le dimissioni da Direttore del Centro. E fu preveggente, la situazione politica infatti non ancora matura e gli interessi nazionali già troppo forti da permettere lo sviluppo di progetti comuni di ricerca, lasciarono

campo libero a una nuova burocrazia, l'EURATOM, che impegnò il Centro di Ispra in un ambizioso e poco realistico progetto, il reattore ORGEL moderato ad acqua pesante e refrigerato ad organico, il cui fallimento determinò uno stato di crisi irreversibile mai più superato.

Uomo di larghe visioni, era insofferente di limiti e schieramenti politici, anche a livello internazionale, e mostrò doti non comuni di diplomazia scientifica in un periodo in cui le divisioni tra blocchi, enti e nazioni non facilitava l'incontro fra diversi pensieri. Già negli anni 60, il 22 ottobre 1965, firmava a Mosca l'accordo di collaborazione per lo sfruttamento pacifico dell'energia atomica tra il Comitato statale dell'URSS per lo sfruttamento dell'energia Atomica e il Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare Italiano (URSS-Italia Pagine di Storia 1917-1984, Mosca 1985); era il primo accordo scientifico tra i due paesi dopo il secondo conflitto mondiale.

E' stato sempre apprezzato interlocutore e ascoltato consigliere e amico dei nucleari di tutto il mondo, e in particolare dopo l'incidente di Chernobyl nei consessi internazionali sull'energia (Moscow Energy Club). Persona di grande rigore, sopportava poco le imprecisioni, le superficialità, il pressapochismo, al punto di indignarsi anche quando era in ospedale negli ultimi giorni di vita e di sollecitare gli amici per un'energica precisazione. Aveva una grande cultura, e, sempre attento e aggiornato sui progressi della fisica, amava allargare la discussione allo stato degli Enti di Ricerca, l'ENEA cui aveva dedicato tanto della sua vita in primo luogo, e alle ricerche che vi si conducevano dai laser alla fusione termonucleare, il passo successivo e ben più arduo della fissione nell'uso pacifico dell'energia nucleare. Aveva seguito con entusiasmo e passione sin dall'inizio la realizzazione del JET a Culham (Gran Bretagna) e ne aveva progressivamente registrato successi e difficoltà in un cammino che si dimostrava, e proprio nei risultati più avanzati conseguiti, sempre più impervio: lungo quel cammino il plasma diventava inesorabilmente instabile e disrompeva. Sarebbe occorso un maggior coraggio, poter perseguire anche altre vie e, come scienziato, non perdonava che l'arroccamento su ITER e solo su ITER stesse facendo perdere all'Italia l'opportunità di realizzare la prima sperimentazione di accensione termonucleare.

Avevamo imparato a conoscere e ammirare in lui e nelle sue conversazioni il saper intrecciare analisi profonde con l'ironia e la leggerezza di chi ha intensamente riflettuto sugli eventi da lui vissuti, e in più una ricca e colorata aneddotica, data dalla conoscenza diretta di genesi e retroscena di molte scelte, strategie, uomini. Tutto questo ci affascinava e su questo contavamo per farci guidare. Purtroppo, per affrontare con una giusta prospettiva argomenti complessi che ci avevano anche direttamente coinvolto, rinviavamo l'incontro in attesa di staccarci dal lavoro quotidiano, e quando di recente ciò avvenne, colpevole più che la sorte la nostra irresolutezza, il tempo era scaduto. Carlo Salvetti ci ha lasciato e nessuno ha più quella sua profonda, colorata e vivace memoria storica. Le domande di sopra, coscienti che in sua assenza non riusciremmo mai a misurarci correttamente con loro, rimangono senza risposta in attesa, e lo auspichiamo a breve, di uno storico della ricerca qualificato e motivato, che sappia fare un'efficace sintesi delle tante e anche brillanti risposte parziali finora prodotte.

Salvetti è stato il "professore" che ha aiutato la formazione e l'inserimento di molti giovani nelle società scientifiche e di ricerca italiana; questo non solo per le sue enormi doti di ricercatore e di scienziato, ma anche per la sua capacità di ascoltare le persone che lavoravano con lui, di metterle a proprio agio, di valorizzare la loro capacità di pensare. Pur essendo un grande professore universitario era accessibile e capace di non nascondere in un cassetto i lavori di persone che potevano diventare futuri concorrenti.

Con il Prof. Salvetti aveva preso la libera docenza a Milano Paolo Loizzo, che aveva lavorato come fisico del reattore, non solo sui reattori ideati, progettati e costruiti in Italia, ma anche affrontando per primo l'incidente di Chernobyl, non per quanto riguardava le sue conseguenze ma per le cause che lo avevano determinato. Solo qualche mese prima della morte di Loizzo è uscito il suo libro "Centrali Nucleari o il Diavolo che non c'è" e in questo incoraggiato dal prof. Salvetti, come un contributo alla testimonianza storica e discussione scientifica e civile sull'energia nucleare.

Salvetti aveva una mente capace e brillante e aveva la grande dote di rendere piacevole il parlare di temi complessi e politici, come ad esempio della ricerca scientifica in Italia. "La moglie Piera - racconta Germana Cesarano - validissima formatrice e insegnante dei nostri figli, è stata l'insegnante di matematica dell'ultimo anno di Liceo del mio papà e Salvetti il professore con cui si è laureato mio zio Lucio Businaro. Papà è stato poi mandato da Salvetti in America per imparare le nuove tecnologie di ricerca nucleare".

Vorremmo concludere con l'auspicio che l'ENEA, la cui missione fondativa era lo sviluppo pacifico dell'energia nucleare, obiettivo che sta tornando di pregnante attualità, ritrovi le sue radici profonde, nuova linfa, slancio e progettualità, e in questo contesto dedichi al Prof. Carlo Salvetti, a buon diritto uno dei padri dell'energia nucleare in Italia, una sala convegni o un istituto.

Ebollizione in convezione forzata in condizioni di microgravità

**GIAN PIERO CELATA
ANNUNZIATA D'ORAZIO
MARCO GERVASI
ALBERTO LATTANZI
LUCA SIMONETTI
GIUSEPPE ZUMMO**

ENEA
UTS Fonti di Energia e Cicli
Energetici Innovativi

studi & ricerche

L'ebollizione in convezione forzata, utilizzata nella produzione di energia e nell'industria di processo, viene ritenuta interessante anche per i satelliti per telecomunicazione e le piattaforme spaziali, dove occorrono sistemi di raffreddamento più sofisticati e in grado di rimuovere elevate quantità di calore

Forced-convection boiling under microgravity conditions

Abstract

ENEA, together with the Energy Thermofluid Dynamics Institute of the Innovative Energy Sources and Cycles UTS, has started a research project, funded by ASI, ESA and Snecma Moteurs, on forced-convection boiling under microgravity conditions.

The project, funded by the Italian and European Space Agencies and Snecma Moteurs, aims to characterize the thermofluid dynamics of forced-convection boiling in pipes under microgravity conditions, in order to determine the project conditions for tow-phase-cooled space equipment.

As a rule, microgravity conditions produce an increase in bubble size, and this change in bubble geometry goes together with a deterioration in heat-exchange conditions. The influence of gravity on heat exchange lessens as coolant speed and the quantity of steam in the outflow channel increase. The analysis of the effect of gravity on bubble geometry square with the findings on heat exchange. The rebathing of walls at high temperature is strongly influenced by the level of gravity. Compared with gravity conditions on earth, speeds are up to four times less

L'ebollizione in convezione forzata si incontra in molte applicazioni, quali ad esempio la produzione di energia, l'industria di processo ecc.). Recentemente la satellistica spaziale ha presentato una serie di problematiche la cui soluzione potrebbe essere rappresentata dall'utilizzo dell'ebollizione in convezione forzata. Negli anni futuri, le aspettative per i sistemi spaziali, come i satelliti per telecomunicazione e le piattaforme spaziali 'abitate' dall'uomo (Stazione Spaziale Internazionale) cresceranno rapidamente. L'aumento delle prestazioni comporterà inevitabilmente un corrispondente aumento delle potenze termiche in gioco. Conseguentemente, sarà necessario progettare sistemi di raffreddamento più sofisticati ed in grado di rimuovere elevate quantità di calore. D'altra parte, i sistemi termici basati sul raffreddamento in monofase, senza cambiamento di fase del fluido refrigerante, sono vicini alla loro massima capacità termovettrice, e non saranno più in grado di soddisfare ulteriori aumenti di potenza da asportare.

Una strada da percorrere per asportare maggiori quantità di calore, per andare incontro alle nuove sfide spaziali, è quella di progettare sistemi di raffreddamento che operano con cambiamento di fase (ebollizione di fluidi), specie in convezione forzata (ovvero con il fluido in movimento), almeno sotto certe condizioni e/o in alcuni componenti del sistema. Sistemi caratterizzati dal refrigerante in condizioni di ebollizione in convezione forzata, particolarmente efficienti perché sfruttano il trasporto del calore latente di vaporizzazione, sono perciò molto importanti per ridurre la dimensione ed il peso di piattaforme spaziali e di satelliti. Tali sistemi risultano essenziali per i reattori nucleari spaziali richiesti per le missioni spaziali di lunghissima durata, ma anche per il material processing ed i life support systems in condizioni di microgravità.

Occorre anche dire che, qualora si abbia a che fare invece con un sistema di raffreddamento in monofase liquido, un eventuale transitorio incidentale porterebbe inevi-

tabilmente all'ebollizione del liquido. È evidente come la gestione del transitorio incidentale richieda una conoscenza appropriata della fenomenologia dell'ebollizione in condizioni di microgravità.

L'ENEA, con l'Istituto di Termofluidodinamica Energetica, ha iniziato un progetto di ricerca per la completa caratterizzazione termofluidodinamica dell'ebollizione in convezione forzata all'interno di tubi in condizioni di microgravità, grazie ai finanziamenti ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e Snecma Moteurs (industria aerospaziale francese), e ad un progetto triennale ESA (Agenzia Spaziale Europea) iniziato il 1° ottobre 2004. L'impianto sperimentale denominato MICROBO (MICROgravity BOiling) è stato realizzato e caratterizzato a terra, e la prima campagna sperimentale in microgravità è stata effettuata nel mese di ottobre 2004.

Generalità delle problematiche

Sebbene i meccanismi di ebollizione siano stati largamente e lungamente investigati in condizioni di gravità terrestre, la comprensione della termofluidodinamica dell'ebollizione, specie in convezione forzata, in condizioni di microgravità è molto scarsa. In particolare, in convezione forzata, la dimensione delle bolle in condizioni di microgravità tende ad essere più grande di quanto non siano a gravità terrestre, in quanto il distacco della bolla dalla parete scaldante è dovuto alla sola forza di trascinamento per l'ovvia assenza della spinta di galleggiamento.

È evidente che tale effetto tenderà a diminuire al crescere della velocità del fluido, in quanto ad alte velocità la forza di trascinamento può essere predominante rispetto alla forza di galleggiamento e rendere ininfluyente quest'ultima (e quindi ininfluyente l'effetto della gravità).

La conoscenza di questi limiti di velocità (velocità di soglia), che dipende anche dalla geometria delle tubazioni e dalla quantità di vapore presente, è fondamentale per l'eventuale progettazione di un sistema in con-

dizioni operative indipendenti dalla gravità, ovvero per rendersi conto che l'assenza di gravità richiede una progettazione basata sulle conoscenze della fenomenologia dell'ebollizione in microgravità.

La maggiore dimensione delle bolle, qualora il sistema operi con una velocità del fluido refrigerante inferiore a quella di soglia, può dar luogo a coalescenza di bolle che a sua volta può ritardare la ricondensazione del vapore nel fluido. Questo può avvenire nei sistemi in ebollizione sottoraffreddata (molto comuni per la loro elevata efficienza termica), ovvero caratterizzati da una temperatura media del fluido refrigerante inferiore al valore di saturazione, ma localmente – sulla parete scaldante – con una rilevante attività di ebollizione. Ciò dà spesso luogo ad una degradazione delle prestazioni termiche, fino all'insorgere della crisi termica, che rappresenta il parametro limitante di questi sistemi di raffreddamento (per ulteriori informazioni sulla crisi termica si veda il riferimento¹), e la cui insorgenza interrompe l'efficacia del sistema di refrigerazione, con tutte le conseguenze relative, inclusa la possibile rottura per surriscaldamento termico dei materiali da raffreddare.

Un diverso valore della frazione di vuoto nel deflusso, ovvero dell'area di passaggio nel canale di refrigerazione occupata dalla fase vapore (dovuto alla diversa dimensione delle bolle in condizioni di microgravità), altera anche il flow pattern ovvero la distribuzione delle fasi vapore e liquido all'interno del canale. Una corretta conoscenza del flow pattern è essenziale ai fini di una corretta predizione dello scambio termico, delle perdite di carico e dell'insorgenza della crisi termica.

Allo stato attuale le conoscenze di quanto riportato sopra (velocità di soglia, flow pattern, scambio termico, crisi termica, perdite di carico ecc.) sono molto limitate per l'ebollizione in convezione forzata (il metodo più efficace di refrigerazione). I pochissimi risultati disponibili sono molto sparsi e soprattutto contraddittori. Ciò è dovuto alle ridotte opportunità disponibili per effettuare prove

di ebollizione in convezione forzata (voli parabolici, drop tower, razzi vettori, e stazione spaziale internazionale), alla difficoltà di gestire un esperimento con circolazione di fluido nelle condizioni di microgravità, alle ridotte disponibilità di potenza termica, di spazio e di peso nelle varie facilities sperimentali, al costo elevato di tali ricerche. Un'esauriente panoramica di queste problematiche può essere fornita da²⁻⁶.

Un altro aspetto di rilevante interesse per la propulsione aerospaziale riguarda il quenching di pareti a temperatura molto maggiore di quella del fluido. In particolare, riveste importanza il problema del chilling di combustibili criogenici, quali l'ossigeno liquido e l'idrogeno liquido, che vengono utilizzati a temperature di poche decine di gradi Kelvin nei razzi vettori del progetto Ariane V (realizzati dalla Snecma Moteurs). Quando vengono a contatto con pareti metalliche a poche decine di gradi centigradi l'effetto è equivalente a quello di un fluido a temperatura ambiente che impatta contro pareti surriscaldate a qualche centinaio di gradi (rewetting). Questo aspetto della ricerca è di specifico interesse della Snecma Moteurs che ha bisogno di sperimentazione ad hoc per conoscere il comportamento della fenomenologia in assenza di gravità.

Facilities sperimentali disponibili

Condizioni di microgravità nell'ambito delle quali eseguire le prove necessarie sono ottenibili con diverse apparecchiature sperimentali: volo parabolico, sounding rockets, drop towers, capsule orbitanti, stazione spaziale internazionale (ISS).

Il volo parabolico, effettuato con aerei commerciali opportunamente modificati, consente di ottenere circa 20 secondi di gravità ridotta (10^2 g), anche se con rilevanti oscillazioni del valore della gravità intorno al valore sopra riportato. Questo fenomeno, noto come g-jitter, è abbastanza deleterio quando si esegue sperimentazione in pool boiling, ma è invece ininfluenza nelle prove

di ebollizione in convezione forzata. In Europa i voli parabolici vengono effettuati utilizzando un Airbus A-300 gestito dalla Società Francese Novespace e finanziato dall'ESA, Agenzia Spaziale Europea. Questo aereo è il più grande mai usato per voli parabolici, ed è in grado di ospitare 12-14 esperimenti a bordo (in funzione delle loro dimensioni) con oltre 50 sperimentatori, giornalisti e personale di sicurezza.

La possibilità di avere ricercatori a bordo e la durata ragionevole delle condizioni di microgravità rendono il volo parabolico il primo approccio utile per la sperimentazione di ebollizione in convezione forzata. Attualmente l'aereo della Novespace esegue tre campagne sperimentali all'anno per l'ESA, aperte a progetti europei, due per il CNES, Agenzia Spaziale Francese, riservati a progetti francesi, ed una o due per l'Agenzia Spaziale Tedesca. Una campagna sperimentale consiste in tre giorni di volo parabolico con circa trenta parabole eseguite ogni giorno.

L'utilizzo di razzi, sounding rockets, consente di ottenere fino a 750 secondi di microgravità (razzo MAXUS in Europa) affetta da un bassissimo valore del g-jitter.

Ovviamente l'esperimento è unmanned e l'apparecchiatura sperimentale deve essere molto compatta e completamente automatizzata, con conseguenti limitazioni per esperimenti di ebollizione in convezione forzata. Le opportunità di sperimentazione sono molto ridotte e comunque limitate a progetti specifici.

Condizioni di microgravità possono anche essere ottenute con le drop tower dove una capsula contenente gli esperimenti viene fatta cadere in caduta libera realizzando alcuni secondi di microgravità. La drop tower di ZARM a Brema, dopo la chiusura di quella giapponese del JAMIC vicino Sapporo, attualmente consente la maggior durata delle condizioni di microgravità fino a poco meno di 10 secondi. Anche in questo caso l'esperimento è unmanned, la durata delle condizioni di microgravità è assai limitata per

esperimenti di ebollizione in convezione forzata, la cui gestibilità, senza operatore, è assai ridotta.

Capsule orbitanti, come la russa FOTON, possono ospitare piccoli laboratori per esperimenti di microgravità, quali il FluidPac (Fluid Physics Facility) che, inizialmente concepito per osservazioni di tensione superficiale e fenomeni termici lungo l'interfaccia liquido-gas, può anche essere usato per diversi esperimenti di fisica dei fluidi, inclusa l'ebollizione. La piattaforma ospita 13 diversi diagnostic tools e fino a 4 container sperimentali possono esservi alloggiati e operati contemporaneamente. La missione orbitale dura 15 giorni e i dati sperimentali possono essere memorizzati a bordo e parzialmente inviati a terra per telemetria. Nel corso del 2005 è previsto un lancio con 4 esperimenti di fisica dei fluidi, di cui uno relativo al pool boiling in presenza di campi elettrici (che sembrano poter compensare l'assenza di gravità nella dinamica delle bolle). Anche in questa facility sperimentale test di ebollizione in convezione forzata trovano spazio con grande difficoltà.

La più promettente facility europea per esperimenti in bifase (ebollizione e condensazione) è la Fluid Science Laboratory (FSL), che sarà alloggiata nel laboratorio europeo Columbus a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS).

La FSL è una facility multi-user per effettuare ricerca di fisica dei fluidi in condizioni di microgravità, e può operare in modo completamente automatico oppure solo parzialmente automatico, potendo essere controllata a bordo dagli astronauti dell'ISS, oppure da terra attraverso il cosiddetto telescience mode. La FSL è equipaggiata con una ricca disponibilità di strumentazione molto avanzata (telecamere high-speed ed infrarosso, particle image velocimetry, traccianti a cristalli liquidi, interferometria ecc.). È evidente che la FSL rappresenta l'obiettivo a lungo termine per una completa e definitiva sperimentazione sull'ebollizione in convezione forzata.

Il Progetto ENEA e l'impianto MICROBO

L'Istituto di Termofluidodinamica dell'ENEA ha iniziato da alcuni anni una ricerca sull'ebollizione in convezione forzata in tubi di piccolo diametro (da 1 a 6 mm) con l'obiettivo di caratterizzarne il comportamento termofluidodinamico in condizioni di microgravità. Lo scopo del progetto è quello di colmare, almeno in parte, le lacune conoscitive descritte in precedenza per le applicazioni spaziali già discusse. Dopo un programma di ricerca biennale con ASI, che ha consentito di realizzare l'apparecchiatura sperimentale, l'attività di ricerca è iniziata con un finanziamento della Snecma Moteurs, e proseguirà con un Progetto triennale dell'ESA, che vede coinvolti oltre l'ENEA, l'Università della Provenza a Marsiglia, l'Ecole Centrale de Paris, l'Università Libera di Bruxelles, l'Università di Pisa, l'ETH di Zurigo, l'Università di Darmstadt e il CEA di Parigi. Al progetto collaborano anche alcune industrie europee, tra cui la Snecma Moteurs (anche finanziariamente) con specifico riferimento alle attività dell'ENEA che coordina, nel Progetto ESA, le attività sull'ebollizione in convezione forzata, cui collaborano anche l'ETH di Zurigo, l'Università Libera di Bruxelles e l'Università della Provenza a Marsiglia. Gli altri partner, oltre all'Università della Provenza, si occupano del pool boiling, attività coordinata dall'Università di Darmstadt. Tra gli obiettivi del Progetto, oltre allo svolgimento dell'attività di ricerca, c'è anche la definizione di una proposta di ricerca sull'ebollizione per la Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Come già detto, l'ENEA, grazie a un finanziamento dell'ASI, ha realizzato un impianto sperimentale per prove di ebollizione in convezione forzata in volo parabolico. L'impianto, denominato MICROBO (MICROgravity BOiling), è progettato per essere installato a bordo dell'Airbus A-300 della Novespace e rappresenta l'unico impianto oggi disponibile in Europa, e tra i pochi al mondo, per esperimenti di questo tipo. La sua progettazione

è molto spinta ed è caratterizzata da soluzioni di alto livello tecnologico. In particolare, deve resistere ad un'accelerazione massima di 9g, e deve essere caratterizzato da un livello di affidabilità altissimo.

L'affidabilità massima ha una motivazione duale. Da un lato l'affidabilità dell'impianto è richiesta per motivi di sicurezza a bordo dell'aereo. Quest'ultimo opera in condizioni estreme durante il volo parabolico e, ovviamente, non è consentita alcuna perdita di refrigerante dall'impianto né altri incidenti che possano mettere a repentaglio l'incolumità dei passeggeri e la sicurezza del volo. La parte di piping contenente il fluido sperimentale è soggetta ad un sistema di doppio contenimento che prevenga ogni possibile problema sopra descritto. L'affidabilità dell'impianto è necessaria anche dal punto di vista tecnico. Viste le limitate opportunità di volo (tre campagne sperimentali all'anno, con tre giornate di volo a campagna, ciascuna di trenta parabole) e considerate le molte richieste per accedervi e gli alti costi associati (le campagne sperimentali durano circa due settimane tra preparazione pre-volo, preparazione dell'esperimento sull'aereo e giornate di volo), la perdita di ogni parabola rappresenta una significativa perdita di denaro e di opportunità sperimentale che ritarda il raggiungimento degli obiettivi del progetto.

L'impianto deve anche essere altamente automatizzato per consentire ai ricercatori ENEA presenti sull'aereo di operare con la tempistica più breve, visti i tempi ridottissimi a disposizione durante l'esecuzione delle varie parabole. Altri vincoli di progettazione molto stringenti riguardano la compattezza ed il peso, e la disponibilità molto limitata di potenza termica a bordo dell'aereo, che hanno obbligato a soluzioni ad hoc per rientrare nei criteri progettuali dati dalla Novespace e dall'autorità di sicurezza al volo francese (le campagne sperimentali partono dall'aeroporto di Bordeaux). Tutti i componenti richiedono specifici fissaggi che consentano di sopportare i 9g richiesti dalle specifiche di progettazione.

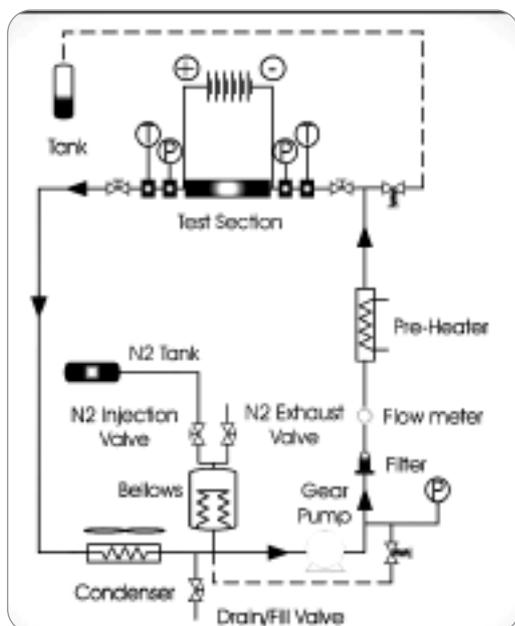


Figura 1
Schema dell'impianto
MICROBO

Uno schema di massima dell'impianto MICROBO è riportato in figura 1, mentre la figura 2 riporta una foto dell'impianto già montato a bordo dell'Airbus A-300, con i tre ricercatori che hanno volato durante l'esecuzione della campagna sperimentale del 26-

fluidi), il condensatore. La pressurizzazione dell'impianto è ottenuta con azoto. La pressione massima dell'impianto è 6 bar, limitata a circa 2 bar per le prove con sezioni di prova in pirex. In quest'ultimo caso (sezione di prova utilizzata nella campagna sperimentale di ottobre 2004), la temperatura massima della parete del pirex è di 230 °C, mentre quella massima del fluido usato (FC-72, avente una densità pari a circa 1,8 quella dell'acqua, ma un calore latente di circa un decimo) è di 90 °C. La potenza termica disponibile a bordo dell'aereo è di 150 W per il preriscaldatore elettrico e di 180 W per la sezione di prova. Le dimensioni dell'impianto sono 66 cm x 194 cm x 54 cm, mentre il suo peso totale è di 210 kg. La sezione di prova in pirex utilizzata nella prima campagna sperimentale è riportata in figura 3, mentre uno schema della posizione delle microtermocoppie di parete è riportato in figura 4. Il diametro interno è di 6,0 mm e la sua lunghezza riscaldata è di 165 mm. Il fluido è riscaldato tramite il riscaldatore a filo avvolto intorno al tubo, al fine di consentire la visualizzazione del processo di ebollizione all'interno della sezione di prova. Sulla superficie esterna sono applicate 15 microtermocoppie, sviluppate presso l'ENEA, per la misurazione della temperatura esterna della parete, ai fini della valutazione dei coefficienti di scambio termico. La sezione di prova consente di effettuare riprese filmate del fenomeno per la valutazione del flow pattern. Nel corso del triennio delle attività del Progetto, che prevede da quattro a sei voli parabolici con l'impianto MICROBO, verranno effettuati test con sezioni di prova da 1, 2, 4, e 6 mm di diametro interno, sia di pirex che di acciaio inossidabile (queste ultime per una più accurata valutazione del trasferimento del calore). Verrà analizzato in dettaglio lo scambio termico in ebollizione in convezione forzata sia satura che sottoraffreddata, con la valutazione della velocità di soglia in funzione della geometria della tubazione e delle condizioni termoidrauliche del fluido refrigerante. Verrà effettuata un'accurata mappatura del flow pattern



Figura 2
Foto dell'impianto
MICROBO a bordo
dell'Airbus A-300

28 ottobre 2004. L'impianto consiste fondamentalmente di una pompa (portata massima 500 ml/min), un filtro, due misuratori di portata, un preriscaldatore elettrico, la sezione di prova (dove avviene l'ebollizione del

in microgravità oltre alla determinazione delle condizioni di crisi termica.

Prove specifiche saranno anche dedicate all'analisi del quenching di pareti ad alta temperatura.

Il volo parabolico

Come già detto, il volo parabolico viene effettuato a bordo di un Airbus A-300, riportato in figura 5, gestito dalla Novespace per conto dell'ESA e del CNES.

Una descrizione del raggiungimento dei diversi livelli di gravità ottenuti a bordo dell'aereo sono descritti in figure 6 e 7.

Durante la fase di salita e di discesa della parabola (figura 6), quando la concavità della curva che l'aereo percorre è rivolta verso l'alto, la forza centrifuga dovuta al moto non uniforme dell'aereo è diretta parallelamente alla componente della gravità lungo l'asse ortogonale al piano dell'aereo, cui si riferisce anche la portanza delle ali, opposta alla gravità. Pertanto, in queste due fasi della parabola la risultante lungo l'asse normale al piano dell'aereo risulta superiore addirittura alla gravità terrestre e varia da 1,5 a 1,8 g. Da notare che queste condizioni sono particolarmente critiche per l'organismo umano e possono facilmente provocare mal d'aereo se il passeggero si muove troppo rapidamente (i passeggeri sono trattati con farmaci specifici per ridurre questo problema). Durante queste fasi sia il raggio di curvatura che la velocità dell'aereo variano continuamente per mantenere condizioni di gravità il più possibile costanti. Le forze agenti sull'aereo secondo l'asse del piano di calpestio dell'aereo sono l'attrito (resistenza dell'aria) e la spinta dei motori, e non prendono parte alla definizione delle condizioni di gravità.

Nella parte alta della parabola (figura 7), quando la concavità della curva seguita dall'aereo è rivolta verso il basso, la forza centrifuga si inverte e quindi va a compensare la componente della forza di gravità ortogonale all'asse orizzontale dell'aereo realiz-

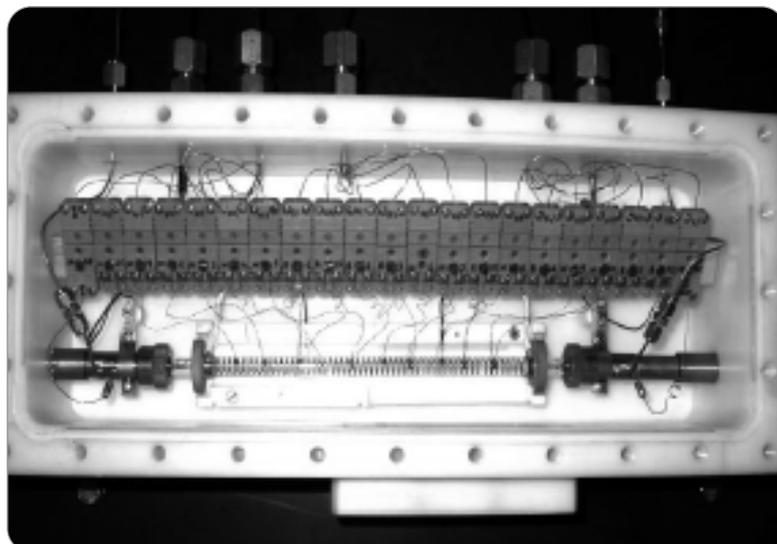


Figura 3
Foto della sezione di prova in pirex usata nella campagna sperimentale di ottobre 2004

zando un livello di gravità molto basso (tipicamente di 0,01g). Anche in questo caso il raggio di curvatura e la velocità dell'aereo variano con continuità per mantenere costan-

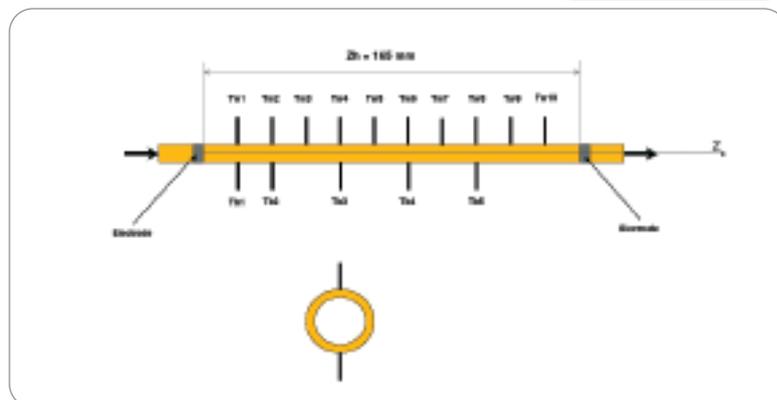


Figura 4
Schema della sezione di prova in pirex usata nella campagna sperimentale di ottobre 2004: posizionamento delle microtermo coppie di parete

te il livello di microgravità. Le oscillazioni del livello di microgravità, g-jitter, dipendono molto dalle condizioni atmosferiche (turbolenza) e dall'abilità del pilota. La figura 8



Figura 5
L'Airbus A-300 Zero-g utilizzato per i voli parabolici dell'ESA

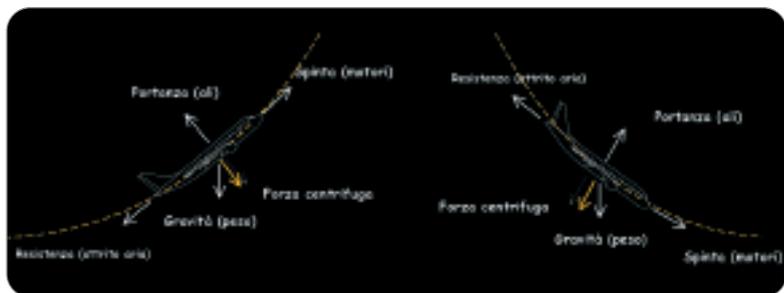


Figura 6
Parte iniziale e finale della parabola: condizioni di ipergravità (1,8g)

mostra tutti i dati tecnici di una singola parabola. L'aereo parte da una quota di 6100 metri con una velocità di 850 km/h ed inizia la parte ascendente della parabola fino a rag-

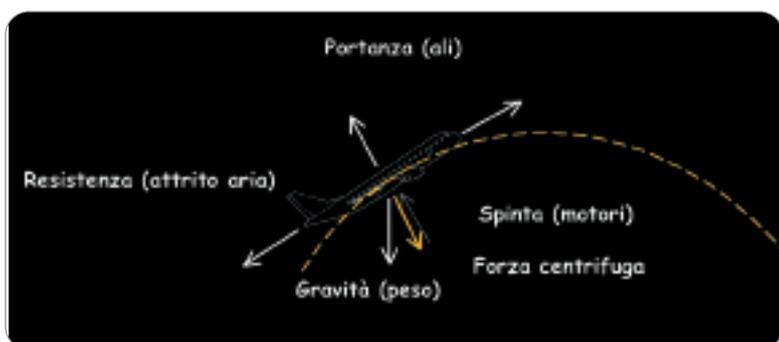


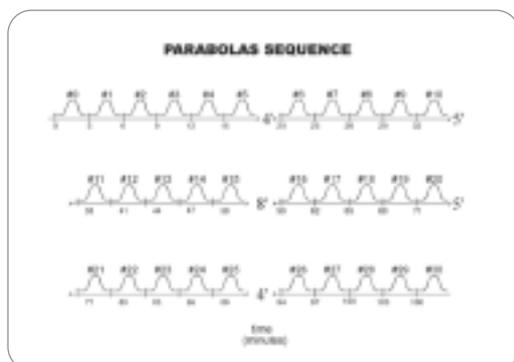
Figura 7
Parte superiore della parabola: condizioni di microgravità ($10^{-2}g$)

giungere ad una quota di 7600 metri un angolo di 47° (in decollo un normale aereo di linea si inclina di soli 18° !!!) riducendo la sua velocità fino a 570 km/h. In questa fase, come detto, la gravità è maggiore di quella terrestre, fino a 1,8 g, e la fase dura per 20 secondi.

Figura 8
Parametri di volo durante la parabola



Figura 9
Sequenza delle parabole in una giornata di campagna di volo parabolico a bordo dell'Airbus A-300



Raggiunta questa inclinazione massima (injection point) l'aereo comincia a coprire la parte superiore della parabola dove si realizza per circa 22 secondi le condizioni di assenza di gravità.

La velocità raggiunge il minimo di 370 km/h nel vertice della parabola, ad una quota di 8500 metri, poi ricomincia ad aumentare nella prima fase di discesa della parabola (sempre in condizioni di microgravità).

Al termine della fase di microgravità (recovery point), ai 7600 metri, la velocità torna a 570 km/h con un angolo massimo di 42° .

Dopo questa condizione l'aereo torna alle condizioni di volo livellato scendendo ai 6100 metri e raggiungendo la velocità di 825 km/h. Anche in questa fase (prima di raggiungere la quota di volo livellato) il livello di gravità è maggiore di quello terrestre, fino a 1,8g, per una durata di circa 20 secondi.

Le parabole si susseguono con una frequenza molto serrata, come mostrato nella figura 9.

Mediamente tra due parabole contigue il tempo è inferiore ai due minuti. In questo intervallo dei tempo bisogna portare l'impianto nelle nuove condizioni di prova. Ogni blocco di cinque parabole offre intervalli di tempo più lunghi per consentire variazioni delle condizioni sperimentali che richiedono tempi maggiori.

La durata totale delle parabole in una giornata di volo è di circa due ore.

La sequenza delle parabole mostra chiaramente come le prove sperimentali devono susseguirsi con una rapidità frenetica e stressante (tra l'altro i ricercatori sull'aereo sono fisicamente molto provati dal susseguirsi di condizioni di micro e macrogravità).

Ciò richiede una programmazione molto accurata e spinta delle prove da eseguire che devono essere provate e riprovate a terra al fine di consentire il massimo utilizzo delle parabole disponibili.

Le figure 10 e 11 mostrano i ricercatori ENEA impegnati nella campagna sperimentale in condizioni di macrogravità e microgravità, rispettivamente.

Risultati sperimentali del primo volo parabolico

La prima campagna sperimentale in volo parabolico (ESA PF38) effettuata dal 18 al 29 ottobre 2004 è stata sponsorizzata dall'ESA (per quanto riguarda il volo parabolico) e dalla Snecma Moteurs per quanto riguarda i costi della missione.

In condizioni di ebollizione, a parte la coalescenza, la dimensione di una bolla di vapore dipende fondamentalmente dal suo valore al distacco dalla parete scaldante. Il diametro di una bolla al distacco, in ebollizione in convezione forzata, dipende dal bilancio di tre forze: la forza di tensione superficiale, che tende a far rimanere la bolla attaccata alla parete, la forza di galleggiamento (legata alla gravità) che tende a staccarla, e la forza di trascinamento (forza di inerzia legata alla velocità del fluido refrigerante) che tende a staccarla. È evidente che in condizioni di microgravità, venendo a mancare la forza di galleggiamento, rispetto ad un'identica situazione con gravità terrestre, il diametro della bolla al distacco è generalmente maggiore. A meno che, già in condizioni di gravità terrestre la velocità del fluido refrigerante sia tale che la forza di trascinamento sia preponderante rispetto al galleggiamento da rendere influente l'eventuale drastica riduzione della gravità. È evidente che questo dipenderà anche dalla pressione di esercizio del sistema (la dimensione di una bolla tende a diminuire al crescere della pressione), dal flusso termico in gioco (effetti di coalescenza e di regimi di deflusso, del tipo a bolle o anulare) e dalla geometria del canale di passaggio (che incide sul regime di deflusso). La dimensione delle bolle influenza la termoidraulica del deflusso sia in termini di perdite di carico che in termini di scambio termico. La conoscenza dei limiti di influenza della gravità su tale fenomenologia risulta determinante per stabilire i criteri di progettazione di sistemi in bifase per applicazioni spaziali. Per condizioni termoidrauliche non influenzate dal livello di gravità la progettazione potrà



Figura 10
I ricercatori ENEA durante una fase di macrogravità

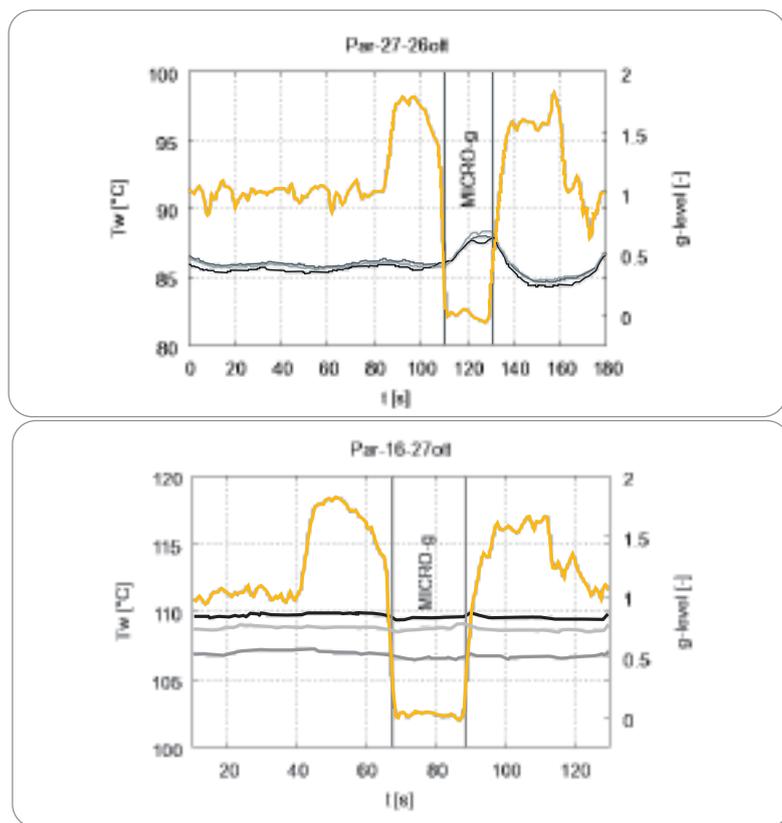
essere eseguita sulla base delle conoscenze a gravità terrestre, mentre per condizioni sensibili al livello di gravità i risultati della ricerca consentiranno di definire dei nuovi criteri per la progettazione di tali sistemi.



Figura 11
I ricercatori ENEA durante una fase di microgravità

Gli obiettivi della prima campagna sperimentale, dove è stata utilizzata la sezione di prova da 6 mm di diametro interno per 165 mm di lunghezza riscaldata, erano i seguenti:

- verificare la funzionalità dell'impianto MICROBO in condizioni di microgravità;
- eseguire la campagna sperimentale di ebollizione in convezione forzata con tubo da 6 mm;
- visualizzare la dinamica delle bolle;
- determinare le soglie di transizione, in termini di velocità del fluido e quantità di vapo-

**Figura 12**

Andamento tipico delle temperature di parete al variare del livello di gravità per bassi valori della velocità del fluido refrigerante (portata specifica 47,5 kg/m²s, equivalenti a circa 6 cm/s; flusso termico, $q'' = 10200 \text{ W/m}^2$, titolo di vapore, $x = -0,05$, pressione di uscita, $p_{\text{out}} = 0,18 \text{ MPa}$, sottoraffreddamento in ingresso $\Delta T_{\text{in}} = 25 \text{ K}$)

Figura 13

Andamento tipico delle temperature di parete al variare del livello di gravità per alti valori della velocità del fluido refrigerante (portata specifica 439 kg/n²s, equivalenti a circa 55 cm/s; flusso termico, $q'' = 37400 \text{ W/m}^2$, titolo di vapore, $x = -0,08$, pressione di uscita, $p_{\text{out}} = 0,16 \text{ MPa}$, sottoraffreddamento in ingresso $\Delta T_{\text{in}} = 15 \text{ K}$)

re presente, oltre le quali l'assenza di gravità non influenza l'ebollizione;

- quenching di pareti ad alta temperatura. Le prove di quenching (ribagnamento di pareti ad alta temperatura) sono prove specifiche per Snecma Moteurs, di loro interesse per le problematiche di chilling del combustibile (idrogeno ed ossigeno liquidi) utilizzato nel motore VINCI (progetto Ariane V), dovendo verificare l'influenza della gravità sulla velocità di ribagnamento.

L'impianto sperimentale MICROBO ha avuto una funzionalità perfetta in tutte le condizioni di volo ed ha consentito l'esecuzione di 93 prove sperimentali su 93 parabole effettuate nei tre giorni di volo parabolico, di cui 15 di quenching ed il resto di ebollizione.

Di seguito viene riportata una breve descrizione dei principali risultati sperimentali ottenuti nella prima campagna sperimentale.

Influenza della velocità del refrigerante sull'effetto della gravità nello scambio termico

I grafici di figura 12 e 13 mostrano l'andamento di alcune termocoppie di parete del-

la sezione di prova (in totale sono 15) al variare del livello di gravità e per due valori della velocità del fluido refrigerante, rispettivamente 6 cm/s per la figura 12 (portata specifica, $G = 47,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$, flusso termico, $q'' = 10.200 \text{ W/m}^2$, titolo di vapore, $x = -0,05$, pressione di uscita, $p_{\text{out}} = 0,18 \text{ MPa}$, sottoraffreddamento in ingresso $\Delta T_{\text{in}} = 25 \text{ K}$), e 55 cm/s per la figura 13 (portata specifica, $G = 439 \text{ kg/m}^2\text{s}$, flusso termico, $q'' = 37.400 \text{ W/m}^2$, titolo di vapore, $x = -0,08$, pressione di uscita, $p_{\text{out}} = 0,16 \text{ MPa}$, sottoraffreddamento in ingresso $\Delta T_{\text{in}} = 15 \text{ K}$). La traccia del valore del livello di gravità si legge sull'asse 'y' alla destra del grafico. Sono evidenti le due zone di macrogravità (circa 1,8g) prima e dopo la regione di circa 20 s di microgravità. Con riferimento alla figura 12 (bassa velocità, 6 cm/s) le tre termocoppie di parete tracciate mostrano un andamento abbastanza regolare e costante durante il volo livellato (precedente la prima zona di macrogravità) ed anche durante la prima zona di macrogravità. Durante l'intervallo di microgravità le temperature di parete tendono a crescere significativamente indicando (la temperatura del fluido resta costante durante questa fase) che lo scambio termico si riduce con la microgravità. Infatti, se analizziamo l'equazione di bilancio termico $q'' = h (T_w - T_f)$ dove q'' è il flusso termico (W/m^2), h il coefficiente di scambio termico ($\text{W/m}^2\text{K}$), T_w è la temperatura di parete ($^{\circ}\text{C}$), e T_f è la temperatura del fluido ($^{\circ}\text{C}$), poiché q'' e T_f restano costanti durante il periodo di microgravità, l'aumento di T_w è dovuto ad una riduzione di h , ovvero ad una degradazione del trasferimento del calore. Nella fase di macrogravità successiva alla microgravità le temperature scendono addirittura al di sotto dei valori precedenti i transitori gravitazionali (effetto dovuto al collasso delle bolle durante la seconda fase di macrogravità), ma l'effetto è transitorio e i valori di temperatura tendono poi a quelli che avevano prima delle variazioni gravitazionali.

Se analizziamo invece la figura 13, dove la velocità del fluido refrigerante è di 55 cm/s (ovvero nove volte maggiore), si può osser-

vare come durante la fase di microgravità le temperature di parete rimangono praticamente costanti durante tutte le fasi del volo. I due casi esaminati si riferiscono a situazioni di scambio termico con titolo di vapore (quantità di vapore presente) praticamente costante e non elevatissimo (condizioni di quasi-saturazione all'uscita della sezione di prova). In queste condizioni e con l'attuale sezione di prova l'influenza della gravità sullo scambio termico scompare quando la velocità del fluido refrigerante supera i 48-50 cm/s.

Influenza del titolo di vapore sull'effetto della gravità nello scambio termico

Poiché, come detto, l'influenza eventuale della gravità sullo scambio termico dipende anche dalla quantità di vapore presente, alcune prove sono state eseguite in condizioni molto diverse di titolo di vapore (a parità di velocità del fluido refrigerante) per verificare quest'ulteriore dipendenza. Se osserviamo la figura 14, abbiamo le stesse condizioni della prova riportata in figura 12 con l'eccezione del flusso termico, che è 23.000 W/m^2 invece di 10.200 W/m^2 , con conseguente incremento del titolo di vapore da $-0,05$ a $0,3$. In queste condizioni di alto titolo anche per velocità del refrigerante molto basse l'influenza della gravità sullo scambio termico risulta trascurabile. Si può ragionevolmente asserire che al di sopra di un titolo di vapore pari a $0,3$, l'effetto della gravità è trascurabile indipendentemente dalla velocità del fluido refrigerante.

Inter-relazione della velocità del fluido e del titolo di vapore sull'effetto della gravità nello scambio termico

Poiché l'effetto della gravità sullo scambio termico abbiamo visto essere dipendente dal valore della velocità e dal titolo di vapore, è importante avere una rappresentazione globale dell'influenza della gravità al variare dei due parametri. La matrice sperimentale eseguita nel corso della campagna sperimentale è stata ideata per ottenere quest'informazione e la relativa rappresentazione globale che lega velocità e titolo di vapore è riportata in figura 15. La linea tratteggiata rap-

presenta la linea di transizione circa l'influenza o meno della gravità sullo scambio termico in funzione di questi due parametri termofluidodinamici.

Influenza del livello di gravità sulla geometria delle bolle

Si è già detto circa l'influenza della dimensione delle bolle e della loro distribuzione sul trasferimento del calore. È pertanto intuitivo aspettarsi che la dimensione delle bolle in microgravità sia maggiore laddove esiste una differenza marcata in termini di scambio termico, mentre dove lo scambio termico non è influenzato dalla gravità ci si può aspettare un'equivalenza nella geometria delle bolle e nella loro distribuzione.

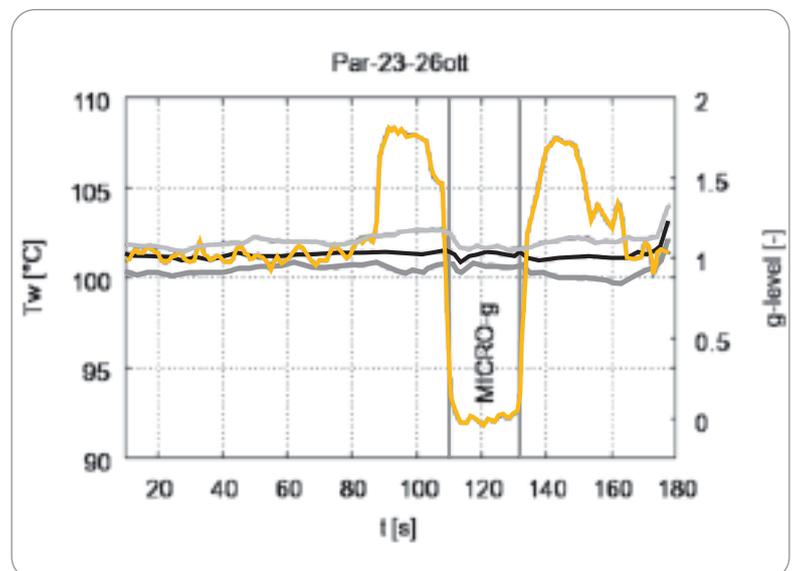
La figura 16 mostra due foto tratte dai filmati ad alta velocità registrati durante l'esecuzione delle prove. La foto in alto si riferisce a condizioni di gravità terrestre (foto presa durante il volo livellato precedente la macrogravità), mentre la foto in basso è relativa a condizioni di microgravità. Le condizioni termofluidodinamiche sono di bassa velocità e basso titolo di vapore ($G = 96 \text{ kg/m}^2\text{s}$, equivalenti a circa 12 cm/s , $q' = 22.660 \text{ W/m}^2$, $x = -0,06$, $p_{\text{out}} = 0,18 \text{ MPa}$, $\Delta T_{\text{in}} = 27,5 \text{ K}$).

In queste condizioni lo scambio termico è influenzato dal livello di gravità (si riduce al ridursi della gravità).

Si può notare come la dimensione delle bol-

Figura 14

Andamento tipico delle temperature di parete al variare del livello di gravità per bassi valori della velocità del fluido refrigerante e titoli di vapore elevato (portata specifica $47,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$, equivalenti a circa 6 cm/s ; flusso termico, $q'' = 23.000 \text{ W/m}^2$, titolo di vapore, $x = 0,3$, pressione di uscita, $p_{\text{out}} = 0,18 \text{ MPa}$, sottoraffreddamento in ingresso $\Delta T_{\text{in}} = 25 \text{ K}$)



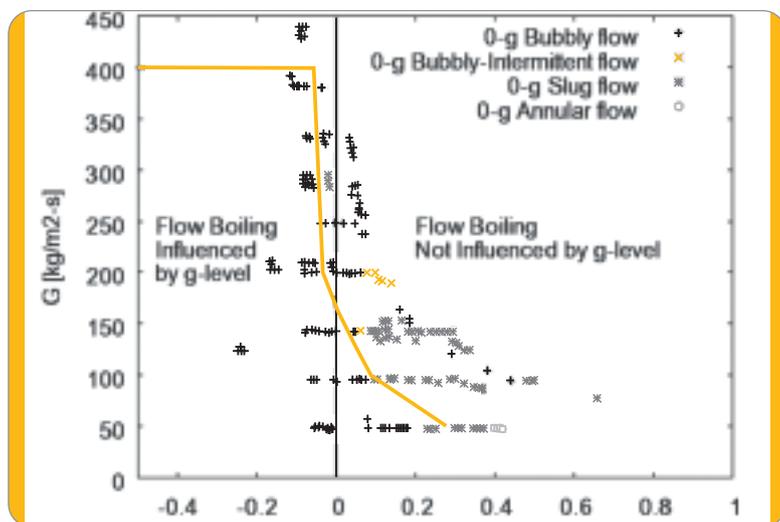


Figura 15
Mappa 0-g dell'inter-relazione della velocità del fluido refrigerante e del titolo di vapore in merito all'influenza del livello di gravità sullo scambio termico

le in microgravità sia decisamente maggiore di quanto si abbia a gravità terrestre.

Aumentando la velocità del fluido refrigerante (a parità di altre condizioni) fino ai valori per cui la gravità risulta trascurabile per lo scambio termico, la dimensione delle bolle risulta pressoché identica sia per gravità terrestre che in microgravità. Un tipico esempio è riportato in figura 17, dove, analogamente alla figura 16, la foto in alto si riferisce a condizioni di gravità terrestre, mentre la foto in basso è relativa a condizioni di microgravità ($G = 439 \text{ kg/m}^2\text{s}$, equivalenti a circa 55 cm/s , $q'' = 37.400 \text{ W/m}^2$, $x = -0,08$, $p_{\text{out}} = 0,16 \text{ MPa}$, $\Delta T_{\text{in}} = 15 \text{ K}$).

In entrambe le condizioni la geometria delle bolle è decisamente simile, confermando i risultati descritti per quanto riguarda lo scambio termico.

Influenza del livello di gravità sul quenching

Le prove di quenching sono state effettuate provocando l'asciugamento della parete scaldante mediante deviazione della portata di refrigerante con valvola a tre vie durante la fase di volo livellato e di macrogravità, e riattivando la portata (con circolazione dall'alto verso il basso) nella sezione di prova 'asciugata' e con pareti ad alta temperatura all'inizio dell'intervallo di microgravità. La temperatura di parete è stata portata nelle varie prove a 160, 190, e 230 °C, con varie condizioni termofluidodinamiche, secondo le specifiche Snecma Moteurs.

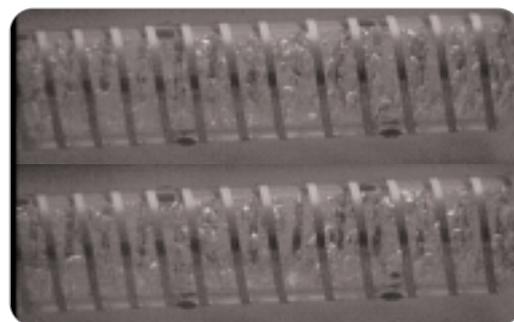
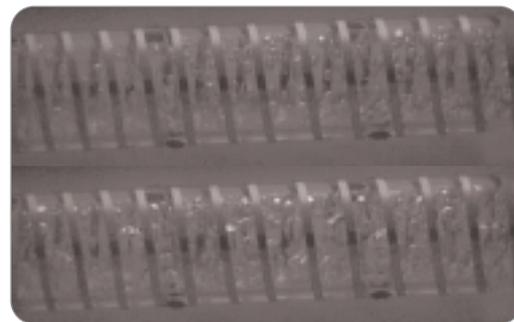
Figura 17
Foto del flow pattern a 1-g (sopra) e 0-g (sotto) per alte velocità e bassi titoli di vapore ($G = 439 \text{ kg/m}^2\text{s}$, equivalenti a circa 55 cm/s , $q'' = 37.400 \text{ W/m}^2$, $x = -0,08$, $p_{\text{out}} = 0,16 \text{ MPa}$, $\Delta T_{\text{in}} = 15 \text{ K}$)

La figura 18 riporta un tipico andamento per $T_w = 230 \text{ °C}$. La temperatura di parete, misurata con due termocoppie (tipici andamenti delle 15 termocoppie installate) viene riportata in funzione del tempo. I dati riportati nella figura si riferiscono alla prova effettuata in condizioni di microgravità ed alla prova di riferimento effettuata a terra in condizioni termoidrauliche identiche.

Dalla figura risulta evidente come il ribagnamento della parete asciutta (abbattimento della temperatura di parete seguente la reintroduzione del fluido refrigerante all'interno della sezione di prova) sia notevolmente rallentato in microgravità rispetto ad analoghe condizioni in gravità terrestre. Il ritardo raggiunge nel caso mostrato nella figura i 10 secondi di tempo.

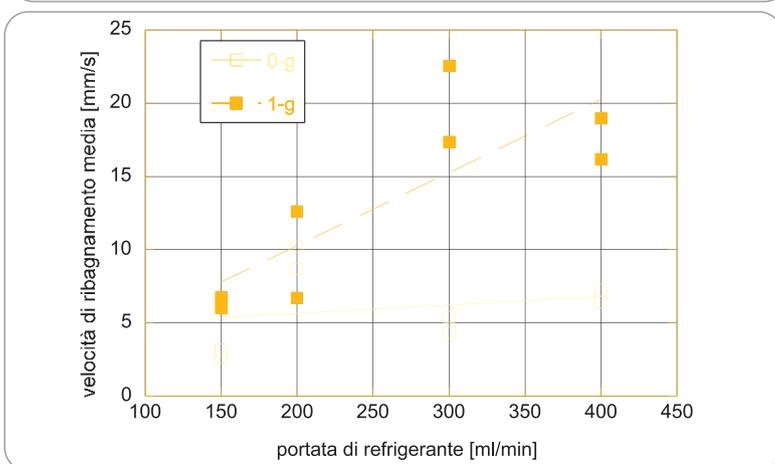
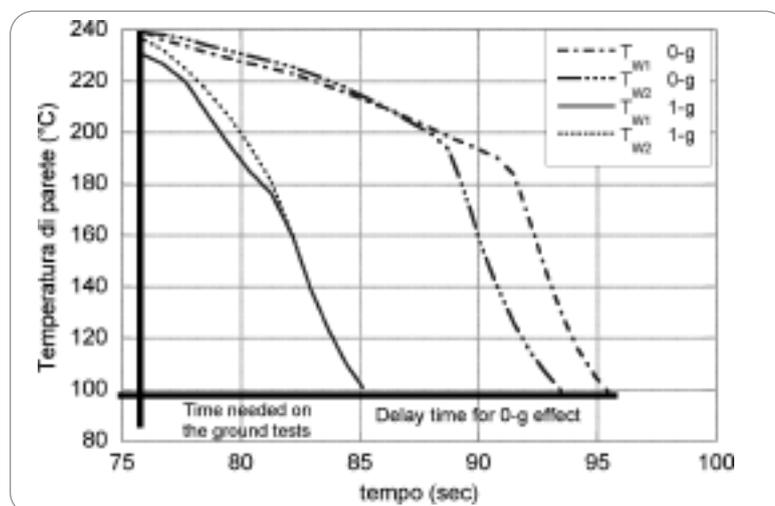
La figura 19 mostra invece l'andamento della velocità di ribagnamento in funzione della velocità del fluido refrigerante in condizioni di microgravità e di gravità terrestre.

Come si può vedere la riduzione della velocità di ribagnamento è davvero drastica passando, alla massima velocità del refrigerante, da un valore di circa 20 mm/s a 5 mm/s .



Conclusioni

L'ENEA, con l'Istituto di Termofluidodinamica Energetica dell'UTS Fonti di Energia e Cicli Energetici Innovativi ha iniziato un progetto di ricerca sull'ebollizione in convezione forzata in microgravità, finanziato da ASI, ESA e Snecma Moteurs. L'obiettivo è quello di caratterizzare la termofluidodinamica dell'ebollizione in convezione forzata all'interno di tubi in condizioni di microgravità al fine di determinare le condizioni di progetto per apparecchiature spaziali raffreddate in bifase. Generalmente, le condizioni di microgravità producono un aumento delle dimensioni delle bolle dovuto alla mancanza della forza di gravità nel bilancio di forze per il diametro di distacco della bolla dalla parete (restano la tensione superficiale, adesiva, e la forza di trascinamento, che tende a staccare la bolla). A questa variazione della geometria delle bolle corrisponde un deterioramento delle condizioni di scambio termico. L'influenza della gravità sullo scambio termico tende a diminuire al crescere della velocità del fluido refrigerante ed alla quantità di vapore presente all'interno del canale di deflusso. Per bassi titoli (fino alle condizioni di saturazione all'uscita dalla sezione di prova) l'influenza della gravità può considerarsi trascurabile per velocità del fluido superiore ai 48-50 cm/s. Per titoli elevati, superiori al 30%, l'influenza della gravità sullo scambio termico è di fatto trascurabile indipendentemente dalla velocità del fluido refrigerante. L'inter-relazione velocità del fluido – titolo di vapore ed il relativo effetto sull'influenza della gravità sullo scambio termico è stata quantificata. L'analisi della geometria delle bolle in funzione della gravità si è mostrata in ottimo accordo con i risultati relativi allo scambio termico. Ad alte velocità e bassi titoli di vapore, ad esempio, la geometria delle bolle è di fatto indipendente dalla gravità, mentre per velocità inferiori la microgravità è caratterizzata da bolle di dimensioni maggiori. Il ribagnamento di pareti ad alta temperatura è fortemente influenzato dal livello di gravità. Rispetto alle condizioni di gravità



terrestre si raggiungono velocità fino a quattro volte inferiori.

Bibliografia

1. G.P. CELATA and A. MARIANI, *Critical Heat Flux, Post-dryout and Their Augmentation*, ENEA, RT/ERG/98/10.
2. H. OHTA, A. BABA and K. GABRIEL, "Review of Existing Research on Microgravity Boiling and Two-Phase Flow. Future Experiments on the International Space Station", *Ann. N.Y. Academy of Sciences*, 974, pp. 410-427, 2002.
3. H. OHTA, *Heat Transfer Mechanisms in Microgravity Flow Boiling*, 974, pp. 463-480, 2002.
4. P. DI MARCO, "Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: European Research", *J. Japanese Society of Microgravity Applications*, 20, pp. 252-263, 2003.
5. J. KIM, "Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: US Research", *J. Japanese Society of Microgravity Applications*, 20, pp. 264-271, 2003.
6. H. OHTA, "Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: Japanese Research", *J. Japanese Society of Microgravity Applications*, 20, pp. 272-285, 2003.

Figura 18
Tipico andamento della temperatura di parete dopo la riattivazione della portata; confronto delle prove in microgravità con prove a terra

Figura 19
Andamento della velocità di ribagnamento media in funzione della portata del fluido refrigerante in condizioni di microgravità e di gravità terrestre

Verso la nozione di **biodiversità**: evoluzione dei principali **concetti ecologici**

**DONATO BERGANDI¹,
GIULIA MASSINI²,
LAURA PADOVANI³**

¹Chargé de Recherche,
Museum National d'Histoire
Naturelle, Paris

ENEA^{2,3}
UTS Biotecnologie, Protezione
della Salute e degli Ecosistemi

studi & ricerche

La diversità biologica viene ormai considerata dalla comunità scientifica come una proprietà fondamentale della natura. Per comprendere il ruolo e la portata degli attuali studi sulla biodiversità, nell'articolo viene analizzato il processo storico-scientifico attraverso il quale si è arrivati alla definizione del concetto di biodiversità

*Towards the notion of **biodiversity**: evolution of the principal **ecological concepts***

Abstract

Since the 1980s, biological diversity has been perceived by the scientific community as one of the fundamental properties of nature. To fully understand the role and reach of current studies of biodiversity and the social and economic implications of its preservation and management, it is useful to consider the historical-scientific process whereby the concept of biodiversity was defined. These studies are unequivocally linked to recognition of multiple levels of biological organization (population, community, ecosystem, landscape, biosphere), and their origin and theoretical foundations lie in the history of ecology

Nel corso degli ultimi decenni si è andata formando la consapevolezza che lo sviluppo dei paesi, sui lunghi tempi, sia sempre più vincolato ad una impostazione che coniughi la crescita economica con la sostenibilità dell'uso delle risorse naturali. La varietà delle forme viventi, intesa in tutti i suoi aspetti e i suoi livelli di complessità, è tra le componenti attualmente riconosciute ad alto rischio di depauperamento. Per questi motivi i termini "biodiversità" e "sviluppo sostenibile" hanno di gran lunga superato l'ambito della ricerca scientifica e del dominio degli esperti, per entrare a far parte del linguaggio corrente e divenire parte integrante del dibattito politico, etico e sociale.

La ricerca delle unità fondamentali per lo studio della natura: un processo evolutivo sempre attivo

I primi passi dell'Ecologia

L'ecologia è una scienza relativamente giovane. Tuttavia un ampio spettro di precursori lungo il corso dei secoli, in ordine sparso, ha individuato alcuni dei suoi tratti caratteristici. Da Aristotele a Linneo, da Alexandre de Humboldt a Karl Möbius per arrivare a Charles Darwin, vari autori hanno compreso che la vita si fonda su di una complessa rete d'interdipendenze tra gli organismi ed il loro ambiente. Tuttavia, è solo nel XIX secolo, con Haeckel (1866), che gli elementi base di questa disciplina scientifica sono chiaramente identificati: l'ecologia viene ini-

zialmente definita come la scienza che si occupa delle relazioni degli organismi con il loro ambiente, cioè, dell'insieme delle condizioni che permettono agli organismi di esistere.

Nei decenni successivi, una lenta e travagliata ricerca degli oggetti di studio, delle "unità fondamentali della natura", ha caratterizzato le prime fasi dell'evoluzione dell'ecologia. In questa ricerca, l'ecologia vegetale ha giocato un ruolo predominante. Alcuni pionieri dell'ecologia come C. McMillan (1896) e H. C. Cowles (1899) hanno introdotto il concetto di "successione vegetale", che sarà più tardi ripreso e sviluppato secondo una prospettiva organicista da F. E. Clements (1905, 1916, 1936)¹. Nei primi decenni del XX secolo, quando si considerano i modelli interpretativi dei fenomeni ecologici, le unità fondamentali della ricerca in ecologia sono: il climax, il bioma, l'insieme delle relazioni mutuali tra le piante e gli animali (Clements 1905), l'associazione vegetale, intesa come un assemblaggio fortuito d'individui appartenenti a specie diverse (A. G. Gleason 1926), la comunità biotica, intesa metaforicamente come un "organismo complesso" (J. Phillips 1931, 1934)².

In questo periodo le diverse scuole di pensiero scientifico entrano in competizione per imporre l'uso di un termine e le sue accezioni concettuali, piuttosto che un altro, avendo come obiettivo l'egemonia epistemologica della disciplina. Il riconoscimento dell'importanza del "compartimento animale" all'edificio della natura, ad eccezione di Möbius con il suo concetto di biocenosi (1883), subentra più tardi.

¹ Clements considera quale unità fondamentale della vegetazione il "climax" (dal greco *κλιμαξ* che significa "scala"). Come un organismo la comunità vegetale nasce, si sviluppa, matura, si riproduce e muore – il climax ne rappresenta l'ultimo stadio di sviluppo. Una tale unità è connessa in una maniera inseparabile a specifiche condizioni climatiche (1916, pp. 124-125).

² Il termine 'organismo complesso' in tale contesto non riveste lo stesso significato attribuitogli fino a quel momento dalla biologia, secondo cui la comunità biotica era un assemblaggio di specie animali e vegetali con relazioni di interconnessione più o meno intense. Secondo Phillips, e Clements, in opposizione alla prospettiva di Gleason, la comunità biotica più che ad un insieme di specie, è paragonabile ad una sorta di "organismo collettivo", costituito da varie specie animali e vegetali che si succedono le une alle altre, secondo una organizzazione prevedibile e nella quale ogni specie svolge un ruolo funzionale alla persistenza e allo sviluppo della comunità intesa come un *unicum*.

D'altra parte nella metà degli anni 20, e precisamente nel 1925 e nel 1926, Lotka e Volterra elaborano indipendentemente equazioni elementari di accrescimento di popolazione. I loro studi consentono l'avvio all'analisi del successivo livello di complessità ecologica, l'interazione tra popolazioni, principalmente di tipo predatorio e competitivo, ed introducono uno strumento forte negli studi ecologici: l'uso dei modelli matematici.

Una pietra miliare: l'individuazione del concetto di ecosistema

Nel 1935 A. Tansley, uno dei massimi fondatori dell'ecologia vegetale, in un paradigmatico articolo – “The use and abuse of vegetational concepts and terms” – introduce il concetto di “ecosistema”, una nozione più integratrice, più olistica delle nozioni che la avevano preceduta, poiché si fonda sull'interdipendenza, non solo delle specie animali e vegetali, ma anche sulla loro sostanziale interconnessione e dipendenza dai fattori ambientali che ne permettono l'esistenza³.

Anche se con questo termine l'unicum ontologico costituito dalla comunità biotica e dall'ambiente, è stato definitivamente messo in rilievo e integrato dall'ecologia anche nei metodi di ricerca, non si deve comunque credere che la sua accettazione sia stata immediata. Negli anni 50 la disputa non si era ancora del tutto conclusa: Evans, un ecologo teorico, ben fotografava la situazione dell'epoca “I hope that (the term ecosystem) will eventually be adopted universally...” (1956). Al giorno d'oggi, il termine 'eco-

sistema' si è affermato universalmente ed è divenuto “l'unità funzionale di base dei sistemi naturali”. Ovviamente il termine “ecosistema” non si è sostituito a quelli con cui era in competizione, ma si è inserito dopo di essi, come categoria scientifica più inclusiva.

La proposta del concetto di ecosistema di Tansley verrà affiancata qualche anno più tardi da una proposta metodologica che permetterà all'ecologia di divenire una scienza quantitativa fondata sulla termodinamica. R. Lindeman (1942), analizzando le dinamiche trofiche di una comunità biotica lacustre, mostrò come le relazioni energetiche tra gli organismi fossero determinate dall'interconnessione tra i fattori ambientali e le stesse variazioni della successione lacustre, vale a dire, dalle variazioni della diversità in specie della comunità.

La reale concretizzazione di questo modello d'interpretazione dei fenomeni ecologici, che leggerà per sempre l'ecologia alla termodinamica, si attuerà negli anni 60 e 70 con l'ampio contributo dei fratelli Odum – Eugene Paul Odum e Howard Thomas Odum – alla strutturazione del Programma Biologico Internazionale (1964-1974) sotto l'egida del Consiglio Internazionale dell'Unione Scientifica (CIUS). Tale programma era finalizzato alla descrizione della struttura e del funzionamento di diversi tipi d'ecosistemi, avendo come retroterra epistemologico il concetto di ecosistema di Tansley e l'analisi energetica, cioè il metodo trofico-dinamico di Lindeman. Facendo propria una prospettiva di ricerca olistica ed emergentista, i fratelli Odum crea-

³ “But the more fundamental conception is, as it seems to me, the whole system (in the sense of physics), including not only the organism-complex, but also the whole complex of physical factors forming what we call the environment of the biome—the habitat factors in the widest sense. Though the organisms may claim our primary interest when we are trying to think fundamentally we cannot separate them from their special environment, with which they form one physical system.

It is the systems so formed which, from the point of view of the ecologist, are the basic units of nature on the face of the earth. Our natural human prejudices force us to consider the organisms (in the sense of the biologist) as the most important parts of these systems, but certainly the inorganic “factors” are also parts - there could be no systems without them, and there is constant interchange of the most various kinds within each system, not only between the organisms but between the organic and the inorganic. These ecosystems, as we may call them, are of the most, various kinds and sizes. They form one category of the multitudinous physical systems of the universe, which range from the universe as a whole down to the atom”. (Tansley 1935).

GLOSSARIO

Biocenosi: termine coniato da Möbius nel 1877 per indicare l'insieme degli organismi che vivono ed interagiscono in uno specifico habitat.

Costruttivismo: tradizionalmente si considera che le scienze con le loro teorie e osservazioni permettono la "scoperta" una volta per tutte delle caratteristiche della realtà. Il costruttivismo, invece, contrappone l'idea che le ipotesi, le teorie scientifiche e le osservazioni, ci permettono di "costruire" un'immagine del reale che di volta in volta ci avvicinerà sempre di più alla realtà naturale senza per questo raggiungere una conoscenza definitiva, assoluta ed insormontabile.

Dinamiche trofiche: relazioni alimentari secondo le quali all'interno di una comunità si realizza il trasferimento di energia.

Emergentismo: prospettiva filosofica, opposta al riduzionismo, rappresentata dalla proposizione che "il tutto è più della somma delle sue parti". Le proprietà dette emergenti di uno specifico sistema (per esempio, ecologico) trovano il loro fondamento nella fisica e nella chimica, ma una loro piena comprensione oltrepassa ampiamente i limiti di tali discipline.

Ecotono: zona di transizione tra sistemi ecologici adiacenti aventi un set di caratteristiche uniche, definite da scale di tempi e di spazio nonché dalla forza di interazione tra sistemi ecologici adiacenti (Holland 1988 in di Castri et al.). Le caratteristiche degli ecotoni devono comunque essere considerate nel contesto degli ecosistemi circostanti.

Edge effect: interazioni funzionali risultanti dalle connessioni tra ecosistemi adiacenti.

Genoma: è l'insieme del patrimonio genetico di una cellula o di un organismo.

Leopold Aldo (1887-1948): naturalista americano che con fervore promosse la preservazione della *wilderness*, degli ecosistemi naturali, influenzando enormemente i movimenti ambientali anglosassoni.

Livello trofico: stadio di trasferimento dell'energia realizzato da una serie di organismi lungo la catena alimentare.

Matrice: è formata da quegli elementi che, per estensione, connessione e/o funzione, determinano il carattere prevalente del mosaico paesistico.

Olismo: concezione relazionale del reale secondo cui la realtà naturale sarebbe costituita da entità interdipendenti nello spazio e nel tempo.

Ontologia (dal greco: *οντοσ* e *λογος*): discorso, scienza che si occupa del fondamento dell'ordine delle cose, di ciò che è reale in quanto tale, indipendentemente da ogni tipo di preconcetto filosofico o scientifico.

Organicismo: teoria filosofico-scientifica di tipo olistico riguardante la natura dei sistemi naturali e/o sociali. Essa stabilisce un parallelo sistematico tra tali sistemi e il concetto di organismo (es.: i sistemi complessi come gli ecosistemi o le società nascono, si sviluppano e decadono come fossero un organismo).

Paradigma: termine introdotto in storia e filosofia della scienza da Thomas Kuhn (1962). Tra le altre cose, con 'paradigma' si fa riferimento all'insieme di teorie, metodi d'osservazione e protocolli di ricerca e che caratterizzano una specifica comunità scientifica.

Patch: macchie di ecosistemi immersi nella matrice paesistica. Costituiscono elementi di base della struttura dei paesaggi (Forman e Gordon, 1986).

Pool genetico: serbatoio complessivo di geni di una popolazione di organismi.

Principio di esclusione competitiva o principio di Gause: due specie ecologicamente identiche, cioè che occupano la stessa nicchia ecologica, non possono coesistere a lungo. In particolare una specie prevale sull'altra per migliore abilità competitiva, quando una o più risorse chiave divengono limitanti. L'esclusione si realizza quando una specie produce abbastanza individui da impedire alla popolazione dell'altra di accrescersi.

Rete trofica: l'insieme delle interazioni di tipo alimentare che interconnettono le popolazioni di un ecosistema.

Specie: tra le molte definizioni scegliamo quella di Mayr che ha un'impostazione del concetto di tipo ecologico: "La specie è una comunità riproduttiva di popolazioni, riproduttivamente isolata dalle altre specie, che occupa in natura una specifica nicchia ecologica".

Specie alloctone: specie che si sono inserite in areali diversi da quelli in cui si sono evolute.

Simbiosi: relazione interspecifica che favorisce entrambe le popolazioni interagenti. Può essere una relazione facoltativa o obbligata, come nei licheni.

no il paradigma scientifico dell'ecologia moderna, il cui elemento portante è l'identificazione dei modi e delle leggi che sottostanno alla trasformazione dell'energia negli ecosistemi e alla cibernetica (Odum e Odum 1955, Odum 1957, Odum 1971, 1993)⁴.

Un ulteriore ampliamento delle prospettive: l'ecologia del paesaggio e l'ecologia globale

Il processo creativo delle unità fondamentali della natura non si conclude con la "costruzione" dell'entità ecosistemica. Verso la seconda metà degli anni 70, ricevono un forte impulso gli studi sull'ecologia del paesaggio (landscape ecology) e dell'ecologia globale, quest'ultima avente come oggetto di studio la biosfera e le sue dinamiche chimico-fisiche globali. Questi ambiti sono emersi come due nuove prospettive di ricerca che ancor oggi sono in pieno sviluppo.

L'ecologia del paesaggio trova le sue radici nell'opera del biogeografo tedesco Carl Troll (1939). Ma è a partire dagli anni 80, che la linea di ricerca franco-americano-canadese sull'ecologia del paesaggio, introducendo nuovi termini chiave nella ricerca (matrix, corridor, patch, disturbance, connectivity, ...), sposta l'attenzione dagli ecosistemi naturali agli ecosistemi antropizzati. Con ciò la scienza integra valenze emergenti dalle dinamiche socio-economiche in atto. Concettualmente il salto è grosso: si passa dall'omogeneità dei processi alla loro eterogeneità, dalla loro stabilità alla loro instabilità ed iterando il concetto di ecosistema, si viene a creare una nuova entità spazio-temporale dell'ecologia contemporanea: il paesaggio, mosaico ecologico composto da elementi

(gli ecosistemi) connessi tra loro da flussi d'energia, di materia e di specie (Forman 1981; Forman e Godron 1981; Forman e Godron 1986; Forman 1995). Nei primi anni 70, James Lovelock, pone le basi dell'ecologia globale. Lovelock (anche in collaborazione con Lynn Margulis) perviene a considerare il pianeta stesso come un unico "organismo", Gaia la terra madre, risultante dalle multiple interazioni tra componenti biotiche ed abiotiche. Anche in questo caso il concetto di ecosistema è assunto come lo sfondo epistemologico che, accompagnato dalla metafora dell'organismo, sarà allargato fino ad inglobare l'intero pianeta. L'intera biosfera è intesa come un sistema cibernetico, come un'entità che si autoregola e controlla l'ambiente chimico-fisico, anche grazie alla componente microbica (1979, 1988, 1991).

A ben guardare, qualunque sia il livello di organizzazione preso in considerazione, dalla popolazione alla comunità biotica, dall'ecosistema al paesaggio, dal bioma fino ad arrivare alla biosfera, l'ecologia, nell'individuare le unità fondamentali della natura, ha sempre seguito la stessa struttura logica: il suo universo scientifico è fin qui costituito da una serie di livelli d'organizzazione che s'inglobano gli uni negli altri costituendo uno spettro gerarchico (Odum, 1983), ed i cui elementi interdipendenti, ad ogni nuovo livello, formano dei sistemi ecologici integrati dotati di specifiche proprietà emergenti.

Dalla diversità specifica alla diversità biologica

A partire dalla metà degli anni 80 il termine 'biodiversità' (biodiversity) ha fatto

⁴ Sull'olismo e l'emergentismo formalmente sostenuti dell'ecologia ecosistemica odumiana vedi: Bergandi (1995, 1998).

irruzione dapprima nell'ambito della comunità scientifica e poi, progressivamente, è diventato uno dei termini più ricorrenti nei dibattiti politici, economici e sociali riguardanti le relazioni uomo-natura. Tale termine, deriva dalla contrazione in una sola parola di "biological diversity" ed è stato proposto da Walter G. Rosen in occasione del Forum Nazionale sulla Biodiversità che si è tenuto a Washington nel 1986 (Wilson e Peter 1988). Pochi anni dopo, la biodiversità diviene uno dei temi portanti della Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e lo Sviluppo che si è tenuta a Rio de Janeiro nel 1992 (Massini et al., 1999).

Il termine 'Biodiversità' designa la varietà delle forme di vita del pianeta, nei suoi vari livelli di complessità. Tale varietà è da considerarsi come una proprietà fondamentale della natura, come l'espressione ed al contempo il fondamento della vita sulla terra. Inoltre, tale termine è l'indizio di una sorta di rivoluzione paradigmatica che mette in relazione ambiti di ricerca che si erano originariamente sviluppati separatamente. Infatti esso rappresenta uno dei "ponti" possibili per mettere in atto l'integrazione tra scienze umane e scienze naturali, così come il fondamento di una possibile, e sperata, "alleanza" tra la ricerca scientifica, la politica, l'economia e l'etica avendo come obiettivi: "la protezione e la conservazione della diversità biologica del pianeta, la gestione sostenibile delle sue componenti e l'equa condivisione dei benefici derivanti dall'uso delle risorse genetiche".

È interessante sottolineare come gli studi sulla diversità biologica siano andati incontro ad un'evoluzione che per certi versi è comparabile a quella delle ricer-

che sulle unità fondamentali della natura che hanno costellato l'ecologia sin dalle sue origini. Per quest'ultima, l'entrata in scena del concetto di ecosistema di Tansley ha trasformato radicalmente la maniera di considerare le altre unità, che precedentemente erano considerate come le sole e uniche unità di riferimento dell'ecologia. Parallelamente, il concetto di "biodiversità" deve essere considerato come l'ultimo nato di una lunga serie di ricerche sulle varietà delle forme di vita in ecologia. Tali ricerche, per molti decenni, si sono dapprima focalizzate sulla "diversità" intesa come "ricchezza in specie"⁵, per poi pervenire gradualmente ad un allargamento dell'ambito di studio che si è concretizzato in un'espansione delle sfere semantiche e metodologiche della nozione di diversità biologica. Suo tratto caratteristico innovativo è quello di riguardare più livelli dello spettro dell'organizzazione biologica e non solo quelli ecologici.

Verso un approccio energetico: le piramidi ecologiche di Elton

Limitando l'analisi al XX secolo, si può constatare che in ecologia il processo di sviluppo che ha condotto all'attuale concetto di biodiversità può essere suddiviso in alcune fasi storiche, ognuna delle quali è caratterizzata da una specifica unità tematica. Una tale analisi metterà in rilievo come, nel corso del secolo, si sia verificata una progressiva complessificazione dei metodi e delle teorie riguardanti le cause ed i meccanismi che sottostanno alla diversità in specie degli ecosistemi. Nella ricerca volta alla identificazione delle specie animali e vegetali negli ecosistemi, una prima fase può essere rin-

⁵ Attualmente, si considera la ricchezza di specie come il numero di specie in un determinato sistema, mentre la diversità di specie è intesa come il numero di specie combinato con l'abbondanza numerica degli individui appartenenti a ogni specie (Spellenberg e Fedor, 2003).

venuta all'inizio degli anni venti. Autori come Arrhenius (1921) e Gleason (1922) proposero le prime formule matematiche per calcolare il numero medio di specie presenti in una data area. Tali studi erano di tipo qualitativo, cioè si limitavano a rilevare la presenza o l'assenza di specie. Qualche anno più tardi, Elton (1927) propose uno degli elementi fondatori dell'ecologia moderna – la piramide trofica – che sarà ripreso e sviluppato da autori quali, Odum (1953), Hutchinson (1959), Hutchinson e MacArthur (1959). Elton osserva che il numero di individui in prossimità della catena trofica è relativamente abbondante, mentre all'apice è relativamente scarso e rileva un progressivo decremento tra i due estremi. L'autore osserva che questo arrangiamento numerico è una caratteristica che si ritrova nelle comunità di tutto il mondo e per la prima volta propone di applicare il termine "piramide di numeri". Inoltre dichiara che l'intera struttura e l'attività della comunità sono dipendenti da questioni inerenti la disponibilità di cibo (Elton, 1927). Tale modello della comunità biotica trovò degli sviluppi matematici sulla base dei lavori di Lotka (1925) e Volterra (1926), che descrissero gli equilibri dinamici di popolazioni interagenti tra loro, e degli sviluppi sperimentali sulla base di quelli di Gause (1934): quest'ultimo esplorò le relazioni trofiche della predazione e della competizione tra popolazioni in interazione e formulò il "principio di esclusione competitiva" o "principio di Gause", presupposto fondamentale per la coesistenza delle specie.

Una seconda fase di studi: omaggio a Santa Rosalia ovvero quante specie di animali ci sono?

Dopo l'interruzione della II Guerra Mondiale, si realizza una seconda fase di studi, che continuando ad articolarsi attor-

no all'apporto eltoniano ed ai suoi sviluppi, durerà sino alla fine degli anni sessanta. Lo studio della tipologia delle specie, della struttura delle comunità biotiche e dei loro rapporti con l'ambiente ne sono i tratti più caratteristici. Hutchinson (1959) in uno studio ormai storico osserva che "Organismi appartenenti a specie differenti possono coesistere, occupando nicchie ecologiche molto simili (vale a dire, avere ruolo simile nella comunità, allo stesso livello trofico) solo se il loro apparato nutritivo è differente, o sono di dimensioni differenti e o esprimono comportamenti sufficientemente differenziati".

Inoltre il concetto di nicchia ecologica permette a Hutchinson di considerare sotto un'altra prospettiva la questione del "perché" della varietà delle specie animali e vegetali. Nel porsi la domanda: "Why are there so many kinds of animals?", l'autore perviene a una risposta che coniuga ecologia ed evoluzione: "(...) it is probable that a group containing many diversified species will be able to seize new evolutionary opportunities more easily than an undiversified group".

Finalmente, la risposta di Hutchinson, che trova ancor oggi supporto in buona parte della comunità degli ecologi, è che nelle comunità biotiche la diversità inter ed intraspecifica rappresenta una garanzia per l'adattamento alle mutevoli condizioni dell'ambiente, oltre che una garanzia di stabilità per l'ecosistema nel suo insieme. In questa fase di sviluppo degli studi, emerge chiaramente come la variabilità climatica e la successione vegetale possano contribuire ad un aumento oppure ad una diminuzione della diversità specifica. In altre parole, un ambiente stabile per considerevoli periodi di tempo geologico, "by allowing space for more niches, enhances faunal diversity" (Klopfer 1959; Connell e Orias 1964). In particolare, con la comunità climax, ultimo stadio della successione vegetale, la diversità

specifica può aumentare determinando una maggiore stabilità degli ecosistemi (MacArthur 1955; Whittaker 1965), oppure, in certe condizioni, può diminuire (Pielou 1966; vedi anche: Loucks 1970). Inoltre, la questione della diversità specifica animale va incontro ad un'ulteriore elaborazione, quando viene chiaramente messa in rilievo l'esistenza della sua correlazione con la diversità strutturale della vegetazione (MacArthur 1957; MacArthur and MacArthur 1961; Pianka 1967; Murdoch et al. 1972).

Biogeografia insulare: una formulazione dei processi di immigrazione ed estinzione delle specie per una determinata area geografica

Basandosi sull'osservazione di Andrewartha e Birch (1954) secondo cui alla frequente estinzione di popolazioni locali sussegue la ricolonizzazione degli spazi lasciati liberi da parte di altre specie, la teoria della biogeografia insulare di MacArthur e Wilson (1963, 1967) contribuisce a compiere un altro importante passo rispetto alla comprensione dei meccanismi che sottostanno alla diffusione delle specie in una data area. Negli anni 60 MacArthur e Wilson s'interessarono alla colonizzazione biologica di quei "laboratori naturali" che sono le isole. Il numero di specie in un'isola dipenderà dalle sue dimensioni, dalla sua distanza dalla terraferma e dalla frequenza ed intensità dei processi d'immigrazione ed estinzione. Il principio euristico proposto dagli autori afferma che l'equilibrio sarà raggiunto "when the immigration and extinction rates, measured in species/unit time, equal each other" (1967). Dal modello deriva che riduzione dell'area ed isolamento concorrono all'im-

poverimento di specie.

La teoria della biogeografia insulare si è rilevata preziosa quando è stata estesa a contesti altri che le isole. Gli ecosistemi terrestri, siano essi naturali o antropizzati, possono essere, in effetti, considerati come delle sorte di isole rispetto alle matrici che li attorniano. L'esistenza di barriere naturali, o la frammentazione generata dalla presenza e dall'azione delle popolazioni umane, determina una distribuzione geografica discontinua delle specie animali e vegetali.

Seguendo la prospettiva euristica della biogeografia insulare, Levins (1969, 1970) propose un modello teorico in grado di spiegare le dinamiche di popolazioni. Secondo l'Autore le popolazioni sono strutturate in spazi discreti (patch), sono omogenee, e sono connesse le une con le altre tramite transfert migratori d'individui⁶. Da Levins in poi le popolazioni, animali e vegetali vengono quindi percepite non più come delle entità ecologicamente e geneticamente monolitiche, ma come delle meta-popolazioni – popolazioni di popolazioni, insiemi di sub-popolazioni o di popolazioni locali.

Alla luce di questa impostazione le dinamiche delle popolazioni locali sono assunte come indipendenti le une dalle altre (asincrone), in modo tale che l'estinzione di una o più sub-popolazioni viene controbilanciata dalla persistenza della meta-popolazione, come un tutto, risultante dall'equilibrio tra estinzioni e colonizzazioni casuali e successive.

Attualmente i lavori fondatori di MacArthur e Wilson e quelli di Levins stanno dando luogo a sviluppi di ricerca, in biologia della conservazione, ecologia delle popolazioni ed ecologia del paesaggio, estremamente importanti per l'identificazione

⁶ Riguardo alle dinamiche di meta-popolazioni in spazi eterogenei si vedano, tra gli altri: Hanski (1991), Wu e Levin (1993) e Hanski (1998).

delle cause e dei meccanismi soggiacenti all'incremento e alla diminuzione delle popolazioni e quindi alla persistenza e all'estinzione delle specie.

Una terza fase di studi: applicazioni pratiche degli studi teorici

Una terza fase d'evoluzione degli studi ha inizio nei primi anni 70 ed arriva ai giorni nostri. Questa fase di ricerche sulla varietà delle specie che popolano il pianeta, ha coinciso con la presa di coscienza scientifica e sociale della crisi ecologica.

L'eterogeneità, la rarità, la debole densità e l'estensione limitata delle specie, su diverse scale spaziali, diventano i punti focali della ricerca (Rabinowitz et al. 1986; May 1988; Wilson e Peter 1988; Gaston 1994). La necessità di preservare le comunità biotiche, e non soltanto le specie che le compongono, viene ormai comunemente accettata (Fritz 1983). L'ecologia affronta i dissesti di origine antropica e spesso le ricerche si focalizzano su problematiche ad alto impatto ambientale⁷. In questo periodo Whittaker (1972) riprende e sviluppa i lavori sugli indici qualitativi misuranti la diversità specifica su varie scale geografiche sistematizzando tre differenti tipi di diversità specifica: alfa, beta e gamma. La diversità alfa è definita: "The number of species per unit area"; (si veda precedentemente Arrhenius e Gleason); la diversità beta è: "The extent of species replacement or biotic change along environmental gradients", cioè, essa consiste nel comparare una serie di habitat misurando le differenze nel numero e nell'abbondanza di specie. Ed infine, la diversità gamma o diversità totale (globale,

regionale) di una zona geografica è: "A product of the alpha diversity of its community and the degree of beta differentiation among them" vale a dire, la diversità globale delle specie nell'insieme degli habitat d'una data regione geografica.

È interessante sottolineare come Whittaker, comunque, perviene alla conclusione secondo cui, come conseguenza della complessità ecologica ed evolutiva, non è possibile avere un solo indice di diversità biologica valido in ogni contesto e per tutti gli obiettivi.

La particolare attenzione focalizzata sulla composizione e l'abbondanza delle specie presenti negli ecosistemi antropizzati, va di pari passo con la sistematizzazione e lo sviluppo delle ricerche in ecologia del paesaggio (Forman e Godron 1986). In particolare, si diviene sempre più coscienti che nella gestione del territorio, la tendenza verso la differenziazione tra habitat (diversità beta) ha come conseguenza diretta l'aumento dell'effetto margine (edge effect), – effetto che era già stato messo in rilievo da Aldo Leopold (1933).

L'attività antropica incrementa la frammentazione dei sistemi naturali: le ripercussioni dalla macroscale alla microscale

Gli ecotoni⁸ – aree marginali degli ecosistemi e, quindi, di contatto tra ecosistemi adiacenti – si caratterizzano per particolari condizioni ecologiche che favoriscono alcune specie, spesso dette "specie di margine", a discapito di altre. In questo contesto è importante considerare che le attività antropiche strutturano il paesaggio secondo caratteristiche tipiche

⁷ È in questa fase che il termine "ambiente" perde la sua connotazione di qualcosa "che circonda" per divenire soggetto esso stesso e si sostituisce, nel linguaggio comune, al termine "natura". In questo periodo storico infatti l'uomo si rende conto che "ciò che lo circonda" entra in crisi: emergono problematiche quali i processi di eutrofizzazione delle acque, le piogge acide e la degradazione delle foreste del nord Europa o "Waldsterben", l'inattesa diffusione di xenobiotici, quali il DDT ed altri.

e ricorrenti: i margini indotti da tali attività aumentano la frammentazione degli habitat, vale a dire, essi producono: “abrupt differences in vegetative structure and composition between contiguous landscape elements” (Yahner 1988, Harris 1988; Hansen et al. 1991). La frammentazione, generando barriere alla migrazione, rischia di ridurre il numero di individui nelle popolazioni fino al di sotto di valori minimi oltre i quali incrementa drasticamente la probabilità di estinzione.

Si riscontra inoltre, che la frammentazione ostacola le interazioni tra popolazioni appartenenti a specie differenti, aumenta il rischio di predazione, favorisce la proliferazione delle specie opportuniste e delle specie alloctone a discapito delle specie indigene e specialiste che preferiscono generalmente spazi omogenei, interferisce con le relazioni simbiotiche. Una delle conseguenze dirette per la diversità biologica, derivante dalla strutturazione frammentata del territorio, è il rischio di impoverimento del pool genetico delle specie indigene. Ci si rende conto che la riduzione di variabilità genetica ha potenziali effetti destabilizzanti sulla comunità biotica, sui processi abiotici degli ecosistemi e, in ultima analisi, sulla diversità regionale (diversità gamma) che può andare incontro ad una netta riduzione (Noss 1983).

La proposizione classica del tritico della biodiversità: diversità genetica, diversità di specie, diversità ecosistemica

Studiando le dinamiche dei processi ecologici, i ricercatori, inizialmente, hanno

impegnato buona parte dei loro sforzi nella comprensione dei fattori determinanti la diversità di specie, e delle ripercussioni di quest'ultima sugli equilibri naturali del nostro pianeta.

La consapevolezza dell'importanza di altri aspetti delle dinamiche ecologiche per la sussistenza delle varietà delle forme di vita, è emersa molto più gradualmente.

Ai fini della conservazione delle specie, nei primi anni 80 alla classica presa in conto della diversità di speciesi è aggiunta la consapevolezza della determinante importanza di altri due aspetti della diversità biologica: la diversità genetica e la diversità ecosistemica (Lovejoy 1980; Norse e McManus 1980; Norse et al. 1986; Wilson e Peter 1988).

Perché gli studi sulla biodiversità coinvolgono in pieno la genetica

La variazione genetica delle popolazioni è alla base dei processi evolutivi: questi risultano dall'interrelazione tra processi ambientali e processi genetici. La pressione selettiva, non omogenea dell'ambiente sugli individui e sulle popolazioni, contribuisce a determinare la variazione genetica di quest'ultime. Gli individui portatori di specifici genoma, e/o di mutazioni genetiche particolari, rispondono in modi più o meno appropriati alle diverse difficoltà ed opportunità presenti nell'ambiente. Coloro che saranno in grado di meglio sfruttare le opportunità, sopravvivranno, si riprodurranno e trasmetteranno parte del loro patrimonio genetico ai loro discendenti, contribuendo in que-

⁸ Il termine 'ecotono' è stato introdotto da Clements (1905) per indicare una zona di connessione tra due comunità, che permette di osservare facilmente i processi di scambio e di competizione esistenti tra due formazioni vegetali vicine. Odum (1971) approfondisce la tematica aggiungendo il concetto di “effetto margine” secondo il quale gli ecotoni, in via teorica, sarebbero caratterizzati da un maggior numero di specie rispetto agli ecosistemi adiacenti poiché contengono specie proprie dell'uno e dell'altro ecosistema.

sto modo all'evoluzione della specie. Più è elevato il numero di popolazioni e d'individui che compongono le specie e maggiore è la probabilità che la diversità genetica di una specie – l'insieme dei caratteri differenti e trasmissibili presenti negli individui della stessa specie - sia elevata. Il rischio d'estinzione per impoverimento del pool genetico delle popolazioni di una specie sarà, quindi, in relazione alla diversità genetica delle popolazioni, al numero di individui delle popolazioni, alle pressioni selettive con particolare riguardo per quelle innescate dalle attività umane.

Diversità di ecosistemi

L'ecosistema è costituito dall'insieme delle popolazioni animali e vegetali e dall'ambiente geo-fisico al quale esse sono associate.

I compartimenti biotici ed abiotici dell'ecosistema sono strettamente interconnessi da flussi d'energia e cicli di materia. L'ambiente fisico influenza la struttura e le caratteristiche delle popolazioni e queste a loro volta, influenzano l'ambiente.

Si può affermare che tra componenti biotiche e abiotiche si realizza una interazione a due vie: l'ambiente abiotico in prima istanza limita distribuzione e performance di piante e animali, mentre le attività degli organismi provocano cambiamenti nei fattori abiotici (Putman and Wratten, 1984) e offrono ad altre specie l'opportunità di occupare nuove nicchie ecologiche.

Una conservazione efficace delle popolazioni e delle comunità deve necessariamente prendere in considerazione la protezione degli ambienti fisici che gli permettono di sussistere. Inoltre, un'elevata diversità ecosistemica – la varietà e il numero d'ecosistemi differenti in una data regione – permetterà di salvaguardare un numero elevato di popolazioni di

specie diverse.

Dall'Earth Summit di Rio (1992) è emersa con forza un'altra componente della biodiversità: la diversità culturale. È l'ultima "nata" ma esplica in sé le crescenti problematiche sociali ed economiche del XXI secolo. Viene, intesa quale "human interactions at all levels" (da Global Biodiversity Assessment, UNEP, 1995) e riconosce l'importante ruolo dei valori sociologici, religiosi, etici ed etnobiologici delle attività umane "... rilevanti per la conservazione e l'uso sostenibile della diversità biologica ..." (Convenzione sulla Biodiversità Art. 8j).

Conclusioni

L'attuale concezione della biodiversità correla ambiti di ricerca che precedentemente erano percepiti dagli scienziati come indipendenti (ecologia delle popolazioni, genetica delle popolazioni, sistematica, ecologia ecosistemica). La proposizione del "trittico" della diversità biologica può, a giusto titolo, essere considerata come la base d'un nuovo paradigma che cambia radicalmente le prospettive. Progressivamente, è emerso uno schema teorico sistemico, gerarchico, relazionale ed olistico della diversità, e quindi dei sistemi ecologici di cui essa è uno tra i molteplici aspetti. Una tale prospettiva epistemologica ha anche risvolti metodologici insopprimibili. Ogni livello d'organizzazione del trittico della biodiversità – genetica, popolazioni (specie), ed ecosistemi – si caratterizza con specifiche proprietà emergenti⁹ che si esprimono attraverso proprie leggi naturali. Ne consegue che un approccio "simultaneamente multi-livello" (Feibleman 1954; Campbell 1974) risulta necessario se si vogliono trovare risposte in merito alle questioni sulla conservazione e sulla gestione della natura, riguardanti scale spazio-temporali così diverse.

Bibliografia

- ANDREWARTHA H.G., BIRCH L.C., 1954. «The distribution and abundance of animals». University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.
- ARRHENIUS O., 1921. «Species and Area» *Journal of Ecology*, 9, 95-99.
- BERGANDI, D., 1995. «'Reductionist holism': an oxymoron or a philosophical chimaera of E.P. Odum's systems ecology», *Ludus Vitalis*, III, 5, 145-180.
- BERGANDI, D., BLANDIN, P., 1998. «Holism vs reductionism: do ecosystem ecology and landscape ecology clarify the debate?», *Acta Biotheoretica*, 46, 3, 185-206.
- CAMPBELL D.T., 1974. «"Downward causation" in hierarchically organised biological systems», in AYALA F.J., and DOBZHANSKY T., (eds.) 1974. *Studies in the Philosophy of Biology*, The MacMillan Press Limited, London, 179-186.
- CLEMENTS F.E., 1905. «Research Methods in Ecology», Lincoln, Nebraska.
- CLEMENTS F.E., 1916. «Plant succession: An Analysis of the Development of Vegetation», Carnegie Institution, Publ. 242, Washington, D.C.
- CLEMENTS F.E., 1936. «Nature and Structure of the Climax», *Journal of Ecology*, 263-284.
- CONNELL J.H., ORIAS E., 1964. «The Ecological Regulation of Species Diversity», *The American Naturalist*, 98, 399-414.
- COWLES H. C., 1899. «The Ecological Relations of the Sand Dunes of Lake Michigan», The University of Chicago Press, Chicago.
- ELTON C. S., 1927. «Animal Ecology», MacMillan, New York.
- EVANS F.C., 1956. «Ecosystem as the Basic Unit in Ecology», *Science*, 123, 1127-1128.
- FEIBLEMAN J.K., 1954. «Theory of Integrative Levels», *The British Journal for the Philosophy of Science*, 5, 59-66.
- FORMAN R.T.T., 1981. «Interaction among Landscape Elements», *Proc. Int. Congr. Neth. Soc. Landscape Ecol.*, Veldhoven, Pudoc, Wageningen.
- FORMAN R.T.T., 1995. «*Land Mosaic. The Ecology of Landscapes and Regions*», Cambridge University Press, Cambridge.
- FORMAN R.T.T., GORDON M., 1981. «Patch and Structural components for a landscape ecology», *BioScience*, 31, 733-740.
- FORMAN R.T.T., GORDON M., 1986. «*Landscape Ecology*», Wiley & Sons, New York.
- FRITZ E.C., 1983. «Saving Species is not Enough», *BioScience*, 33, 5, 301.
- GASTON K.J., 1994. «*Rarity*», Chapman & Hall, London.
- GAUSE G.F., 1934. «*The Struggle for Existence*», Williams and Wilkins, Baltimore.
- GLEASON H.A., 1922. «On the Relation Between Species and Area», *Ecology*, 3, 2, 158-162.
- GLEASON H.A., 1926. «The Individualistic Concept of the Plant Association», *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 53, 7-26.
- HAECKEL E., 1866. «*Allgemeine Entwicklungsgeschichte der Organismen oder Wissenschaft von den entstehenden organischen Formen*» Ed. G. Reiner, Berlin.
- HANSEN A.J., SPIES T. A., SWANSON F.J., OHMAN J.L., 1991. «Conserving Biodiversity in Managed Forests», *BioScience*, 41, 6, 382-392.
- HANSKI I., 1991. «Single-species metapopulation dynamics: concepts, models and observations», *Biological Journal of the Linnean Society*, 42, 17-38.
- HANSKI I., 1998. «Metapopulation dynamics», *Nature*, 396, 41-49.
- HARRIS L.D., 1988. «Edge Effects and Conservation of Biotic Diversity», *Conservation Biology*, 2, 4, 330-332.
- HOLLAND, M. M. 1988 «Scope/Mab Technical Consultations on Landscape Boundaries», in di Castri, F., Hansen, A.J. et Holland, M.M. (eds.), *A New Look at Ecotones*, Biology International, Special Issue, 17, pp. 46-104.
- HUTCHINSON G.E., 1959. «Homage to Santa Rosalia or Why Are There so Many Kinds of Animals?», *The American Naturalist*, 93, 870, 145-159.
- HUTCHINSON G.E., MAC ARTHUR R.H., 1959. «A Theoretical Ecological Model of Size Distributions Among Species of Animals», *The American Naturalist*, 93, 869, 81-92.
- KLOPFER P.H., 1959. «Environmental Determinants of Faunal Diversity», *The American Naturalist*, 93, 873, 337-342.
- LEOPOLD A., 1933. «A Sand County Almanac», Oxford University Press, New York.
- LEVINS R., 1969. «Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control», *Bulletin of the Entomological Society of America*, 15, 237-240.
- LEVINS R., 1970. «Extinction», in Gerstenhaber M. (ed.), *Some Mathematical Problems in Biology*, American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, 75-107.
- LINDEMAN R.L., 1942. «The Trophic-dynamic Aspect of Ecology», *Ecology*, 23, 399-418.
- LOTKA A.J., 1925. «*Elements of Mathematical Biology*», Williams and Wilkins, Baltimore.
- LOUCKS O.I., 1970. «Evolution of Diversity, Efficiency, and Community Stability», *The American Zoologist*, 10, 17-25.
- LOVEJOY T.E., 1980. «Changes in Biological Diversity», in *The Global 2000 Report to the President*, Vol. 2 (The technical report) G.O. Barney (ed.), Penguin Books, Harmondsworth.
- LOVELOCK J.E., 1979. «*Gaia, a New Look at Life on Earth*», Oxford University Press, Oxford.
- LOVELOCK J.E., 1988, «*The Ages of Gaia*», Oxford University Press, Oxford.
- LOVELOCK J.E., 1991. «*Gaia, The Practical Science of Planetary Medicine*» Gaia Books, London.
- MAC ARTHUR R.H., 1955. «Fluctuations of Animal Populations and a Measure of Community Stability», *Ecology*, 35, 533-536.
- MAC ARTHUR R.H., 1957. «On the Relative Abundance

⁹ Un livello d'organizzazione, per esempio un ecosistema, è detto essere dotato di proprietà "emergenti" quando lo studio delle sue componenti, prese in isolamento oppure in relazione le une con le altre, risulta essere inefficace al fine di prevedere o spiegare alcune proprietà che lo contraddistinguono. Ciò è attribuito al fatto che, in una prospettiva gerarchica, il livello in questione deve essere considerato come un "sotto-sistema" di un altro sistema che lo ingloba, di cui ne risente i vincoli e le determinazioni. Per esempio, la comprensione delle dinamiche delle popolazioni e delle comunità biotiche (comportamentali e genetiche) nei processi ecosistemici sono certo necessarie, ma ridurre la spiegazione di tali processi a questi soli elementi rende estremamente difficile cogliere la portata degli effetti dei sistemi, come il paesaggio o la biosfera, di cui l'ecosistema in questione è parte integrante

- of Bird Species», *Proc. Nat. Acad. Sci. Wash.*, 43, 293-295.
- MAC ARTHUR R.H., 1961. «On Bird Species Diversity», *Ecology*, 42, 594-598.
- MAC ARTHUR R.H., WILSON E.O., 1963. «An Equilibrium Theory of Insular Zoogeography», *Evolution*, 17, 373-387.
- MAC ARTHUR R.H., WILSON E.O., 1967. «*The Theory of Island Biogeography*», Princeton University Press, Princeton.
- MASSINI G., NICOLAI C., BORRELLI G., BEONE F., CARRABBA C., SPADA E., PADOVANI L., 1999 «Biodiversità: Rapporto sulla Convenzione di Rio». ENEA, pp 78.
- MC MILLAN C., 1896. «On the Formation of Circular Muskeags in Tamarack Swamps», *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 23, 502-503.
- MAY M., 1988. «How Many Species Are There on Earth?», *Science*, 241, 1441-1449.
- MÖBIUS K., 1883. The Oyster an Oyster Culture», *U.S. Comm. of Fish and Fisheries, Report of Comm. for 1880*, Part 8, 683-751.
- MURDOCH W.W., EVANS, F.C., PETERSON C.H., 1972. «Diversity and Pattern in Plants and Insects», *Ecology*, 53, 5, 819-829.
- NORSE E.A., MCMANUS R.E., 1980. «Ecology and living resources biological diversity», in *Environmental Quality 1980: Eleventh Annual Report of the Council on Environmental Quality*, Council on Environmental Quality, Washington D.C.
- NORSE E.A., ROSENBAUM K.L., WILCOVE D.S., WILCOX B.A., ROMME W.H., JOHNSTONE D.W., STOUT M.L., 1986. «Conserving Biological Diversity in Our National Forests» The Wilderness Society, Washington, D.C.
- NOSS R.F., 1983. «A Regional Landscape Approach to Maintain Diversity», *BioScience*, 33, 11, 700-706.
- ODUM E.P., 1953. «Fundamentals of Ecology», W.B. Saunders Co., Philadelphia.
- ODUM E.P., 1971. «Fundamentals of Ecology» W.B. Saunders Company, Philadelphia.
- ODUM E.P., 1983 «*Basic Ecology*», CBS College Publishing.
- ODUM E.P., 1993. «*Ecology and Our Endangered Life-Support Systems*», Sinauer Associates Inc. Publishers, Massachusetts.
- ODUM H. T., 1957. «*Trophic Structure and Productivity of Silver Springs*», Florida, Ecological Monographs, 27, 55-112.
- ODUM H.T., ODUM E.P., 1955. «Trophic Structure and Productivity of a Windward Coral Reef Community on Eniwetok Atoll», *Ecological Monographs*, 25, 291-320.
- PHILLIPS J., 1931. «The Biotic Community», *Journal of Ecology*, 19, 1-24.
- PHILLIPS J., 1934. «Succession, development, the climax and the complex organism : an analysis of concept», 1, *Journal of Ecology*, 22, 554-571.
- PIANKA E.R., 1967. «Latitudinal Gradients in Species Diversity: A Review of Concepts», *The American Naturalist*, 100, 33-46.
- PIELOU E.C., 1966. «Species-diversity and Pattern-diversity in the Study of Ecological Succession», *Journal of Theoretical Biology*, 10, 370-383.
- PUTMAN R.J. and WRATTEN S.D., 1984 «Principles of Ecology», University of California Press, pp 388.
- RABINOWITZ D. CAIRNS S., DILLON T., 1986. «Seven Forms of Rarity and Their Frequency in the Flora of the British Isles», in Soulé M.E., (ed.), *Conservation Biology: The Science of Scarcity and Diversity*, Sinauer Association, Sunderland, MA, 182-204.
- SPELLERBERG I.F., FEDOR P.J. 2003. «A tribute to Claude Shannon (1916-2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'Shannon-Wiener' Index» *Global Ecology & Biogeography*, 12, 177-179
- TANSLEY A.G., 1935. «The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms», *Ecology*, 16, 3, 284-307.
- TROLL C., 1939. «Luftbildplan und ökologische Bodenforschung», *Z. Ges. Erdk. Berl.*, pp. 241-298.
- UNEP 1995 «Global Biodiversity Assessment» Cambridge University Press, pp. 1140.
- VOLTERRA V., 1926. «Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi», *Atti della R. Accademia nazionale dei Lincei. Memorie della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali*, (VI), 2, 31-113.
- WHITTAKER R.H., 1965. «Dominance and Diversity in Land Plant Communities», *Science*, 147, 250-260.
- WHITTAKER R.H., 1972. «Evolution and Measurements of Species Diversity», *Taxon*, 21, 2/3, 213-251.
- WILSON E.O., PETER M.P., 1988. «Biodiversity», National Academy Press, Washington, D.C.
- WU J., LEVIN S.A., 1994. «A spatial dynamic modeling approach to pattern and process in an annual grassland», *Ecological Monographs*, 64, 447-464.
- YAHNER R.H., 1988. «Changes in Wildlife Communities Near Edges», *Conservation Biology*, 2, 4, 333-329.

Il confinamento geologico della CO₂: una metodologia per affrontare il problema in Italia

F. ZARLENGA¹, R. VELLONE²,
G.P. BERETTA³, C. CALORE⁴,
M.A. CHIARAMONTE⁵, D.
DE RITA⁶, R. FUNICIELLO⁷, G.
GAMBOLATI⁸, G. GIANELLI⁴,
S. GRAUSO¹, S. LOMBARDI⁸,
I. MARSON⁹, S. PERSOGLIA⁹,
G. SERIANI⁹, S. VERCELLI¹⁰

ENEA

¹UTS Protezione e Sviluppo
dell'Ambiente e del Territorio,
Tecnologie Ambientali

²Grande Progetto Idrogeno e Celle
a Combustibile

³Università di Milano

⁴Consiglio Nazionale delle
Ricerche

⁵Ente Nazionale Idrocarburi

⁶Università di Roma 3

⁷Università di Padova

⁸Università di Roma

"La Sapienza"

⁹Istituto Nazionale di
Oceanografia e di Geofisica

¹⁰Università di Roma

"La Sapienza"

studi & ricerche

Fattori economici e ambientali spingono per il confinamento della CO₂ nel sottosuolo più profondo. L'affermarsi di tale tecnologia risulterà legata alla fattibilità tecnica, all'esistenza di sufficienti spazi di stoccaggio, alla sicurezza delle operazioni e, soprattutto, all'accettazione da parte della pubblica opinione e alla definizione dei costi

Geological sequestration of CO₂: a methodology for addressing the problem in Italy

Abstract

The worldwide state of the art about the geosequestration is shown in this paper. How to carry out a complete research in Italy is described in the text, the geology of Italian peninsula is in fact very young and consequently it can induce risks. The most important available geological structures are described, with the useful methodologies to evaluate the spaces in the ground, risks and monitoring. In the paper is also introduced the concept of the research of agreement, which is of paramount importance for the success of some activities on the land, especially in a mature and highly populated society

Come conseguenza del Protocollo di Kyoto, che ha definito una serie d'impegni per l'attenuazione degli effetti dei cambiamenti climatici, i paesi industrializzati si sono impegnati a ridurre, tra il 2008 e il 2012, le emissioni dei sei principali gas serra, del 5,2% rispetto al 1990. Uno dei principali interventi in corso di studio è quello di confinare in formazioni geologiche profonde la CO₂. A dire il vero, tuttavia, le sperimentazioni più importanti sono state realizzate sotto la spinta di fattori prevalentemente economici, più che ambientali. Da decenni infatti le compagnie petrolifere utilizzano la CO₂ per favorire l'estrazione del petrolio e l'esperimento di confinamento geologico della CO₂ fatto dalla Compagnia Statoil nel Mar del Nord (Korbol e Kaddour; 1995; Herzog et alii, 1998) è legato essenzialmente alla forte incidenza economica della Carbon Tax, applicata in Norvegia, sulle emissioni di CO₂ in atmosfera. In tale contesto si è dimostrato più economico rispetto alle tasse stoccare la CO₂ in un acquifero salino.

Per quanto riguarda i quantitativi di CO₂ emessi in Italia, un confronto con il passato ventennio mostra una continua crescita, sia in termini assoluti, sia di contributo percentuale delle emissioni complessive provocate dalla combustione dei combustibili fossili. Nel 1996 il settore elettrico in Italia ha emesso in media 522 g CO₂ per ciascun kWh prodotto, risultando ampiamente al di sopra della media europea (pari a 370 g).

In Italia il settore dei trasporti è tuttavia il maggior responsabile in termini di emissioni, con 145 g CO₂/km percorso, contribuendo in misura del 72% alle emissioni complessive di monossido di carbonio, del 52% a quelle di ossido di azoto e del 46% a quelle di composti organici. La risposta nazionale alla riduzione dei gas serra è contenuta nella delibera CIPE del novembre 1999, che stabilisce una riduzione delle emissioni annue di

circa 100 Mt di CO₂ equivalenti, per il periodo 2008-2012. È pertanto in questo contesto che prende piede a livello internazionale l'idea del confinamento geologico della CO₂, la cui fattibilità, da un punto di vista scientifico e tecnologico, risulta legato essenzialmente a quattro aspetti fondamentali: la fattibilità tecnica, l'esistenza di spazi sufficienti per lo stoccaggio nel tempo dei quantitativi previsti di CO₂, la sicurezza delle operazioni proposte ed infine l'accettazione, da parte delle popolazioni, degli interventi che saranno effettuati e la definizione dei costi. Per quanto riguarda il primo aspetto, va sottolineato come ormai da anni le società petrolifere utilizzino la CO₂ nelle pratiche di EOR (Enhanced Oil Recovery), per cui il pompaggio in strutture geologiche profonde non presenta importanti limiti tecnologici. È invece fondamentale conoscere la reale disponibilità degli spazi necessari per confinare nel sottosuolo i quantitativi di CO₂ prodotta. Un altro aspetto che non può essere sottovalutato è l'accertamento e la ricerca delle condizioni di sicurezza in cui potranno essere avviate fasi sperimentali e a regime, sintetizzabili in studi d'impatto, rapporti con analoghi naturali contenenti CO₂, realizzazione di scenari di rischio, riclassificazione del territorio nazionale in materia di pericolosità geologica (tettonica e vulcanica) e realizzazione di nuova strumentazione per il monitoraggio. Non trascurabile è la concertazione con tutti i soggetti (amministrazioni regionali e organizzazioni non governative) che hanno competenze territoriali o che rappresentano gruppi d'opinione. Purtroppo quanto avviene nel sottosuolo e come influiscano le attività umane in questa realtà non è conoscenza molto diffusa a livello di non specialisti e più in generale della popolazione e questo problema può essere superato solo attraverso un'informazione diffusa, rivolta all'opinione pubblica. L'analisi economica è fonda-

mentale per definire i costi del confinamento geologico a regime, per tonnellata di CO₂ stoccata, così come un'analisi della legislazione vigente e la sua integrazione nelle parti poco esplicite, riguardo all'argomento in esame. Già da tempo in sede europea ed internazionale sono disponibili studi relativi alle problematiche connesse al confinamento, nell'ambito dei seguenti progetti dell'UE, del DOE (Department of Energy USA) e delle più importanti Compagnie petrolifere mondiali:

- Joule II project ;
- Sacs 1, 2 (Thermie Program)
- Gesto, Nascent, Weyburn, CO₂ Store, Recopol, CO₂ Net (V Programma Quadro)
- (V Programma Quadro)
- Applied research and development of technology for the management of greenhouse gases (DOE US);
- CO₂ Capture Project (CCP).

Localizzazione delle aree idonee al confinamento geologico della CO₂

Le possibilità di confinamento geologico della CO₂ sono essenzialmente quattro e derivano da esperienze già condotte o in corso di sviluppo e ricerca (CO₂ Capture and Storage Working Group, 2002; Gale, 2002; Karlstad, 2002; Stevens and Gale, 2000):

- in giacimenti di petrolio ancora in produzione;
- in giacimenti di carbone non sfruttabili;
- in giacimenti esauriti di petrolio e gas;
- in acquiferi salini profondi e/o in campi geotermici non in produzione.

La CO₂ può essere confinata sia come gas che come fluido in condizioni supercritiche in una trappola naturale di gas, di petrolio o in un acquifero, limitato al tetto da uno strato a bassa permeabilità (Hitchon, 1996; DOE, 1993). Un altro meccanismo di confinamento è rappresentato dalla dissoluzione della CO₂ in fase fluida,

utilizzato nelle pratiche di EOR. La dissoluzione della CO₂ abbassa la viscosità del petrolio residuo, facilitandone la risalita nei pozzi. La CO₂ infine può reagire direttamente o indirettamente con i minerali e la materia organica presenti nelle formazioni geologiche diventando parte della matrice solida. In molte situazioni geologiche ci si può aspettare la formazione di carbonati di calcio, magnesio e ferro, e l'incorporamento della CO₂ nella matrice rocciosa. Questa forma di "mineral trapping" della CO₂ potrebbe creare delle forme stabili di intrappolamento, impedendone una possibile reimmissione nell'atmosfera.

Il confinamento della CO₂ in giacimenti d'idrocarburi ancora sfruttabili, come EOR

L'EOR è un insieme di tecnologie utilizzate per aumentare le quantità di petrolio recuperabili dai giacimenti tramite metodi tradizionali. Solo una bassa percentuale di petrolio, infatti, talvolta pari a livelli del 10-15% (IEA, 2000), può essere estratta senza interventi esterni. In questo contesto l'iniezione di CO₂, può facilitare in alcune situazioni specifiche la produzione e innalzare sensibilmente il fattore di recupero. Negli USA circa l'80% della CO₂ prodotta e commercializzata (33 milioni di t/anno di CO₂, estratta e commercializzata da giacimenti naturali) è attualmente utilizzata nelle pratiche di EOR (DOE, 2001), con il vantaggio che i costi delle operazioni di confinamento sono completamente coperti dagli alti ricavi per il petrolio estratto (<http://www.fe.doe.gov>; IEA, 2000). Va sottolineato tuttavia che questa CO₂ non è pura e che questa "miscela", per essere utilizzata in pratiche di EOR, deve avere caratteristiche particolari, in quanto la presenza di certi componenti la renderebbe inutilizzabile. L'ossigeno, per esempio, deve essere assente, perché provo-

ca l'ossidazione dell'olio con precipitazione di fasi solide.

Nel mondo gli esempi di EOR attualmente in corso sono molti, non meno di 74 (IEA, 2000); Fanchi (2000) cita i più importanti. Nell'Hills Field, in California meridionale, operatore Chevron, l'obiettivo del progetto è validare le tecniche di monitoraggio che, in questo caso, sono rappresentate da pozzi di monitoraggio e dai dati elettromagnetici ricavati dai pozzi.

Nel Vacuum Field, in New Mexico, operatore Texaco, l'obiettivo del progetto è validare le tecniche di monitoraggio con misure sismiche attive e passive.

Nel Weyburn Field, in Canada, operatore Pan Canadian, che opera su una formazione carbonatica fratturata, l'obiettivo del progetto è dimostrare i costi effettivi delle tecnologie adottate per il monitoraggio della CO₂.

Nel Schrader Bluff Field in Alaska, operatore BP Amoco, l'obiettivo del progetto è studiare sia la separazione che la cattura della CO₂ in una formazione arenacea; la CO₂ in questo caso sarebbe separata direttamente da impianti di produzione di energia elettrica ed utilizzata in pratiche di EOR, iniettandola sottoforma liquida mista ad acqua.

Il confinamento della CO₂ in giacimenti di carbone non sfruttabili

Nei giacimenti di carbone è presente metano, adsorbito nei micropori e nelle fratture (Byrer e Guthrie, 1998; CO₂ Capture and Storage Working Group, 2002; IEA, 2000). Poiché la CO₂ ha un adsorbimento preferenziale sulla superficie del carbone, iniettandola in questi giacimenti, avviene il desorbimento di 1 molecola di metano da parte di 2 molecole di CO₂ e ciò determina che per ottenere all'incirca 1 m³ di metano bisogna iniettarne da 1 a 5 m³ di CO₂. Da un punto di vista economico si evidenziano sia una grande capacità di stoccaggio della

CO₂ sia la possibilità di estrarre metano da commercializzare sul mercato, il che riduce sicuramente i costi delle operazioni di stoccaggio e può portare addirittura a produrre profitto.

La temperatura e la pressione controllano tuttavia i processi di adsorbimento (White et alii, 2001) e conseguentemente la capacità di stoccaggio di un determinato giacimento. Alcuni esperimenti hanno evidenziato, ad esempio, che ad un incremento di temperatura corrisponde un decremento della capacità di adsorbimento del carbone, e che forti aumenti di pressione causano il blocco dell'adsorbimento della CO₂ sul carbone.

Negli USA (Byrer e Guthrie, 1998) è stato calcolato che esistono circa 6000 miliardi di tonnellate di carbone, considerato non estraibile con la tecnologia oggi disponibile, perché ubicato a profondità maggiori di circa 1800 m. Essi pertanto rappresentano siti potenziali per lo stoccaggio della CO₂ e per il recupero del metano in essi contenuto.

Il confinamento della CO₂ in giacimenti di olio e gas depletati

I giacimenti di olio e gas depletati rappresentano trappole naturali, nelle quali si sono conservati nei tempi geologici gli idrocarburi, in seguito estratti dall'uomo. Se da un punto di vista teorico è possibile pensare ad un loro utilizzo per il confinamento della CO₂, va tuttavia sottolineato come gli spazi occupati in precedenza dagli idrocarburi siano ora occupati dall'acqua, che può entrare nei giacimenti sia naturalmente che artificialmente.

In New Mexico (Fanchi, 2000), operatore Sandia, Los Alamos, Strata Production and New Mexico Petroleum Recovery Research Center è in corso di svolgimento un progetto i cui obiettivi sono iniettare CO₂ in un giacimento esaurito e verificare la possibilità di estrarre ancora petrolio, unitamente al confinamento

della CO₂.

I campi di stoccaggio di gas metano in Italia sono costituiti da depositi di gas semi-esauriti. Attualmente vi sono 10 campi attivi (8 Stogit, 2 Edison T&S), la cui capacità complessiva, definita come somma di "cushion gas" e "working gas" (rispettivamente, gas immobilizzato e gas movimentabile), corrisponde a circa 26 miliardi di m³.

Questi dati rendono l'idea di quanto grandi siano le possibilità di stoccaggio in Italia; appare chiaro tuttavia che i siti utilizzati per stoccare il gas al momento non possono essere utilizzati per stoccare la CO₂.

Il confinamento della CO₂ in acquiferi salini profondi e/o in campi geotermici non in produzione

L'idea di confinare la CO₂ in acquiferi salini profondi nasce dal fatto che la risorsa idrica in essi presente non può e non potrà essere utilizzata per scopi civili (agricoli, industriali o potabili), quindi il loro utilizzo come contenitore non determina la perdita di risorse. Gli acquiferi salini profondi infatti sono caratterizzati da salinità variabili da qualche decina di g/l (acqua di mare è circa 30 g/l) fino a 100 g/l.

Studi sullo stoccaggio di gas in acquiferi salini profondi risalgono al 1990 (DOE, 2001) e indicano che i maggiori problemi sono relazionati a:

- quantitativi di CO₂ da stoccare;
- capacità di stoccaggio;
- presenza di una copertura a bassa permeabilità;
- identificazione e caratterizzazione di acquiferi e coperture potenzialmente utilizzabili;
- incertezza dovuta alla non perfetta conoscenza del sottosuolo;
- corrosione e resistenza dei materiali utilizzati nei pozzi d'iniezione;
- ipotetiche vie di fuga del gas (faglie e

fratture).

Le proprietà chimico-fisiche dell'acqua e della CO₂, che condizionano le caratteristiche del flusso, sono dipendenti da densità, viscosità e solubilità, a loro volta dipendenti da pressione, temperatura e salinità. La solubilità in acqua della CO₂ decresce di un fattore di circa 6 tra 10 e 150 °C, così come decresce all'aumentare della salinità. I quantitativi di CO₂ che possono essere disciolti in acqua dipendono inoltre dalle dimensioni e dalla forma dell'interfaccia gas/acqua. Le reazioni chimiche di dissoluzione dei carbonati in presenza di CO₂ possono determinare l'aumento della porosità dell'acquifero e quindi un aumento dei quantitativi in esso stoccabili. D'altra parte, le reazioni con rocce costituite da alluminosilicati, possono anch'esse aumentare la capacità di stoccaggio per la fissazione della CO₂ in composti stabili ("mineral trapping"). La cinetica delle reazioni con i carbonati è molto rapida, mentre quella con i silicati è molto lenta e richiede decine o centinaia di anni. Le caratteristiche fisiche di un acquifero, da considerare per la sua idoneità allo stoccaggio, sono la porosità, e quindi la capacità dello strato di contenere CO₂, e la permeabilità, ovvero la capacità dell'acquifero di far fluire l'acqua e il gas al proprio interno (Hovorka et alii, 2000), nonché dal grado di confinamento con gli acquiferi circostanti. Il fattore di capacità di un acquifero (CF) è definito come la frazione del volume dei pori dell'acquifero che è accessibile alla CO₂ (Pruess et alii, 2001) sia in forma gassosa, sia come precipitato solido, sia in soluzione nell'acqua.

Un'elevata permeabilità determina condizioni favorevoli allo stoccaggio della CO₂ in quanto non richiede pressioni elevate d'iniezione, che in questo caso si aggirano intorno alle 100 atm (10 Mpa) a profondità di 1000 m, per un bacino "normal consolidato" e per temperature

di poco superiori alla temperatura critica della CO_2 ($31,06^\circ\text{C}$). La profondità di stoccaggio influenza notevolmente i processi d'iniezione in quanto comporta pressioni e temperature diverse. Il volume poroso netto necessario decresce rapidamente fino alla profondità di 800 m, per poi diminuire molto lentamente. Le pressioni che si possono raggiungere, prescindendo dalle problematiche connesse all'iniezione, sono funzionali alle caratteristiche della copertura impermeabile, che rappresenta la barriera di contenimento della CO_2 . Infatti pressioni troppo elevate (maggiori della "pore entry pressure") possono favorire la penetrazione della CO_2 nelle argille di copertura e la sua conseguente migrazione verso l'alto, nonché la rottura della barriera per faglia e quindi l'innescò di microsismicità e la fuga della CO_2 verso la superficie. Una prima esperienza di stoccaggio in acquiferi salini profondi è stata condotta nel Mar del Nord (Slaipner Field) da parte della Statoil (Herzog et alii, 2000); tale scelta è legata al fatto che nel Mar del Nord si producono idrocarburi che contengono CO_2 in percentuali del 5-10% e che viene rimossa con processi industriali. A Slaipner West, l'acquifero è circa a 800 m di profondità; ha uno spessore di 200 m ed è caratterizzato da una buona porosità e buona permeabilità. I costi dello stoccaggio in acquiferi salini profondi sono relativi alle valutazioni effettuate dal TNO (Netherlands Organization for Applied Scientific Research) di esercizi ipotetici ed indicano costi compresi fra 10-20 U.S. \$ per tonnellata stoccata, che se rapportati a 1 milione di t/anno, portano a costi complessivi di circa 15-20 milioni di euro.

Le possibilità di confinamento geologico in Italia

L'Italia, a differenza di altre regioni geologiche della terra, stabili da un punto di

vista sismotettonico, presenta caratteri peculiari per l'analisi di fattibilità del sequestro della CO_2 . Il nostro territorio pur essendo caratterizzato da un'elevata instabilità, presenta tuttavia anche caratteristiche conservative; se così non fosse non avremmo giacimenti di metano e di olio, anche se poco numerosi. Inoltre tutti gli studi applicativi più recenti sono stati condotti in regioni come il Canada, gli USA o il Mare del Nord, pertanto nel contesto mondiale l'Italia potrebbe rappresentare un'area tipo dove calibrare una metodologia idonea per le aree consimili.

Le formazioni geologiche italiane, potenzialmente idonee per il confinamento della CO_2 sono rappresentate dagli acquiferi salini profondi e/o dai campi geotermici, e dai campi di petrolio e gas esauriti, non destinati allo stoccaggio del metano per usi produttivi (Assomin, 2000).

Nel territorio nazionale sono disponibili numerose informazioni, seppure diversificate nelle differenti aree per qualità e quantità, circa la natura e la struttura geologica del sottosuolo, derivanti da studi di enti di ricerca e da perforazioni per lo sfruttamento di idrocarburi.

Si citano a titolo esemplificativo alcune pubblicazioni del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR, 1975; 1983) e dell'Istituto di Ricerca sulle Acque (CNR-IRSA, 1981), monografie sui pozzi profondi (AGIP, 1972; 1994), sintesi generali (AGIP, 1990) e studi regionali (Regione Emilia Romagna-ENI AGIP, 1995, Regione Lombardia-ENI Divisione AGIP, 2002).

Dopo un'analisi preliminare di tali dati possono essere selezionate le strutture geologiche potenzialmente in grado di immagazzinare la CO_2 .

Queste strutture geologiche, per quanto riguarda principalmente gli acquiferi salini profondi, ma anche alcuni giacimenti di petrolio e gas depletati, sono per lo più localizzate nelle sequenze terri-

gene mio-plio-quadernarie. Esse sono localizzate sia nel settore di avanfossa padano-adriatica, che nei bacini del margine tirrenico.

L'Avanfossa si sviluppa senza soluzione di continuità dall'area Padana s.s. fino alla Sicilia, con età progressivamente più recenti procedendo da Nord a Sud e con un legame strutturale diverso. A Nord infatti il bacino padano-adriatico rappresenta il bacino di retroarco dell'arco alpino, mentre nel centro sud è l'arco appenninico a determinare la presenza sia del margine tirrenico e dei suoi bacini di retropaese, sia l'area adriatica ed i suoi bacini di avanfossa.

L'estrema eterogeneità della geologia italiana nei diversi contesti strutturali, sinteticamente riassumibile per gli scopi del confinamento in:

- distribuzione areale delle formazioni;
- caratteristiche lito-stratigrafiche;
- spessori complessivi e la tipologia delle sequenze;

condizionano però fortemente la distribuzione di serbatoi naturali adatti allo stoccaggio di CO₂.

A queste condizioni giaciture si deve assommare la presenza di tettonica e di vulcanesimo attivi, che possono rappresentare le principali vie di fuga e di reimmissione in atmosfera della CO₂ stoccata. Diventa pertanto importante uno studio accurato di tutte le aree potenzialmente idonee allo stoccaggio della CO₂, così come è stato realizzato in USA (Hovorka et alii, 2000; 2001; 2002) per la definizione degli spazi esistenti sul territorio nazionale, sulla base delle caratteristiche d'idoneità di ciascun sito.

Da un punto di vista strutturale l'area italiana può essere suddivisa in due parti principali distinte: il settore dell'arco alpino e della adiacente pianura padana e quello dell'arco appenninico e dei mari adiacenti.

Queste due aree mostrano alcune evidenti affinità legate alla comune origine

da un margine della precedente struttura della tetide ma differiscono nei riguardi della cronologia e della evoluzione degli eventi geodinamici che ne contraddistinguono i caratteri delle strutture affioranti e sepolte.

La struttura dell'arco alpino appare infatti più matura: in superficie appaiono in continuità le unità profonde che hanno subito le complesse azioni di una evoluzione geodinamica ormai compiuta, dalle fasi di apertura della vecchia struttura crostale del continente Pangea a quelli di riavvicinamento, di collisione, di subduzione, di sollevamento e di riesumazione. L'espressione superficiale di tali processi ha come esito la genesi e l'evoluzione di un ampio bacino di retroarco, del quale la pianura padana e l'Adriatico settentrionale costituiscono l'eredità finale e per il quale sono stati effettuati studi complessi, principalmente dedicati alla ricerca di idrocarburi.

Il secondo settore principale dell'area italiana è costituito dalla giustapposizione e interazione di diverse macrounità strutturali: il margine tirrenico, la catena appenninica e l'area adriatica.

La catena appenninica (Funicello et alii, 1997), che costituisce l'ossatura principale della penisola italiana, è formata da una serie di scaglie accavallate verso l'Adriatico con una geometria complessa, analoga ma meno evoluta di quella alpina. Infatti anche tali unità derivano dalle deformazioni delle sequenze sedimentarie e metamorfiche originariamente appartenenti al bacino della Tetide e al margine africano e analoghi sono i processi di estensione progressivamente attivi dall'Oligocene in poi, migrando progressivamente verso Est sino a raggiungere 2 milioni di anni orsono il crinale della struttura appenninica ove sono ancora attivi, manifestandosi con terremoti crostali di magnitudo massima 7.0.

L'inquadramento degli elementi strutturali tettonicamente attivi dell'area, la loro

definizione geografica, geometrica, cinematica e dinamica costituiscano ormai da anni l'oggetto dello studio di dettaglio e sintesi in molte aree del mondo e, specie nei paesi a forte sviluppo industriale, è ormai ritenuto un elemento di conoscenza non rinunciabile soprattutto per iniziative che prevedano interventi dell'uomo nel sottosuolo a profondità variabile da centinaia a migliaia di metri. In tali condizioni è assolutamente necessaria la conoscenza delle caratteristiche litostratigrafiche e strutturali del sottosuolo alla scala regionale, individuare gli elementi strutturali con elementi tettonici o sismologici attivi e disporre di modelli di riferimento che possano fedelmente rappresentare nello spazio dalla scala regionale a quella locale le geometrie e le condizioni fisiche del sottosuolo nel quale si prevedano gli interventi.

L'Avanfossa Padano-Adriatica

Si estende in modo continuo dalla Pianura Padana al Golfo di Taranto, proseguendo nello Jonio fino alla Sicilia, contrassegnata da un allineamento di minimi gravimetrici. Nel settore padano si possono distinguere tre zone, una a Nord ed una Sud del Po ed una terza a NE della linea M.Berici-Venezia. La sedimentazione terrigena inizia nell'Oligocene partendo dal settore più orientale e proseguendo nei settori più occidentali fino al Pleistocene. Le fasi compressive alla fine del Miocene, attive anche durante il Pleistocene, provocarono il sovrascorrimento della catena appenninica sui sedimenti padani; contemporaneamente si produsse una forte subsidenza della Val Padana e la formazione di pieghe a direzione NW-SE; faglie inverse originarono il sovrascorrimento delle anticlinali sulle adiacenti sinclinali.

Durante tali fasi plicative alcune anticlinali emersero e furono sottoposte ad erosione mentre nelle contigue aree di sinclinale

perdurava la sedimentazione; ciò spiega perché nelle prime lo spessore dei sedimenti post-tortoniani è di appena 200-300 m, mentre nelle seconde raggiungono valori di 5000-6000 m.

Per tali motivi la sedimentazione plio-pleistocenica è disturbata sia al margine della catena appenninica che nella porzione centrale del bacino. Nell'ambito del Pleistocene inferiore si osserva, unitamente al perdurare della subsidenza, che la sedimentazione marina è particolarmente intensa a E-SE della linea della Val d'Enza; ne restano escluse alcune strutture localizzate al front esterno delle pieghe ferraresi ed adriatiche, dove l'Olocene ricopre direttamente il Miocene. Nel Pleistocene medio, per quanto in un regime di subsidenza, i forti apporti terrigeni provenienti dai settori di catena, colmarono il bacino provocando l'emersione di vaste zone.

Il settore marchigiano-abruzzese è già delineato nel Tortoniano, ma assume il suo assetto definitivo a partire dal Pliocene inferiore. Il tale fase costituisce un profondo bacino sedimentario impostato su una ridotta piattaforma, di limitata ampiezza a causa dell'attività tettonica che si esplica al margine della catena. La compressione medio pliocenica provoca la migrazione del bacino verso Est, il sollevamento di larghi tratti di essa e la formazione di pieghe, alcune delle quali compresse fino al sovrascorrimento. Una nuova fase trasgressiva collegata alla migrazione della distensione dal margine tirrenico verso Est si manifesta al passaggio Pliocene-Pleistocene.

Nel corso del Pleistocene inferiore si manifestano lenti fenomeni di sollevamento che produrranno nel Pleistocene medio l'emersione definitiva dell'avanfossa.

Il settore bradanico rappresenta una vasta zona depressionaria allungata in senso NW-SE, compresa fra la catena appenninica e l'avampaese apulo-garganico. La

sua formazione è di età pliocenica inferiore e legata al collasso dei margini di catena e di avampaese, che produsse una marcata subsidenza. Tale subsidenza cessò quando la compressione medio pliocenica determinò il sovrascorrimento dell'edificio appenninico sul settore di avanfossa ed il sollevamento di quest'ultima. Un'ulteriore traslazione della catena verso NE è stata accompagnata da una nuova marcata subsidenza. Complessivamente il ribassamento è valutato a 3500 m e le faglie lungo le quali si è esplicato il fenomeno hanno direzioni NW-SE e, subordinatamente NE-SW. Nei sedimenti della Fossa s'intercalano a cuneo coltri alloctone provenienti dalla catena in corso di sollevamento; fenomeni di sollevamento hanno coinvolto anche i settori di fossa a partire dal Pleistocene inferiore, con intensità decrescente verso i settori meridionali che, a partire dal Pleistocene medio, sono stati principalmente interessati dal sollevamento.

Il margine ligure-tirrenico

La situazione attuale, dovuta alla tettonica più recente, è strettamente legata all'evoluzione di precisi motivi paleogeografico-strutturali come il bacino ligure-balearico, identificatosi a partire dall'Oligo-Miocene o come quello tirrenico la cui apertura è più tarda e datata al Miocene superiore.

Le coste liguri

Lung le coste liguri la quasi totale assenza di depositi marini post-orogeni è legata al fatto che l'attuale margine continentale si delinea già nel Miocene inferiore e medio ad Ovest di Savona e nel Miocene superiore quello della Riviera di Ponente e della Provenza. Queste coste sono caratterizzate pertanto da un generale regime di subsidenza, da relazionare all'apertura del bacino ligure e di

quello tirrenico. La subsidenza determinò forti accumuli di sedimenti di età plio-quadernaria sulla piattaforma continentale, soprattutto nelle porzioni superiori della scarpata. Indagini sismiche hanno rilevato all'interno dei sedimenti pleistocenici discordanze che sono attribuite a fasi trasgressive; l'andamento di tali discordanze suggerisce che la subsidenza, continua per tutto il Pleistocene anche se in modo intermittente, abbia avuto punte di maggiore intensità durante il Tirreniano ed il Versiliano e che essa sia stata maggiore verso largo, mentre verso terra si sarebbero prodotti una serie di sollevamenti che sono responsabili della maggiore inclinazione delle superfici di discordanza più antiche.

Le coste tirreniche

Nelle coste tirreniche, a causa dell'apertura del margine tirrenico, fra la Toscana ed il Lazio meridionale si osservano gli effetti di una general tettonica distensiva realizzatasi a partire dal Tortoniano superiore. Le fasi tettoniche produssero una serie di collassi con acme nel Pliocene inferiore, che ribassando blocchi crostali lungo sistemi di faglie dirette a trend NW-SE, determinarono la formazione di un basso strutturale principale, che si allungava parallelamente all'attuale linea di costa si estendeva da Siena alla Piana Pontina per una lunghezza di 150 km. Questo bacino, sede di attiva sedimentazione marina era suddiviso in due settori dall'alto strutturale Monte Cetona-Rapolano: la Valle del Tevere ad oriente ed il basso strutturale Siena-Radicofani, limitato verso la costa tirrenica da una discontinua fasce di terreni sollevati. Una fase di sollevamento regionale ha provocato nel Pliocene medio-superiore la formazione di una dorsale compresa fra l'attuale linea di costa e la Valle del Tevere. Tale dorsale è costituita dai sedimenti del

Pliocene inferiore che raggiungono i 1.000 m s.l.m., mentre la sedimentazione marina continua nell'attuale Valle del Tevere. A tale sollevamento, cui fa riscontro il massimo del collassamento del bacino tirrenico, corrisponde probabilmente la risalita di magmi; in tale periodo infatti si sviluppa parte del magmatismo acido-anatettico della Toscana e del Lazio, che si esaurisce laddove la dorsale sollevata viene ad essere troncata lungo una direttrice NE-SW. Nell'area romana nel Pleistocene inferiore la sedimentazione è stata controllata da importanti fasi di subsidenza; con l'avvento del Pleistocene medio, che coincide con un forte sollevamento, la sedimentazione prevalentemente continentale è controllata da fattori eustatici. Nella regione campana sedimenti marini del Pleistocene sono conosciuti soltanto per mezzo di sondaggi nei bassi strutturali del Garigliano, del Volturno e del Sele, che risultano fra di loro separati dagli alti del Monte Massico e della penisola sorrentina. Tali elementi strutturali sono bordati da faglie, con direzione sia appenninica che antiappenninica, attive dal Pliocene medio. Le fasi tettoniche a carattere distensivo, che si manifestarono nel Bacino del Garigliano a partire dal Pliocene medio, produssero sollevamenti e subsidenze, che sono i responsabili delle discordanze esistenti fra quelli di una serie plio-pleistocenica continua. L'accumulo di 700 m di sedimenti dimostra inoltre un contemporaneo e complessivo notevole fenomeno di subsidenza. Nel basso strutturale del Volturno che risulta separato dal bacino flegreo-vesuviano da un alto appenninico sepolto, i sedimenti quaternari con intercalazioni vulcaniche raggiungono i 3000 m di potenza, il che indica un notevole fenomeno di subsidenza e un'elevata velocità di sedimentazione, forse in relazione all'esistenza di una soglia che impediva la dispersione dei sedimenti verso largo. Le faglie

marginali raggiungono i 4000 m di rigetto verticale, ribassando a gradinata il substrato calcareo, affiorante nei rilievi circostanti. Nel basso strutturale del Sele il basamento carbonatico è situato a 2000 m di profondità e i circa 1400 m del sondaggio Sele I hanno attraversato sedimenti quaternari affini con la serie affiorante ai margini della pianura Salerno-Eboli. Anche qui il rigetto delle faglie bordanti si aggira intorno ai 4000 m. Più a Sud il basso strutturale plio-pleistocenico del Lao, che raggiungeva la massima profondità nei pressi del corso del Fiume, era limitato a Nord dalla discontinuità della Valle del Noce. Più a Sud l'evoluzione della costa tirrenica è strettamente legata a quella dell'Arco Calabro-Peloritano.

I metodi di studio

La modellazione matematica

Per il confinamento geologico della CO₂ le problematiche da affrontare sono molteplici e complesse, anche se l'ausilio della modellistica matematica (DOE, 2002; Hovorka, 2000; Johnson, 2002; Pruess et alii, 2000) offre un valido strumento per lo studio dei fenomeni.

Allo scopo vengono usati principalmente tre tipi di modellizzazione:

- modellazione geo-meccanica;
- modellazione geochimica-fisica;
- modellazione fluidodinamica.

La modellazione geomeccanica

L'iniezione di ingenti quantitativi di CO₂ in un acquifero può determinare la modifica dello stato tensionale iniziale delle coperture impermeabili.

Infatti le pressioni esercitate dalla CO₂ durante e dopo la fase d'iniezione possono determinare sia la riattivazione di faglie non attive, eventualmente presenti all'interno del serbatoio, sia determi-

narne di nuove con la rottura dell'unità impermeabile sovrastante. In entrambi i casi si originerebbero sia vie di fuga preferenziale della CO₂, sia la generazione di microsismicità dovuta allo scorrimento dei terreni sul piano di faglia.

La modellazione geochimica-fluidodinamica

La modellazione geochimico-fluidodinamica, mediante studi geochimici di interazione acqua-roccia-gas e simulazione numerica, consente una valutazione degli effetti indotti dalle reazioni chimiche, che possono avvenire sia nel serbatoio che nelle formazioni confinanti, sulla migrazione nel lungo periodo della CO₂ iniettata.

Le reazioni chimiche che avvengono tra i fluidi e le rocce possono infatti:

- contribuire ad un maggiore e più stabile sequestro della CO₂ mediante la formazione di carbonati stabili ("mineral trapping") o in soluzione nelle acque ("solubility trapping"); nel campo di Sleipner in Norvegia si è visto che ad un anno dall'iniezione di CO₂, circa il 3% di essa si era solubilizzata nelle acque, mentre solo l'1%, reagendo con i plagioclasti, aveva dato origine a precipitazione di calcite (Johnson, 2002);
- modificare la porosità e quindi la permeabilità delle formazioni interessate e, conseguentemente, il flusso di massa ed energia all'interno del serbatoio;
- alterare la composizione mineralogica delle rocce di copertura, determinando una perdita delle caratteristiche geomeccaniche della roccia stessa e favorendo eventualmente la fuga della CO₂ verso la superficie.

La modellazione fluidodinamica

La modellazione fluidodinamica consente di prevedere la fattibilità dello

stoccaggio della CO₂ in un determinato serbatoio e di verificare la propagazione del pennacchio ("plume", "bubble") nel tempo, sia nel breve che nel medio-lungo termine, dopo la cessazione delle attività di iniezione, nonché la sua stabilità alla migrazione verticale. La valutazione delle quantità immagazzinabili di CO₂ in un acquifero salino richiede la simulazione della fluidodinamica del sistema acqua-CO₂ nelle condizioni di campo e l'individuazione degli scenari ottimali, in relazione alla modalità di iniezione e al numero, tipologia, inclinazione e distribuzione areale dei pozzi. A fronte della complessità dei fenomeni fisici che si possono verificare e le diverse scale spazio-temporali che li caratterizzano, le simulazioni possono garantire soluzioni dettagliate e accurate nell'arco del periodo di iniezione (50-100 anni) e successivamente con un dettaglio inferiore, per almeno 1000 anni. I codici ECLIPSE (Comerlati et alii, 2002 e 2003) e THOUGH2 (Battistelli et alii, 1997; Pruess et alii, 2001), ad esempio, consentono di fare previsioni attendibili sul trasporto e la dissoluzione della CO₂ nell'acqua di strato e sulla sua migrazione verticale attraverso le coperture semi-permeabili.

Il riconoscimento delle condizioni di deformazione recente e/o attiva

Lo studio dell'Anisotropia della Suscettività Magnetica in campo debole (AMS) rappresenta un metodo efficace e non distruttivo per la definizione dell'orientazione preferenziale dei minerali all'interno delle rocce (Mattei et alii, 1996; 1999; Sagnotti et alii, 1994; 1994 a). La sensibilità e la precisione dell'AMS nella definizione della deformazione ha trovato una notevole applicazione nell'analisi di sedimenti argillosi neogenici e quaternari, il cui stato di deformazio-

ne non era risolvibile con l'uso dei metodi classici della geologia strutturale e per la definizione del quale nel passato si erano manifestate le maggiori condizioni d'incertezza per l'accertamento delle condizioni di pericolosità geologica di siti assegnati. In particolare è stato ampiamente riconosciuto che l'orientazione dell'ellissoide dell'AMS è congruente e comparabile con quella dell'ellissoide dello "strain", particolarmente in rocce argillose anche poco o affatto indeformate alla scala dell'affioramento. È noto infatti che un materiale anisotropo, immerso in un campo magnetico esterno darà luogo ad un campo magnetico indotto attraverso la relazione $M=K_{ij}H$, dove K_{ij} rappresenta il tensore della suscettività magnetica del secondo ordine, e descritta geometricamente da un ellissoide i cui assi principali sono $k_{max}>k_{int}>k_{min}$. La forma dell'ellissoide dell'AMS ed il grado di anisotropia possono essere descritti da numerosi parametri tra i quali vengono in genere utilizzati la foliazione magnetica $F=K_{int}/K_{min}$; la lineazione magnetica $L=K_{max}/K_{int}$ ed il grado di anisotropia $P=K_{max}/K_{min}$. Numerosi studi hanno dimostrato l'esistenza di un percorso del "fabric" magnetico, al progredire della deformazione simile a quello registrato da indicatori classici di "strain", a testimoniare il possibile utilizzo dell'AMS come indicatore dello stato deformativo di una roccia. Tutti gli studi effettuati hanno dimostrato che esiste una relazione molto significativa tra l'evoluzione dell'ellissoide di AMS (particolarmente per quanto riguarda la lineazione e la foliazione magnetica) e quella di elementi strutturali regionali e locali. Proprio questa relazione, particolarmente valida per rocce sedimentarie poco deformate, consente notevoli applicazioni per la definizione della storia deformativa dei bacini sedimentari neogenici e quater-

nari dell'area italiana.

La pericolosità vulcanica e i suoi possibili effetti sulle aree prescelte per il confinamento geologico

Il territorio italiano è geologicamente giovane e per questo motivo è interessato su vaste aree da fenomenologie vulcaniche, a partire dal Miocene superiore e tuttora attive. La comprensione delle relazioni tra vulcanismo e tettonica è a tutt'oggi argomento di discussione scientifica (Civetta et al., 1987; Peccerillo e al., 1987; La Vecchia e Stoppa, 1989a,b; 1991; Coli et al., 1991; Serri et al., 1991) ed il problema della riclassificazione geologica del territorio nazionale sulla base della pericolosità vulcanica è legato alla comprensione del contesto geodinamico. Negli ultimi dieci anni è stata prodotta una grande mole di nuovi dati vulcanologici, geochimico-petrografici, strutturali ed idrogeologici su molte delle aree a vulcanismo attivo e/o recente, ma non è stata ancora prodotta una sintesi dei dati che possa permettere un aggiornamento dei modelli proposti verso la fine degli anni 80. Diventa pertanto necessario, affrontando problemi di "siting", definire la pericolosità vulcanica presente e proiettata su un'ampia finestra temporale del territorio italiano in modo da identificare le aree più sicure per il confinamento della CO_2 in serbatoi naturali.

I dati, relativi ad ogni area vulcanica identificata, da mettere fra loro in relazione sono riferiti a: localizzazione, assetto strutturale regionale, assetto strutturale locale, chimismo dei magmi, geochimica isotopica, petrografia dei prodotti, stili eruttivi, volumi e tassi eruttivi, età, dati stratigrafici di superficie, dati stratigrafici profondi, dati geofisici, idrotermalismo, idrogeologia, profondità e volumi delle camere magmatiche, manifestazioni a gas.

Nelle aree di vulcanismo attivo devono essere presi in considerazione gli studi

già disponibili relativi alla valutazione della pericolosità (Barberi et al., 1990a,b; Barberi et al., 1983;1995), mentre in quelle di vulcanismo recente come l'area interessata dal vulcanismo alcalino-potassico quaternario, si può contare sulla notevole massa di dati raccolti negli ultimi vent'anni di ricerca dedicata.

La revisione critica dei dati è finalizzata all'adozione di un modello evolutivo del vulcanismo italiano da utilizzarsi per un'analisi previsionale e per una formulazione di scenari di possibili eruzioni nei prossimi 100.000 anni, in base ai quali identificare le aree soggette alla minore probabilità di evoluzione del fenomeno vulcanico.

Per formulare scenari di evoluzione dei fenomeni vulcanici in queste aree o in aree strutturalmente simili risulta essenziale analizzare quelle aree di vulcanismo che più difficilmente sono riconducibili ad una precisa ambientazione geodinamica, o per caratteri strutturali o per caratteristiche chimico-petrografiche come il vulcanismo intrappenninico, il Vulture e l'Etna.

Se infatti vulcani come questi ad alto potenziale di pericolosità si sono sviluppati in contesti che esulano dagli attuali schemi proposti per l'evoluzione del vulcanismo italiano, è possibile che la stessa cosa si possa verificare in futuro in aree che potrebbero invece essere indicate come esenti da rischio vulcanico.

Meritano attenzione anche i vulcani attualmente considerati quiescenti o estinti come quelli costieri alcalino-potassici del Lazio. Alcuni di questi sono infatti adiacenti ad aree potenzialmente idonee allo stoccaggio della CO_2 , come la Pianura Pontina. Questi vulcani vengono convenzionalmente considerati estinti in quanto non si sono verificate eruzioni nel corso dell'Olocene e quindi il loro periodo di quiescenza ha superato i 10.000 anni. Tuttavia si ritiene necessaria una verifica con studi di terreno, campiona-

ture e datazioni radiometriche dell'età effettiva delle ultime eruzioni. Si ricorda inoltre che il periodo di quiescenza va comparato con i tempi di ritorno eruttivi caratteristici per ogni vulcano e quindi la definizione di quiescenza dei vulcani laziali va tarata sul record della loro attività (in base a dati stratigrafici e geocronologici).

Sempre in relazione ai vulcani laziali può essere importante valutare il fenomeno dell'interazione acqua/magma, in quanto le eruzioni idromagmatiche sono tra le fenomenologie meno prevedibili in base ai normali modelli di evoluzione di un sistema magmatologico. La loro ricorrenza dipende infatti dalle condizioni geologico-strutturali, idrogeologiche ed idrotermali dell'area vulcanica e queste interrelazioni non sono ancora totalmente conosciute.

Gli impatti possibili

L'impatto ambientale derivante da attività di confinamento geologico della CO_2 può essere negativo, per induzione di microsismicità durante le fasi d'iniezione o per perdite di CO_2 dai serbatoi, oppure positivo per l'eventuale compensazione della subsidenza antropica in atto nelle aree circostanti il serbatoio. Va valutato anche l'impatto che un'eventuale fuoriuscita di CO_2 può avere sull'ecosistema. L'analisi degli impatti è stimabile mediante simulazioni eseguite con modelli matematici.

La sismicità indotta

L'iniezione di gas all'interno di un acquifero produce, nella struttura geologica circostante, degli sforzi ("stress") che si sovrappongono allo stato di sforzo iniziale (o "naturale"). Le variazioni dello stato di sforzo e deformazione possono, in casi estremi, indurre una riattivazione di faglie pre-esistenti o l'attivazione di faglie ex-

novo, causando microsismi locali/superficiali ed un aumento della sismicità naturale dell'area (sismicità indotta).

I fattori più importanti che controllano quest'ultima sono: le caratteristiche litostratigrafiche e lo stato di fratturazione della struttura circostante l'acquifero, lo stato di sforzo naturale, e la variazione di "stress" indotta dall'iniezione.

Nell'analizzare il potenziale impatto ambientale, la grandezza di interesse è il moto del suolo, i cui effetti sono valutati in termini di appositi indici di scuotimento di carattere ingegneristico (ad esempio, valori di accelerazione di picco, durate efficaci, spettri di risposta). I metodi usati per la stima del moto del suolo si basano sulla risoluzione dell'equazione delle onde e forniscono per una data ipotesi di sorgente i sismogrammi sintetici in corrispondenza di punti (ricevitori) predefiniti.

I metodi più sofisticati sono in grado di risolvere in modo accurato la complessa fenomenologia di propagazione sismica dovuta a eterogeneità delle strutture geologiche presenti nelle zone di interesse, meccanismi di sorgente composti ed effetti di sito.

La compensazione della subsidenza antropica

L'analisi può essere sviluppata, per i principali scenari di iniezione, in ambiente GIS utilizzando il software GRASS ("Geographic Resources Analysis Support System") sviluppato da USA-CERL. È per questo necessaria la produzione di un accurato DEM (Digital Elevation Model) dell'area di interesse, sviluppato integrando i DEM attualmente esistenti, con punti quotati dedotti dalle carte tecniche regionali e da eventuali rilievi batimetrici a disposizione. Anche la variazione della linea di costa può essere ottenuta sovrapponendo gli spostamenti verticali della superficie ottenuti col codice

SUB3DIST (Teatini et alii, 2000) al DEM attuale.

Le variazioni del profilo di spiaggia possono essere utilizzate per la valutazione del trasporto solido litoraneo e del clima meteo-marino sotto costa. Il rischio di danneggiamento per strutture ed infrastrutture sulla superficie può essere valutato attraverso GRASS costruendo una mappa degli spostamenti differenziali a partire dai risultati ottenuti con SUB3DIST. Il confinamento di CO₂ in un acquifero salino produce la modifica dello stato tensionale iniziale, con la conseguente generazione di deformazioni negli orizzonti geologici interessati allo stoccaggio. La migrazione della deformazione profonda in superficie può determinarne una variazione di elevazione.

Gli effetti in termini di subsidenza o "rebound" possono risultare particolarmente significativi in merito alla stabilità costiera nel caso di un acquifero "off-shore" ed al danneggiamento di infrastrutture per spostamenti differenziali nel caso di un acquifero "onshore". Gli obiettivi specifici dello studio di impatto ambientale sono:

- quantificare attraverso un modello di simulazione l'entità del fenomeno di subsidenza/rebound indotto dall'iniezione di CO₂;
- valutare l'impatto dei movimenti verticali della superficie terrestre sulla stabilità della linea di costa, con particolare attenzione al suo possibile arretramento/avanzamento, e alla modifica sia del moto ondoso sia del trasporto solido litoraneo;
- valutare l'impatto dei movimenti verticali della superficie terrestre sull'integrità delle strutture ed infrastrutture, con particolare riferimento al possibile danneggiamento provocato da significativi spostamenti differenziali.

La simulazione della subsidenza/rebound dovuta alla variazione della pressione di strato a seguito dell'iniezione può esse-

re condotta con il modello strutturale tri-dimensionale non lineare agli elementi finiti SUB3DIST sviluppato dall'Università di Padova e già ampiamente testato nella ricostruzione e previsione della subsidenza antropica provocata dalla coltivazione di giacimenti a gas del bacino sedimentario dell'Alto Adriatico (Gambolati et alii, 1999, Bau' et alii, 1999; 2000). Il modello poro-elasto-plastico consente l'implementazione del comportamento isteretico del mezzo poroso in fase di carico e scarico e prevede di utilizzare come dati di input i risultati della modellizzazione fluidodinamica sia a breve che a lungo termine.

Impatto sugli ecosistemi

L'impatto di una eventuale fuoriuscita di CO₂ in ambiente terrestre può essere stimato in base alle osservazioni svolte su analoghi naturali e riportate in letteratura. Più difficile risulta senz'altro valutarlo nel caso di fenomeni di fuoriuscita che avvengano in mare.

L'effetto di una perdita di CO₂ in ambiente marino può avere sia un effetto diretto sulla variazione del Ph dell'acqua di fondo, sia sulla mobilitazione di inquinanti (spesso di origine antropica) depositati nei sedimenti. Risulta quindi importante valutare in differenti regimi idrodinamici il loro accumulo, trasporto e dispersione nelle masse d'acqua a diretto contatto sul fondo ed il loro potenziale impatto sulla catena alimentare.

Uno studio modellistico può essere svolto attraverso simulazioni numeriche tri-dimensionali che accoppino la parte idrodinamica con quella biologica per considerare i percorsi e il destino delle acque di fondo del bacino, in cui si ipotizza la fuoriuscita di CO₂. Gli scenari possibili e la loro valutazione vanno differenziati in rapporto alle stagioni: in quella invernale, la formazione di acqua di fondo risulta il processo dominante e la

ventilazione della colonna d'acqua è indotta da energetici forzanti atmosferici; in quella tardo-primaverile ed estiva, la stratificazione separa le acque di fondo dalla superficie segregando queste ultime (e le loro proprietà bio-geochimiche) dalla zona mescolata.

Questi scenari stagionali hanno notevole impatto sui tempi di rinnovo delle masse d'acqua e di conseguenza sulla permanenza media delle alterazioni delle concentrazioni delle sostanze chimiche indotte dalla fuoriuscita della CO₂. Attraverso l'analisi di questi scenari, il modello accoppiato consente di valutare la risposta degli organismi marini sia in termini di variazione dell'"habitat" e conseguente modifica della comunità biotica interessata, sia in termini di accumulo degli inquinanti nei tessuti organici e loro impatto, attraverso la catena alimentare, sulle specie ittiche di interesse commerciale.

Il monitoraggio

Il monitoraggio della migrazione della CO₂ dal sottosuolo è necessario in un confinamento su larga scala per i rischi ad esso connessi, che possono riguardare le popolazioni, così come un non gradito ritorno della CO₂ in atmosfera. Le metodologie esistenti per il monitoraggio sono molte e si basano tutte su confronti "ex ante" ed "ex post": pozzi spia, analisi delle pressioni, traccianti chimico-fisici, quindi metodi sismici, elettromagnetici e geomeccanici. Di seguito sono sinteticamente illustrati alcuni dei metodi più comunemente utilizzati.

Traccianti geochimici

È noto da tempo che molti geogas presenti nel sottosuolo raggiungono la superficie terrestre lungo vie di fuga preferenziali (Ciotoli et alii, 1997; Gurevich et alii, 1993; Torgersen e O'Donnell J., 1991)

rappresentate da faglie e fratture, fornendo anche informazioni sulle reazioni che avvengono nel sottosuolo fra CO₂, fluidi e rocce incassanti. Il movimento dei gas nel sottosuolo può essere indotto da due tipi di forze: gradienti di pressione e gradienti di concentrazione.

Nel primo caso si tratta di un processo macroscopico in cui la massa gassosa si muove attraverso le fratture del sottosuolo da zone di alta pressione verso zone di bassa pressione; tale trasporto di massa viene detto in letteratura avvezione.

Nel secondo caso si tratta di un processo microscopico (molecolare) in cui le particelle di gas, muovendosi in maniera disordinata, tendono ad uniformare la concentrazione nello spazio a loro disposizione; in questo caso si parla di diffusione del gas.

Da quanto detto si evince come la presenza di vie preferenziali (faglie e fratture) giochi un ruolo molto importante per l'avvezione, che permette velocità e distanze più elevate, mentre nel caso della diffusione è importante la natura dei granuli e degli spazi intergranulari.

Nel sottosuolo raramente i due processi agiscono indipendentemente, quindi il movimento di un gas è di solito dovuto ad una loro combinazione; infatti, entrambi i meccanismi possono avvenire secondo due modalità: in fase gassosa o come gas disciolto in acqua.

Il meccanismo di avvezione si realizza generalmente attraverso la migrazione di bolle o microbolle all'interno di microfratture o di canali caratterizzati da elevata permeabilità. La migrazione per avvezione lungo una colonna di gas subverticale in rocce sature segue la legge di Darcy mediante la quale è possibile stimare velocità del flusso pari a circa 60 cm al giorno. Molto più veloce è la migrazione di gas per avvezione attraverso un mezzo fratturato: questo può essere immaginato come il flusso all'interno di una "tubatura". Nel sottosuolo le faglie e

le grandi fratture costituiscono i canali di migrazione del gas, e la forza trainante è rappresentata dalla caduta di potenziale tra il punto d'origine e quello di arrivo del gas. I volumi di in gioco di gas libero di migrare dipendono dalla larghezza delle fratture, e comunque sono molto più elevati di quelli trattati nell'esempio precedente. Le caratteristiche fisiche del passaggio attraverso cui il gas si muove come, la larghezza delle fratture, la saturazione in acqua, la tortuosità e la scabrosità delle pareti della frattura, possono avere grandi effetti sulle quantità di gas in movimento.

Su tali basi è opinione comune considerare le faglie e le fratture come le vie migliori per la migrazione dei gas in forma avvertiva. Queste rotture nelle rocce si possono formare sia per processi di naturale litificazione che per l'attività tettonica; anche la subsidenza in aree petrolifere può generare fratture o essere causa di migrazione di gas lungo faglie preesistenti. In effetti, è più corretto affermare che le faglie costituiscono i più importanti canali di migrazione dei gas nel sottosuolo, in quanto esse tendono ad avere aperture più ampie e percorsi più lunghi rispetto alle fratture attraverso gli strati di roccia.

Molte faglie sono, tuttavia, spesso accompagnate dalla presenza di materiale fratturato (quindi più permeabile) e da un'ampia zona di frattura piuttosto che da una semplice rottura della struttura geologica interessata; inoltre, sono spesso associate ad aree caratterizzate da un'intensa attività tettonica, ed è proprio in queste aree che è possibile osservare l'esistenza dei fenomeni di migrazione di gas.

Per dare un'idea sulle quantità e sulle velocità dei gas prodotte dai due meccanismi di migrazione, sono stati riportati alcuni esempi tratti dalla letteratura internazionale. Le velocità raggiunte da un gas che migra in fase gassosa per diffusione

sono difficili da determinare a causa della presenza di molte variabili, le quantità sono comunque molto basse. Una stima effettuata sulla perdita per diffusione da un giacimento di idrocarburi posto alla profondità di circa 1700 m, ad una temperatura di 70 °C e ad una pressione di 170 atmosfere (17 Mpa) ha dato tempi di risalita del gas per diffusione, variabili per il metano, il propano e l'etano, tra 140 e 230 milioni di anni, con velocità di flusso molto basse da 2 a 0,06 cm³m²/anno. Per quanto riguarda le due modalità di avvezione, quali il flusso attraverso canali sub-verticali o verticali in rocce porose o micro-fratturate, ed il flusso attraverso canali sub-verticali o verticali a grande permeabilità, come discontinuità tettoniche e fratture, le velocità sono quantificabili rispettivamente in circa 60 cm/giorno, con quantità di gas che dipendono dalla permeabilità, e fino a 5 m/giorno con produzione di gas molto significativa dipendente dai gradienti di pressione. La prospezione dei gas nel suolo costituisce un valido mezzo di indagine per lo studio delle microfughe di gas in superficie: in questo caso si parla di anomalie di gas nel suolo. Attraverso lo studio della distribuzione superficiale di specie gassose quali, CO₂, He, Rn, CH₄, è possibile ottenere informazioni su alcuni processi geologici che avvengono in profondità (quelli che danno origine a produzione di gas) e, soprattutto, sulle strutture tettoniche responsabili della loro migrazione verso la superficie. In queste zone l'aria contenuta negli interstizi dei suoli può avere una composizione eccezionalmente differente da quella atmosferica, soprattutto nel caso di specie chimiche che possono avere una origine endogena come l'anidride carbonica e l'elio, l'idrogeno e il metano. Il risultato in superficie è la presenza di concentrazioni anomale di gas (o aloni di dispersione) la cui distribuzione riflette in genere la geometria delle vie di migra-

zione. Tale principio costituisce il presupposto che è alla base dell'applicazione della prospezione dei gas nel suolo nell'ambito della geologia esplorativa ed ambientale.

Recentemente lo studio dei meccanismi di migrazione del "geogas" in natura ha acquisito un ruolo importante nell'ambito delle problematiche relative al noto fenomeno dei "gas serra". In questo caso la prospezione dei gas nel suolo, attraverso lo studio degli analoghi naturali, mostra un buon potenziale per l'individuazione, il monitoraggio e la valutazione della sicurezza dei siti che potrebbero essere destinati allo smaltimento nel sottosuolo della CO₂ antropica.

Nell'ambito delle problematiche tecnologiche, e territoriali relative al confinamento geologico della CO₂ è fondamentale, inoltre, la conoscenza delle conseguenze originate da interventi antropici, quali la produzione di fratture durante la perforazione di pozzi, i fenomeni di subsidenza per l'estrazione di gas, olio o acqua dal sottosuolo, la pressurizzazione durante le operazioni di cementazione dei pozzi, la dissoluzione per acidificazione, la re-iniezione di fluidi nei pozzi e, non ultimo e particolarmente rilevante, il degrado dei pozzi abbandonati.

Il controllo delle emissioni naturali di CO₂ e delle fughe dai siti di smaltimento può, inoltre, essere effettuato mediante misure dinamiche quali le misure del flusso di esalazione, nonché attraverso l'installazione di sistemi di monitoraggio in continuo a basso costo dotati di opportuna sensoristica.

Tutte le informazioni di carattere geochimico devono essere completate e confrontate con i dati geologici e geofisici. Inoltre, al fine di ottenere mappe di distribuzione attendibili (mappe ad isolinee di concentrazione) è importante elaborare i dati a disposizione mediante l'applicazione di metodi geostatistici

(variografia e kriging) per lo studio del comportamento (continuità) spaziale delle variabili e del loro legame con i fenomeni naturali.

Il telerilevamento

Uno degli aspetti del possibile impatto ambientale derivante dall'immissione di CO₂ in acquiferi profondi e/o in giacimenti di idrocarburi depletati è costituito dalle eventuali variazioni altimetriche della superficie topografica.

Tali variazioni possono essere monitorate e valutate, a costi relativamente contenuti e su vaste aree, attraverso l'uso del telerilevamento satellitare e/o aereo.

In particolare, i sensori radar ad apertura sintetica (SAR) rappresentano piattaforme di osservazione particolarmente affidabili in quanto sono accoppiati ad altimetri di elevata precisione. I vantaggi del radar rispetto ai consueti sistemi ottici sono inoltre legati alla capacità di operare di notte e in presenza di nuvole.

Le immagini radar verranno analizzate attraverso la tecnica interferometrica, che consente la valutazione delle deformazioni della superficie terrestre con precisioni dell'ordine della lunghezza d'onda del segnale trasmesso, ossia dell'ordine del centimetro.

Con opportune tecniche, è possibile valutare moti di deformazione della superficie terrestre fino ad un'accuratezza millimetrica.

Le misure saranno di tipo differenziale, cioè ottenute considerando passaggi successivi del satellite su uno o più punti di riferimento esterni all'area di indagine, le cui coordinate verranno determinate mediante misure GPS di precisione.

Il telerilevamento radar consente innanzitutto di determinare le quote attuali delle aree di interesse ed operare un primo confronto con le quote "storiche"

onde verificare l'entità della mobilità verticale pregressa delle aree potenzialmente destinate al confinamento della CO₂.

Quindi, permette di monitorare i movimenti verticali nell'arco della durata del progetto, stabilendo una o più stazioni di controllo operanti su una serie predefinita di punti fiduciali, e di mettere a punto codici di calcolo e procedure di monitoraggio per la valutazione delle successive variazioni in fase di esercizio.

Queste attività consentono la creazione di un archivio di dati storici e di immagini satellitari ed alla restituzione dei dati storici in formato digitale (DEM) e cartaceo con relative monografie dei capisaldi/punti fiduciali.

Quindi, oltre alla realizzazione fisica di una rete di monitoraggio, si hanno restituzioni grafiche digitali, con modelli e viste bidimensionali delle variazioni altimetriche.

Un'altra tecnica di telerilevamento è invece applicabile al monitoraggio delle perdite gassose di CO₂.

Si tratta della misura dell'assorbimento della radiazione infrarossa, valutabile attraverso appositi sensori multispettrali che possono essere montati su piattaforma aerea o satellitare o su piattaforma terrestre, a sua volta fissa o mobile. Questo tipo di tecnica è comunemente usata, per esempio, per il controllo dei gas di scarico veicolari ed il monitoraggio dell'inquinamento urbano e/o industriale. In questi casi, viene utilizzata una sorgente laser e valutato l'assorbimento nell'infrarosso del segnale retrodiffuso che viene raccolto mediante un'apposita apparecchiatura.

In campo scientifico, essa è adoperata per l'analisi dell'attività vulcanica attraverso la composizione delle emissioni gassose e per il rilevamento di sorgenti e pozzi di CO₂ ai fini del bilancio dei gas serra che influenzano le variazioni climatiche a scala globale.

Monitoraggio geofisico

I metodi utilizzati per indagare corpi geologici contenenti CO₂ sono essenzialmente tre: gravimetrici, elettrici e sismici e si basano essenzialmente su confronti fra situazioni diverse nel tempo, ovvero a confronti fra le differenti fasi di eventuali iniezioni e la situazione precedente l'iniezione stessa.

I primi forniscono dati sui cambiamenti di densità, i secondi sui cambiamenti di resistività ed infine i terzi sui cambiamenti di rigidità elastica e di densità.

La CO₂ ha proprietà tali che la rendono resistiva, per cui il metodo geoelettrico consente di ottenere buone informazioni sul suo comportamento in profondità, specialmente qualora il contenitore geologico fosse rappresentato da un acquifero salino. I metodi gravimetrici si basano sul fatto che la CO₂, è meno densa e meno compressibile dell'acqua salata o del petrolio, per cui la metodologia risulta particolarmente efficace nell'indagine di acquiferi salini o nel caso di campi petroliferi. I metodi di sismica a riflessione multicanale sono quelli in grado di fornire, con la risoluzione più elevata, informazioni sulle modifiche delle caratteristiche petroacustiche della zona sottosuperficiale in cui è avvenuto lo stoccaggio.

Il potere risolutivo di tali metodi dipende dalla pianificazione delle indagini (numero di stazioni di ascolto, tipologia di energizzazione, ubicazione degli ascolti in superficie o in pozzo ecc.), dalle specifiche caratteristiche delle aree e può essere valutato a priori attraverso simulazioni numeriche che tengano conto delle caratteristiche degli acquiferi, delle strutture sottosuperficiali e del processo di stoccaggio.

Con tali simulazioni è possibile ottimizzare le indagini sismiche tridimensionali, che vanno comunque ripetute nel tempo per controllare l'evoluzione in sottosuperficie della CO₂ iniettata.

Lo studio degli analoghi naturali

Nell'ambito dell'elaborazione di modelli matematici è di fondamentale importanza lo studio degli analoghi naturali, laddove cioè esistono emissioni naturali di CO₂. In generale, le zone caratterizzate da questo tipo di fenomeni sono le aree vulcaniche e le aree sismiche dove la presenza di una circolazione di fluidi idrotermali ed emanazioni gassose puntuali connessi a serbatoi geotermici, nonché la presenza di faglie attive, controllano la migrazione verso la superficie di una miscela gassosa "geogas" (Rn, N₂, He, H₂S ecc.) di cui la CO₂ costituisce il componente più abbondante. Lo studio degli analoghi naturali oltre a fornire importanti informazioni sui processi di migrazione (velocità, interazione acqua-gas-roccia) della CO₂ nel sottosuolo e verso la superficie, consente lo studio della prevenzione e della protezione ambientale dal momento in cui tale specie gassosa interferisce con la sfera biologica. Infatti in alcuni casi le elevate concentrazioni di anidride carbonica nel suolo (variabili tra il 20% ed oltre il 90%) possono costituire un rischio ambientale elevato data l'estrema pericolosità del gas. In generale l'effetto superficiale più visibile consiste nella totale assenza di vegetazione: infatti, sebbene le piante producano O₂ dalla CO₂ durante la fotosintesi, le loro radici assorbono l'ossigeno direttamente dal suolo.

Pertanto la presenza nel suolo di elevate concentrazioni di anidride carbonica, ed altri gas come metano ed idrogeno solforato, priva la pianta del fabbisogno necessario di O₂ provocandone velocemente la morte. Quando la CO₂ dal suolo viene a contatto con l'aria atmosferica, si diluisce dissipandosi velocemente; tuttavia, poiché l'anidride carbonica è più pesante dell'aria, in particolari condizioni meteorologiche, ed in aree topograficamente depresse, può accumular-

si costituendo un potenziale rischio anche per gli esseri umani e per gli animali.

Respirare aria con una concentrazione di CO₂ maggiore del 30% provoca rapidamente la perdita di coscienza ed in casi estremi la morte. Pertanto la scarsa ventilazione nelle aree caratterizzate da una forte esalazione di CO₂ può rendere tali zone estremamente pericolose. Per meglio comprendere e definire il comportamento della CO₂ all'interno di una roccia serbatoio è opportuno studiare dei sistemi geologici dove questo gas è naturalmente presente. In questi analoghi naturali si possono studiare le interazioni tra gas-acqua-matrice rocciosa e i processi che determinano la precipitazione o la formazione di gas-serra. Esempi di questo tipo sono i sistemi vulcano-plutonici evoluti in sistemi idrotermali attivi.

La CO₂ è sempre presente in questi sistemi, dove esistono evidenze sia di "sink" di questo gas (vene idrotermali con carbonati, che hanno naturalmente sequestrato il gas) sia di sorgenti (la CO₂ è il principale gas geotermico).

La ricerca del consenso

L'adozione di nuovi sistemi di produzione e gestione dell'energia comporta l'emergere di nuove problematiche di gestione del territorio. Da un lato si rendono necessari adeguamenti e innovazioni nell'ambito amministrativo-legislativo, dall'altro nasce l'esigenza di far conoscere ed accettare le nuove tecnologie e i vantaggi che esse procurano, per assicurarsi la collaborazione dei cittadini e delle istituzioni territoriali.

Su tematiche di questa portata non è sufficiente porgere al pubblico delle informazioni o utilizzare tecniche di persuasione per convincere della validità delle nuove tecnologie: è viceversa necessario promuovere il consenso a partire da una comprensione profonda

delle aspettative, dei dubbi, delle difficoltà che l'introduzione delle nuove tecnologie potrebbe provocare nelle popolazioni interessate.

In questa prospettiva è possibile attuare una ricerca-intervento articolata su due piani interconnessi, in funzione del consenso e della comunicazione: gli obiettivi informativi e divulgativi sono sostanziati dallo studio delle dimensioni culturali.

Tali dimensioni filtrano l'assimilazione dei contenuti e determinano le reazioni e le disponibilità delle popolazioni, il modo in cui una nuova tematica viene recepita ed elaborata. Lo studio del substrato socioaffettivo, della matrice simbolica in base alla quale i nuovi contenuti potranno essere codificati come "amici" o "nemici", orienta poi l'elaborazione di efficaci strategie di comunicazione e d'immagine.

L'obiettivo di un'attività di questo tipo è quello di creare un circuito di comunicazione efficace ai fini della collaborazione tra scienziati, tecnici, enti e amministrazioni deputate a decidere, cittadini. A tale scopo viene dapprima studiata la rappresentazione psico-sociale delle tematiche in oggetto, a livello contenutistico e strutturale, nelle componenti cognitive ed emozionali, sia nell'ambito della comunità scientifica e in particolar modo tra i tecnici e gli enti attivamente impegnati nel progetto, sia in campioni stratificati e rappresentativi della popolazione nazionale. Su tale base viene elaborata l'immagine attesa, da implementarsi con attività formative e informative a vari livelli (seminari, incontri scientifici, workshop, supporti multimediali ecc.). Sia la fase conoscitiva e di ricerca, sia la fase più propriamente attiva e di intervento vengono attuate mediante l'attivazione di contesti interattivi che permettono il processo di decodifica e di trasformazione delle conoscenze dal contesto tecnico-scientifico al contesto sociale più ampio.

Bibliografia

- AGIP (1972), *Acque dolci sotterranee*, Roma.
- AGIP (1990), *Geologia d'Italia*, Documenti CED/3, San Donato Milanese.
- AGIP (1994), *Acque dolci sotterranee. Inventario dei dati raccolti dall'AGIP*, Roma.
- ASSOMIN (2000), *Seminario sullo stoccaggio del gas in Europa*, Notiziario, mensile dell'Associazione Mineraria Italiana 5, maggio 2000.
- BARBERI F., ROSI M., SANTACROCE R., SHERIDAN M.F. (1983), *Volcanic hazard zonation: Mt. Vesuvius. In Eruptive disasters forecasting*, H.Tazieff ed., Volc. Geoth. Res. 149-164.
- BARBERI F., MACEDONIO G., PARESCHI M.T., SANTACROCE R. (1990), *Iniziativa erisultati del GNV per la mitigazione del rischio vulcanico*, Mem Soc. Geol. It, 45, 155-158.
- BARBERI F., MAVCEDONIO G., PARESCHI M.T., SANTACROCE R. (1990), *Mapping the tephra fall out risk: an example from Vesuvius* (Italy), Nature, 344, 142-144.
- BARBERI F., MACEDONIO G., PARESCHI M.T. SANTACROCE R. (1995), *Scenario dell'evento erutivo massimo atteso al Vesuvio* (aggiornamento al 20.1.1995) CNR, Gruppo Nazionale per la Vulcanologia Confidentiala report 19 pp.
- BATTISTELLI A., CALORE C. & PRUESS K. (1997), *The simulator TOUGH2/EWASG for modeling geothermal reservoirs with brines and noncondensable gas*. *Geothermics*, 26 (4), 437-464.
- BAU' D., GAMBOLATI G. & TEATINI P. (1999), *Residual land subsidence over depleted gas fields in the Northern Adriatic basin*, *Environ. Eng. & Geosciences*, V(4), 389-405.
- BAU' D., GAMBOLATI G. & TEATINI P. (2000), *Residual land settlement near abandoned gas fields raises concern over Northern Adriatic coastland*, *EOS*, 81(22), 245-249, 2000; *Earth in Space*, 13(1), 5-13, September 2000.
- BYRER C.W. & GUTHRIE H.D. (1998), *Coal Deposits: Potential resources for sequestering Carbon Dioxide Emissions from Power Plants*, Proceedings forthcoming of IV International Conferences on Greenhouses Gas Control Technologies Interlaken, Switzerland, August 30-September 2, 1998.
- CIOTOLI G., LOMBARDI S., SERAFINI S. & ZARLENGA F. (1997), *The refinement of geomorphological and geochemical statistical techniques in the study of clay-basin tectonics: Val d'Era Basin (Central Italy)*, *Il Quaternario*, 10 (2), 231-246.
- CNR (1975), *Structural model of Italy*, Quaderni della Ricerca Scientifica, N. 90, Roma.
- CNR (1983), *Neotectonic Map of Italy*, Quaderni della Ricerca scientifica, Vol. 4, Roma.
- CNR-IRSA (1981), *Indagine sulle falde acquifere profonde della Pianura Padana*, Quaderni IRSA, Vol. terzo, parte seconda, Roma.
- COLI M., PECCERILLO A., PRINCIPI G. (1991), *Evoluzione geodinamica recente dell'Appennino settentrionale e attività magmatica tosco-laziale in Studi preliminari all'acquisizione dei dati del profilo CROP 03 Punta Ala-Gabice*, Studi Geologici camerti, volume speciale 1991/1.
- COMERLATI A., M. FERRONATO, G. GAMBOLATI, M. PUTTI and P. TEATINI (2002), *Some preliminary FE results of CO₂ sequestration in a sedimentary basin*, EAGE 64th Conference&Exhibition, Florence (Italy), May 27-30.
- Comerlati A., M. Ferronato, G. Gambolati, M. Putti and P. Teatini (2003), *Upward migration of anthropogenic CO₂ and vertical finite element mesh resolution in a layered sedimentary basin*, Offshore Mediterranean Conference (OMC), Ravenna, March 26-28.
- CO₂ Capture and Storage Working Group (2001), *CO₂ capture and storage in Geologic Formations*, A white paper prepared for the National Climate Change Technology Initiative. Revised Draft. January 8, 2002.
- DOE (2002), *Sequestration of Carbon Dioxide in Geological Formations. In: Carbon Sequestration Research and Development*, http://www.ornl.gov/carbon_sequestration/carbon_seq.htm, 24 pag.
- FANCHI J. R. (2000) - Overview of Carbon Sequestration research in North America. Problematiche tecnologiche, scientifiche e territoriali. Roma, 3 luglio 2000.
- FUNICIELLO R., MATTEI M., SPERANZA F. & FACCENNA C. (1997), *La geodinamica del sistema Tirreno-Appennino*, *Le Scienze*, 343, 44-53.
- GALE J. (2002), *Overview of sources, potential, transport and geographical distribution of storage possibilities*, IPCC Workshop on Carbon Capture and storage. Regina, Canada, 18-21 november 2002, 13-24.
- GAMBOLATI G., P. TEATINI, L. TOMASI and M. GONELLA (1999), *Coastline regression of the Romagna Region, Italy*, *Water Resour. Res.*, 35, 163-184.
- GUREVICH A.E., ENDRES B.L., ROBERTSON J.O. & CHILINGARIAN G.V. (1993), *Gas migration from oil and gas fields and associated hazards*, *J. Petrol. Sci. and Engineering*, 9, 223-238.
- HERZOG H., ELIASSON B. e KAARSTAD O. (2000), *Catturare i gas serra*, *Le Scienze*, 380 (aprile 2000), 46-55.
- HITCHON B. (1996), *Aquifer Disposal of Carbon Dioxide, Hydrodynamic and Mineral Trapping-Proof of Concept*, Geoscience Publishing Ltd. Sherwood Park, Alberta, Canada.
- HOVORKA S.D., DOUGHTY C., KNOX P.R., GREEN C.T., PRUESS K. & BENSON S.M. (2000), *Evaluation of Brine-Bearing Sands of the Frio Formation, Upper Texas Gulf Coast for Geological Sequestration of CO₂*,

<http://www.beg.utexas.edu/enviro/qly/fieldexperiment.htm>, 13 pag.

HOVORKA S.D., KNOX P.R., HOLTZ M.H., FOUAD K., SAKURAI S. & YEH J.S. (2001), *Field experiment for CO₂ Sequestration*. <http://www.beg.utexas.edu/enviro/qly/co2seq./fieldexperiment.htm>.

HOVORKA S.D., ROMERO M.L., WARNE A.G., AMBROSE W., TREMBLAY T.A., TREVINO R.H. & SA D. (2002), *Sequestration of Greenhouse Gases in Brine Formations*, <http://www.beg.utexas.edu/enviro/qly/co2seq./dispsaln>, 203 pag.

IEA (2000), *CO₂ capture and storage. Technology status Report. Prepared for the IEA Fossil Fuel Working Party*, June 2000.

JOHNSON J.W. (2002), *A solution for Carbon Dioxide overload*, <http://www.llnl.gov/str/Johnson.html>, 6 pag..

Kaarstad O. (2002), *Geological storage, including cost and risk in saline aquifers. IPCC Workshop on Carbon Capture and storage*, Regina, Canada, 18-21 novembre 2002, 44-51.

LA VECCHIA G. e STOPPA F. (1989), *Il rifting tirrenico: delaminazione della litosfera continentale e magmatogenesi*, Boll. Soc. Geol. It. 108, 219-235.

LA VECCHIA G. e STOPPA F. (1989), *Tettonica e magmatismo nell'Appennino Settentrionale lungo la geotraversa isola del Giglio-Monti Sibillini*, Boll. Soc. Geol. It. 108, 237-254.

LA VECCHIA G. e STOPPA F. (1991), *Distribuzione regionale dei litotipi ignei, traccianti geochimici ed altri aspetti caratteristici dell'area tirrenica e peri-tirrenica*, in *Studi preliminari all'acquisizione dei dati del profilo CROP 03 Punta Ala-Gabice*, Studi Geologici camerti, volume speciale 1991/1.

MATTEI M., SAGNOTTI L., FACCENNA C. & FUNICIELLO R. (1996), *Magnetic fabric of weakly deformed clay-rich sediments in the Italia peninsula: Relationship with compressional and extensional tectonics*, Tectonophysics, 271, 107-122.

MATTEI M., SPERANZA F., ARGENTIERI A., ROSSETTI F., SAGNOTTI L. & FUNICIELLO R. (1999), *Extensional tectonics in the Amantea basin (Calabria, Italy)*, Tectonophysics, 307, 33-49.

PRUESS K., TIANFU XU, GARCIA J. (2000), *Numerical Modeling of Aquifer Disposal of CO₂*, Soc. of Petrol. Engineers. SPE 66537, 42370.

Regione Emilia Romagna - ENI AGIP (1995), *Riserve idriche sotterranee della regione Emilia Romagna*, S.E.L.C.A., Firenze.

Regione Lombardia- ENI Divisione AGIP (2002), *Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia*, S.E.L.C.A., Firenze.

SAGNOTTI L., FACCENNA C., FUNICIELLO R. & MATTEI M. (1994), *Magnetic fabric and structural setting of Plio-Pleistocene clay units in an extensional regime: the Tyrrhenian margin of Central Italy*, J.Struct.Geol., 16, 1243-1257.

SAGNOTTI L., SPERANZA F., WINKLER A., MATTEI M. & FUNICIELLO R. (1994a), *Magnetic fabric of clay sediments from the external northern Apennines (Italy)*, Earth Planet.Intern., 105, 73-93.

SERRI G., INNOCENTI F., MANETTI P., TONARINI S., FERRARA G. (1991), *Il magmatismo neogenico-Quaternario dell'area tosco-laziale-umbra*, in *Studi preliminari all'acquisizione dati del profilo CROP03 Punta-Ala-Gabice*. Studi Geologic Camerti, volume speciale 1991/1.

STEVENS, S.H. and GALE J. (2000), *Geologic CO₂ Sequestration*. *Oil and Gas Journal* (15 May).

TEATINI P., BAU' D. & GAMBOLATI G. (2000), *Water-gas dynamics and coastal land subsidence over Chioggia Mare field, Northern Adriatic sea*, Hydrogeology J., 8(5), 462-479.

TORGENSEN T., O'DONNELL J., WEIR G.J., WHITE S.P. & KISSLING W.M. (1996), *Reservoir storage and containment of greenhouses gasses. Transport in porous media*, 23, 37-60.

WHITE C.M., WARZINSKI R.P., HOFFMAN J.S., SCHROEDER K.T. & FAUTH D. (2001), *Carbon Sequestration. Research in the Office of Science and Technology at the National Energy Technology Laboratory*, 13 pag.

Il contributo del GIS nello studio di analisi ambientale

EMANUELA CAIAFFA

ENEA

UTS Protezione e Sviluppo
dell'Ambiente e del Territorio,
Tecnologie Ambientali

studi & ricerche

L'interesse suscitato dalla scienza dell'Informazione Geografica e il successo ottenuto dalle tecnologie GIS hanno fortemente incentivato lo sviluppo di nuovi campi di applicazione seguito dalla messa a punto di nuove tecnologie, sia hardware che software atte a soddisfare le più svariate richieste provenienti sia dal mondo della ricerca scientifica che da quello delle politiche ambientali

The contribution of Geographic Information Science in environmental analysis

Abstract

Introducing geo-knowledge in traditional e-government can improve land-use governance. It can help citizens to perceive the state of environment and accept constraints on land use and planning strategies more readily. It naturally implies the availability and usability of good Geographic Information (GI). The main aim of this paper is to improve the introduction of GI-based-governance concept: geo-governance, a combination of land use government and geo-knowledge.

Growing interest in Geographic Information and the success of GIS technologies have stimulated the development of new application fields, technologies, hardware and software to meet a very wide range of requests from both the scientific research community and the environmental policymaking community.

The present paper describes the final result of application, e-governance applicable, conducted using GIS: by analysing thematic maps, it is possible to find solutions to critical environmental, social, economic, anthropogenic and other situations; in other words, all kinds of situations related to the territorial management, or governance

Dresso il Laboratorio GIS della Sezione Protezione e Sviluppo dell'Ambiente e del Territorio della Casaccia è stato sviluppato il GIS NewTuscia, realizzato come contributo allo studio preliminare di analisi ambientale, nell'ambito del progetto Life NewTuscia che ha visto come beneficiario il Comitato Promotore (1) del progetto stesso ed ha avuto la partecipazione finanziaria della Commissione Europea.

Scopo di questo articolo è proprio quello di presentare il contributo delle tecniche e metodologie offerte dai Geographic Information Systems (GIS) come strumento di aiuto ad una buona governance: le applicazioni qui descritte, con il loro alto potenziale di utilizzo, sono un esempio del perché, negli ultimi tempi, sempre più spesso vengono utilizzate soluzioni GIS per lo studio del territorio. Infatti, sia grazie ad una più vasta e capillare informazione sull'argomento che ad una maggiore consapevolezza dell'importanza della qualità dell'ambiente, si è capito il valore di integrare l'analisi ambientale nella gestione tradizionale del territorio.

Un sistema di analisi ambientale coinvolge per sua natura una serie di studi e ricerche che prevedono la raccolta e l'elaborazione di dati

di natura assai diversa tra loro, lo studio dei quali, è competenza di diverse discipline.

Il successo di un sistema di analisi ambientale è dunque legato alla migliore integrazione, elaborazione ed interpretazione di tali moli di dati ed informazioni. Proprio a causa del carattere fortemente interdisciplinare di uno studio che coinvolga l'analisi di tutti i parametri ambientali è ormai divenuta chiara, a molte istituzioni ed amministrazioni, la necessità di orientarsi verso l'uso di sistemi integrati ed informatizzati.

La tecnologia GIS è la risposta al problema della integrazione ed informatizzazione di dati di provenienza e natura assai diversa fra loro: dati vettoriali (ad esempio strati tematici come fiumi o confini comunali), raster (come immagini da satellite, copertura del Land Use del Corine Land Cover), ortofoto, foto di porzioni di territorio, dati forniti sotto forma di tabelle excel, files di testo ecc.

Inoltre l'uso del GIS si inserisce sia nella fase di raccolta, integrazione, elaborazione, dei dati collezionati sia nella restituzione, in forma grafica e simbolica su carte tematiche territoriali, dei risultati ottenuti dalla interpretazione dei dati e delle informazioni disponibili.

Negli ultimi anni si è assistito ad un sempre più vasto uso dell'Informazione Geografica nell'ambito della gestione del territorio. Molti progetti europei hanno "scoperto" la tematica dell'e-government, il governare in rete, e diverse sono le call lanciate per lo studio e per lo sviluppo di questi temi. All'interno dell'ENEA, allo scopo di rimanere al passo con queste nuove tendenze, il Laboratorio GIS della Sezione PROT/PREV, ha partecipato alla costruzione di un Sistema Informativo Geografico (GIS) come contributo nello studio di analisi ambientale. Il lavoro descritto nel presente articolo si inserisce in una serie di attività aventi come scopo, tra gli altri, quello di privilegiare sempre di più l'uso del GIS nel nuovo campo di applicazione della governance. In questo contesto governance è intesa come lo studio ambientale di un territorio e successiva ricerca di soluzioni ai problemi individuati legati agli aspetti socio-economici ed ambientali tipici di qualsiasi gestione del territorio. Allo scopo di concretizzare queste ultime tendenze le metodologie GIS, già peraltro note, sono state oggetto, in questi ultimi anni, di continui incentivi indirizzati allo scopo di essere in grado di soddisfare le richieste provenienti dal mondo della gestione del territorio. Uno strumento come il GIS messo a disposizione a tutti i livelli delle Pubbliche Amministrazioni costituisce già un buon passo verso la realizzazione della tanto discussa e pubblicizzata e-governance.

I risultati delle elaborazioni di tali dati ottenute dal GIS e tematizzate su una mappa, comunicano infatti, al lettore della mappa stessa, alcune informazioni intrinseche rispetto alla rappresentazione stessa che rendono immediato, intuitivo e direttamente visibile il caso ambientale in studio, più difficilmente individuabile con altri mezzi.

Contributo del GIS nel campo dell'analisi ambientale territoriale

Nel caso riportato in questo articolo, il GIS è stato utilizzato per la messa a punto dell'analisi ambientale di un territorio, finalizzata alla realizzazione di un programma di miglioramento ambientale, ha un carattere fortemente innovativo. Lo studio del territorio, prevede per sua natura, la raccolta, spesso la omogeneizzazione, e la successiva elaborazione di dati appartenenti a diverse discipline: proprio per questo, all'interno del progetto, è stato costituito un gruppo di esperti (2), che si sono fatti carico, ognuno nel campo afferente la propria disciplina, della raccolta e del-

la gestione dei dati di loro competenza da inserire nel GIS.

I dati raccolti dai componenti del gruppo di lavoro, allo scopo di mettere in relazione alcuni aspetti indicati dalle diverse discipline, sono stati analizzati in ambiente GIS e hanno dato luogo alla definizione di specifici tematismi dai quali è stato possibile trarre alcune informazioni, assolutamente preliminari, per quanto riguarda alcune caratteristiche del territorio oggetto di indagine.

Introduzione dei dati nel GIS

Uno fra i primi problemi superati per la realizzazione ex novo del GIS NewTuscia è stato quello di "legare" (geo-referenziare) al territorio di interesse i dati provenienti dai Comuni e dalle Province interessati e dalle altre fonti consultate. Per fare questo è stato necessario un impegnativo lavoro di omogeneizzazione dei dati inerenti i tematismi come quello delle acque, degli usi civici, dei siti di interesse archeologico culturale (figura 1), ecc. per i quali, in alcuni casi, è stato

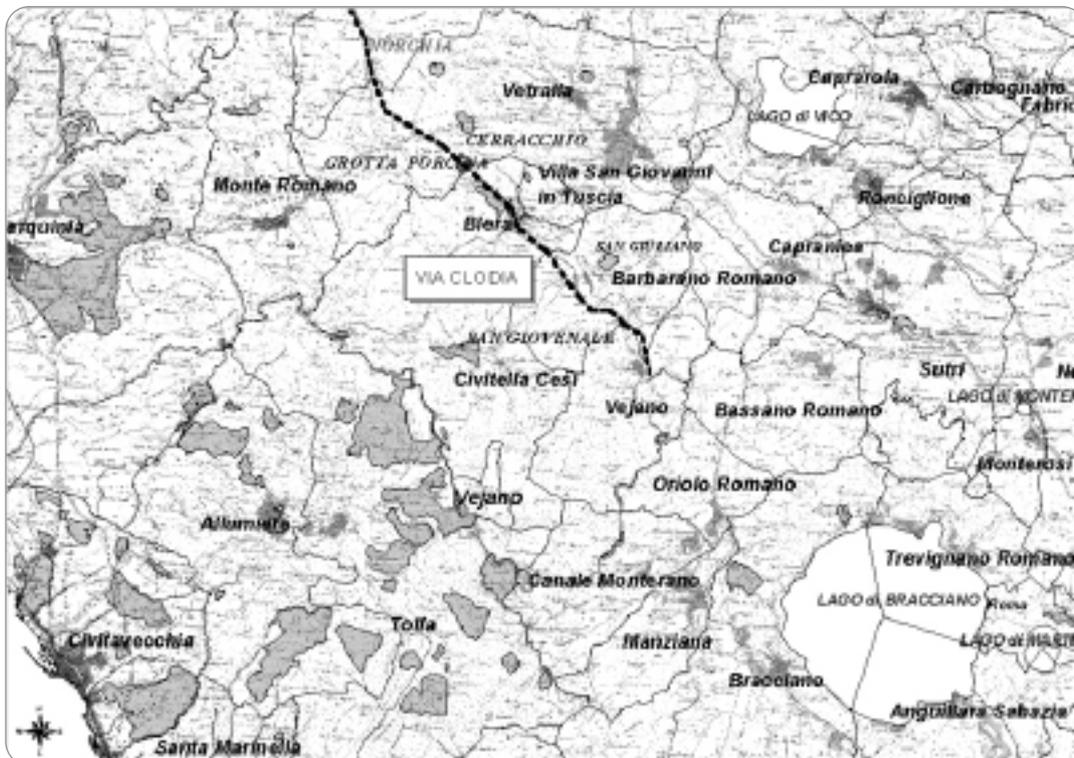


Figura 1
Antico tracciato della
Via Clodia

te con l'ausilio del GIS bensì quello di evidenziare come all'interno dell'Ente vi siano le risorse e le competenze per la realizzazione di un tale prodotto.

Le figure qui di seguito mostrate riescono a dare una efficace dimostrazione dei risultati ottenuti.

Dovendo inevitabilmente scegliere quali carte tematiche mostrare, delle 36 che compongono il GIS nella sua completezza, si è optato per quelle viste che trattano temi di maggiore interesse per la gran parte degli utenti finali.

La figura 2 mostra, messa in evidenza, l'area

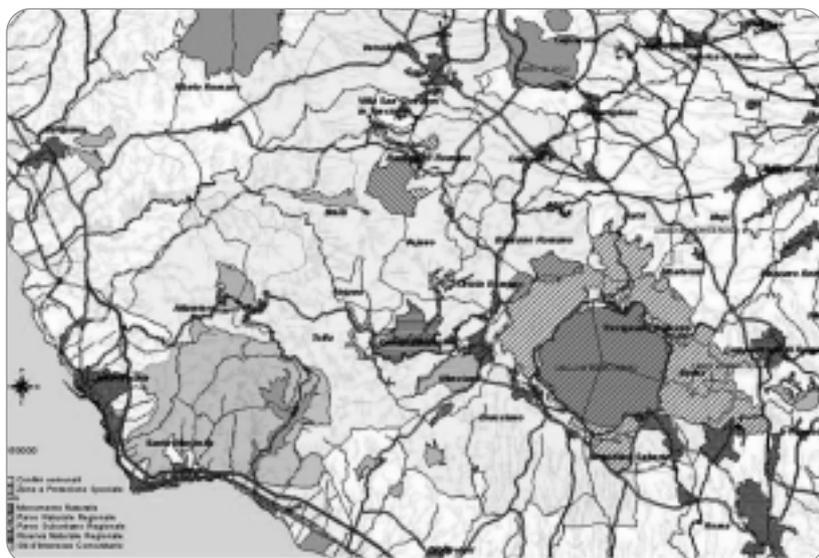


Figura 3
Carta tematica dei
Parchi e dei Siti di
Interesse Comunitario

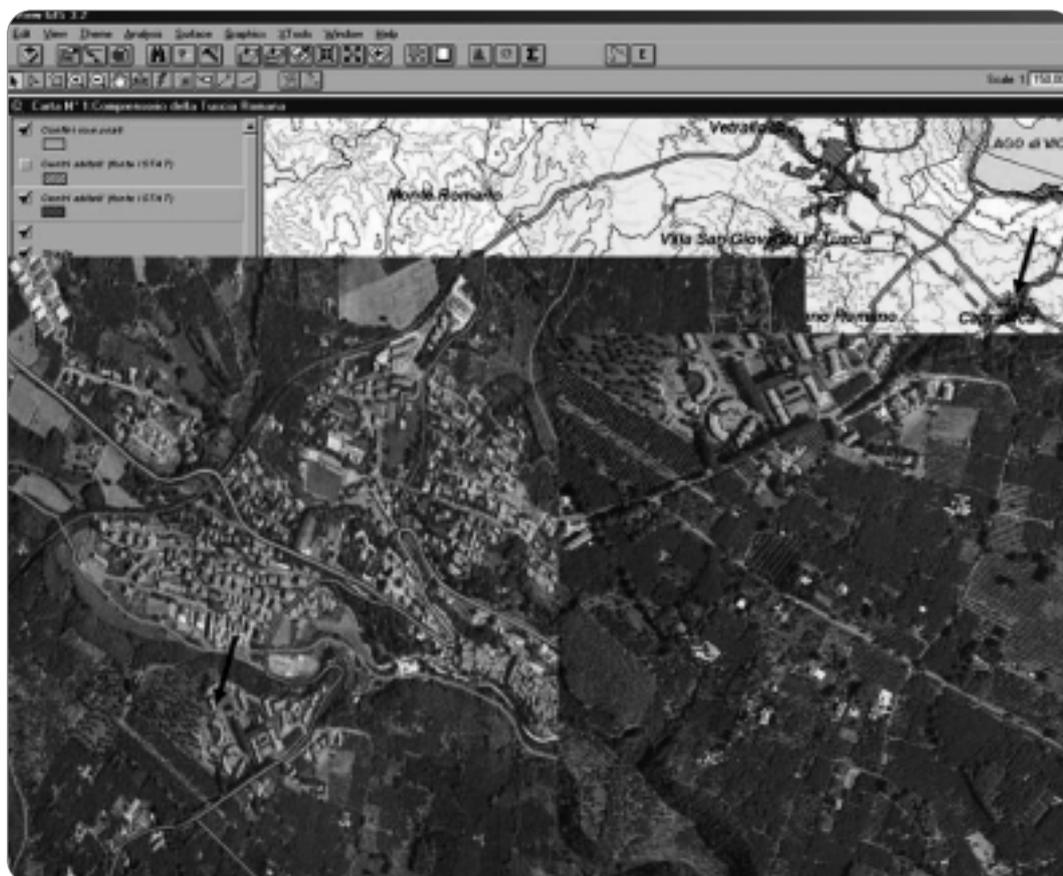


Figura 4
Contributo delle orto
immagini

d'interesse del GIS per la quale sono stati raccolti i dati poi intergrati nel GIS.

Nella figura 3 è interessante notare quante e quali sono le aree del comprensorio interessate da Parchi, Siti di Interesse Comunitario (SIC), Zone a Protezione Speciale (ZPS), e

si d'acqua della zona. Da qui scegliendo una zona di interesse, ad esempio quella a sviluppo urbano, è possibile avere una immagine più dettagliata per ulteriori informazioni.

Nella figura 5 viene mostrato il contributo dato

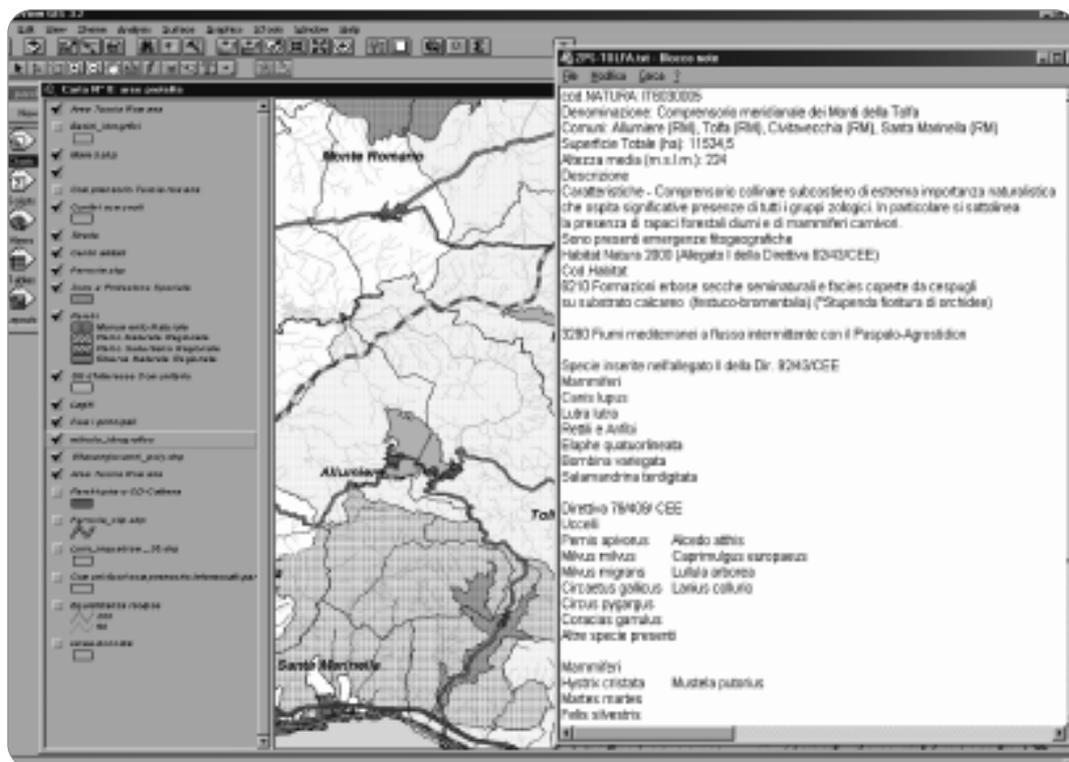


Figura 5
Contributo dei files di testo

così via. Poiché alcune aree o porzioni di area sono interessate da più di una delle definizioni dette, per ottenere il risultato visivo della differente destinazione sulla mappa si è adoperata la tecnica della realizzazione di strati tematici trasparenti.

Visualizzazione dei risultati

Nella figura 4 viene mostrato il contributo fornito dall'uso di orto immagini, all'interno di un GIS, orto immagini che vengono geograficamente agganciate ad un particolare luogo di interesse. Per esempio cliccando sul Comune di Capranica, come mostrato nella figura 3, si apre una orto immagine che ci mostra l'estensione del centro abitato vecchio e nuovo con gli strati vettoriali delle maggiori vie di comunicazione e i maggiori cor-

dall'uso di files di testo, all'interno di un GIS. I files in oggetto vengono geograficamente agganciati, tramite le tabelle degli attributi, ad un particolare luogo di interesse. In questo esempio, cliccando sul Sito di Interesse Comunitario della zona di Tofia, (area indicata dalla freccia), si ottiene l'apertura di una finestra contenente una serie di informazioni sulla classificazione dei terreni come Parchi, Zone a Protezione Speciale, presenza di specie faunistiche, presenza di specie vegetali ecc. Tra i dati utili alla messa a punto di un programma di analisi ambientale di un territorio, i dati sull'uso del suolo, forniti dal Corine Land Cover, rivestono senza dubbio un importantissimo ruolo.

I dati sull'uso del suolo saranno ancora più utili alla caratterizzazione del territorio su cui insistono, se messi visivamente in relazione

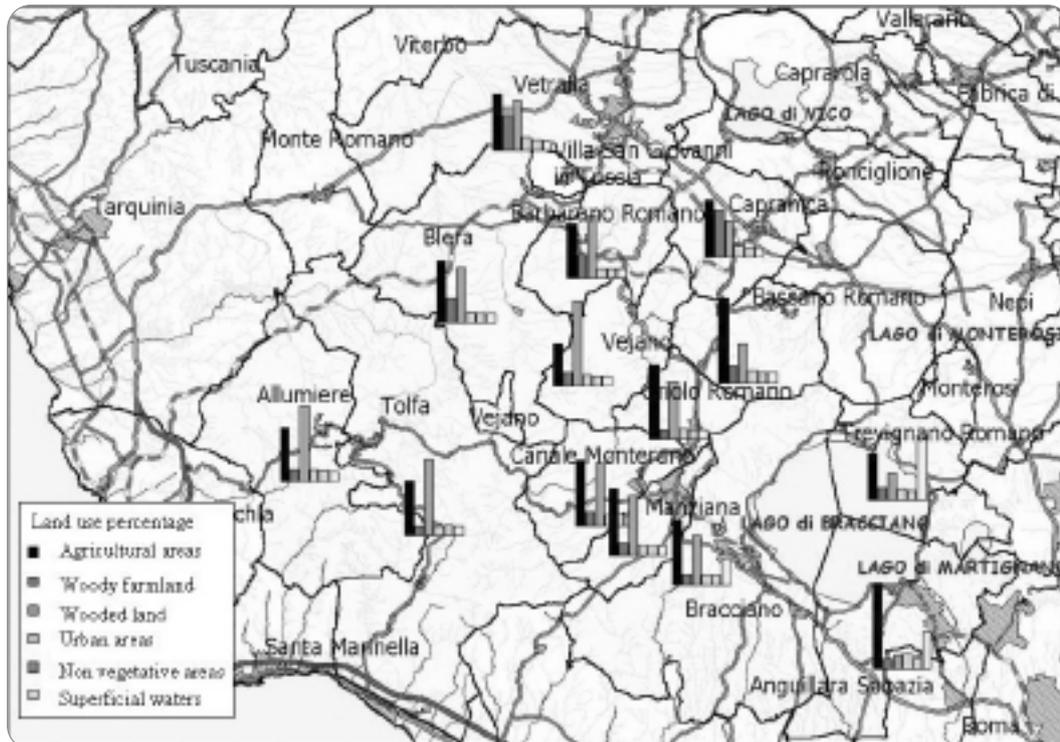
con altri dati, come ad esempio il valore della superficie effettivamente destinata a ciascun uso individuato (figura 6).

Quanto detto si ottiene con l'ausilio della tecnica del data charting offerta dal GIS. Nell'esempio della figura si mostra la realizzazione, tramite tale tecnica, dei grafici a barre dei dati delle statistiche del Land Cover per

re della superficie relativa alle aree agricole "investite a legnoso agrario" (barra grigio scuro) che mette in evidenza i numerosi nocciuoli presenti nella zona.

Conclusioni

Negli ultimi tempi, si è assistito ad un vero e



le rispettive aree comunali. Ciascuno dei chart rappresenta i valori della percentuale di uso del suolo rispetto alla superficie comunale totale per le 6 classi Corine Land Cover. E' interessante vedere, dunque, tramite l'utilizzo del GIS, come i diversi usi del suolo siano distribuiti all'interno dell'area studiata e come essi rappresentino sostanzialmente la cosiddetta 'vocazione' del territorio cui si riferiscono (figura 6).

Negli istogrammi relativi ai territori di Allumiere e Tolfa spiccano valori alti per quanto riguarda la superficie forestale (barra grigia) e le aree agricole con colture a seminativo, prati e pascoli (barra nera). Per i territori di Capranica e Vetralla spicca invece, in maggior misura rispetto agli altri Comuni, il valo-

proprio cambiamento nell'approccio, da parte della quasi totalità delle comunità sia scientifiche che politiche, alla analisi dei problemi socio-economici-ambientali riconoscendo sempre più l'importanza della territorialità degli aspetti antropici, sociali, economici in essa coinvolti. L'analisi ambientale volta ad evidenziare, qualora ve ne fossero, sofferenze nell'ambiente in studio ed a proporre eventuali azioni di recupero e/o risanamento, è senza dubbio uno dei temi che occupa una posizione di rilievo nella moderna governance.

Le idee e le soluzioni presentate in questo articolo identificano il GIS come strumento per la produzione di conoscenza integrata e dinamica da fornire a decision e policy makers

Figura 6
Elaborazione e visualizzazione dei dati Corine Land Cover (6 classi)

e anche ai cittadini come strumento tecnologicamente avanzato in grado di esaminare e valutare un largo numero di elementi ambientali e sociali nella nuova società knowledge-based. Viene definito un nuovo tipo di informazione/conoscenza in grado di proporsi come linguaggio comune tra i detentori delle diverse competenze e discipline in gioco. Inoltre nell'ottica di azzerare le distanze tra mondo scientifico, policy makers e cittadini, in un nuovo tipo di società basata sulla conoscenza, è tempo di pensare ad un modo nuovo di avvicinarsi all'informazione. La componente geografica contenuta in una larga parte dei dati comunemente usati può trasformare tali dati in geo-informazione, un nuovo tipo di conoscenza legata al territorio ed alle sue dinamiche fisiche, ambientali, socio-economiche ecc.

In questa ottica, l'Informazione Geografica può essere utilizzata come un linguaggio comune, in grado di legare e mettere in evidenza i molteplici aspetti che costituiscono un buon governo del territorio, arricchito di un nuovo modo di fare governance che si deve coniugare con la conoscenza del territorio stesso: "governo del territorio = conoscenza del territorio" come pure "conoscenza del territorio = governo del territorio".

L'obiettivo futuro, che le idee espresse in questo articolo sperano di innescare, è quello di fare entrare il GIS, con tutto l'altissimo potenziale contenuto nelle sue applicazioni, a fare parte della normale gestione dell'analisi ambientale.

Note

(1) I partecipanti al progetto sono: l'Amministrazione provinciale di Viterbo (coordinatore del progetto), l'Ente Parco di Bracciano e Martignano, i Comuni di Allumiere, Anguillara Sabazia, Bracciano, Canale Monterano, Manziana, Tolfa, Trevignano Romano (Provincia di Roma), i Comuni di Barbarano Romano, Bassano Romano, Blera, Capranica, Oriolo Romano, Vejano, Vetralla

(Provincia di Viterbo), ENEA, ISI (Impresa Sviluppo Innovazione s. c. a. r. l.) di Bracciano.

Successivamente allargato a comprendere: il Comitato Ecolabel Ecoaudit – Sezione EMAS Italia, l'APAT (Agenzia per la Protezione e dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici), l'ARPA Lazio e la Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Etruria meridionale.

(2) Gruppo di lavoro ENEA: dott.ssa Emanuela Caiaffa, dott. Angelo Correnti, arch. Antonio Disi, ing. Fausta Finzi - responsabile di progetto -, dott. Mauro Gamboni, dott. Mario Montini, dott. Fabio Musmeci, ing. Carmine Perrone Capano, dott. Loris Petrelli, dott.ssa Caterina Salvadego, dott. Giuliano Sciocchetti

Hanno collaborato: dott.ssa Gabriella Scapatucci – Soprintendenza per i Beni Archeologici per l'Etruria Meridionale, dott.ssa Patrizia Menegoni - EP srl, Roma, dott. Francesco Frattarelli - SIT srl, Roma.

Bibliografia on line

http://europa.eu.int/comm/research/science-society/science-governance/science-governance_it.html

http://europa.eu.int/comm/research/science-society/documents_en.html#governance

http://europa.eu.int/comm/research/science-society/links_en.html#Scienceandgovernance

<http://www.hull.ac.uk/futgov/>
European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions:

<http://www.eurofound.eu.int>

Online European industrial relations observatory:
<http://www.eiro.eurofound.ie/index.html>

http://europa.eu.int/comm/employment_social/knowledge_society/index_en.htm

Education and training:
http://europa.eu.int/comm/education/index_en.html

Bibliografia

CAIAFFA E., La potenzialità del GIS come strumento di supporto nelle scienze socio-economiche, *Energia, Ambiente e Innovazione*, 1, 2002.

CAIAFFA E., Geographic Information Science in Planning and in Forecasting, IPTS Report, vol. 76, luglio 2003.



Il tuffatore e la ballerina: breve storia del momento angolare

di **FABRIZIO CLERI**

ENEA

UTS Materiali e Nuove Tecnologie

scienza, tecnica,
storia & società

Una sintesi storico-scientifica dello sviluppo della moderna teoria del momento angolare, e delle sue implicazioni per lo sviluppo della meccanica quantistica. La formalizzazione ad opera di due grandi figure di scienziati, Giulio Racah e Eugene Wigner

Parte II

The driver and the dancer: a brief history of **angular momentum** **Part II**

An historic-scientific account of the development of the modern theory of angular momentum, and of its implications for the development of quantum mechanics. The formalization of this theory was carried out by two great scientists, Giulio Racah and Eugene Wigner

4. L' Attacco dell'algebra contro la teoria dei gruppi

La seconda metà degli anni 20 era il periodo in cui l'applicazione della teoria dei gruppi alla fisica stava rapidamente divenendo la tecnica di elezione per calcolare i dati spettroscopici, ma una singolare reazione pose rapidamente questo soggetto in una luce meno favorevole (si veda van der Waerden, nel citato libro su Pauli, il quale esprime lo spirito del tempo in maniera molto sentita; vedi inoltre, l'introduzione del libro di Condon e Shortley²⁸ per il famoso aneddoto di Dirac e Weyl su questo tema). Von Neumann, Wigner e Weyl applicarono le tecniche di teoria dei gruppi nell'approssimazione che le coordinate spaziali e di spin potessero essere trattate separatamente. Le funzioni d'onda spaziale e di spin così ottenute sono, ciascuna, rappresentazioni del gruppo simmetrico e perchè la funzione d'onda complessiva sia antisimmetrica, come richiesto dal principio di Pauli, le rappresentazioni spaziale e di spin devono essere l'una duale dell'altra.

Ma un giovane inglese promettente, John Clarke Slater, apportò una grande semplificazione alla teoria del momento angolare, applicando il principio di Pauli fin dall'inizio nella forma di una funzione d'onda scritta come il determinante di una matrice, di per sé naturalmente antisimmetrico²⁹. Le funzioni d'onda così scritte

hanno inoltre un particolare significato nella cosiddetta approssimazione di Hartree-Fock-Slater alla risoluzione dell'equazione di Schrödinger per un sistema di molti elettroni. Il risultato netto di questa semplificazione - aiutata dall'introduzione del modello vettoriale di Dirac - era di eliminare completamente qualsiasi necessità di ricorrere alle tecniche di teoria dei gruppi, alle quali si sostituivano manipolazioni algebriche esplicite. Il libro di Wigner del 1931³⁰ era un trattato sugli spettri atomici completo e autoconsistente basato completamente sulla teoria dei gruppi, ed era notevole per il suo dettagliato trattamento della teoria del momento angolare, che comprendeva ormai anche il teorema di Wigner-Eckart³¹. La seconda edizione ampliata, pubblicata da Weyl nello stesso anno, includeva anche la quantizzazione dei campi, la teoria di Dirac e il gruppo di Lorentz. Malgrado ciò i metodi di teoria dei gruppi sarebbero caduti in sfavore per molti anni a venire, mentre i metodi puramente algebrici alla Slater vennero applicati - da Casimir e van der Waerden³² - anche agli stessi gruppi di Lie. Questo lavoro, oggi divenuto familiare grazie all'introduzione dell'operatore di Casimir, sarà esteso e completato formalmente da Giulio Racah nel 1950. I metodi algebrici erano particolarmente adatti alla vecchia meccanica delle matrici di Born, Heisenberg e Jordan, e sono infatti alla base del capitolo sul momento angolare



Eugene Paul Wigner (1902-1995). Nato a Pest in Ungheria come Jenő Pál Wigner, figlio del direttore di una conceria e di una casalinga, entrambi di origine ebraica non praticanti. Al Liceo Luterano di Budapest divenne amico del grande (e scontroso) Janós (poi noto come John) von Neumann, di cui riconobbe da subito la eccezionale abilità matematica. Eugene, invece, si considerò sempre uno scarso matematico, per cui seguendo il desiderio del padre si iscrisse a ingegneria chimica, studiando prima a Budapest poi alla Technische Hochschule a Berlino. Studiò quindi matematica e fisica per proprio conto, seguendo privatamente le lezioni di Planck, Einstein, von Laue ed altri all'Università di Berlino. Tornato a Budapest, nel 1926 fu invitato di nuovo a Berlino dal cristallografo Weissenberg e nel 1927 lavorò a Gottinga come assistente di David Hilbert, due passi che segnarono la sua svolta definitiva verso la fisica. Nel 1939 si trasferì a Princeton. Dal 1942 al 1945 lavorò a Chicago al progetto Manhattan, di fatto creando da zero la disciplina dell'ingegneria dei reattori nucleari. Fu insignito del Nobel per la Fisica nel 1963, oltre alla US Medal of Merit nel 1946, l'Enrico Fermi Prize nel 1958 e numerosi altri premi.

nel bel libro di Born e Jordan, *Elementäre Quantenmechanik*³³. Pauli era il maestro riconosciuto di queste tecniche, tanto che la sua quantizzazione non relativistica dell'atomo di idrogeno nel 1926 rimane un esempio insuperato. Nel 1931, in un lavoro scritto insieme a Güttinger, Pauli applicò i metodi algebrici al momento angolare³⁴. In una appendice al lavoro essi, partendo dalle relazioni di commutazione, introdussero dapprima l'idea di un operatore vettoriale arbitrario (definito dalle regole di commutazione) e quindi l'idea degli elementi di matrice ridotti (cioè una scrittura per l'indipendenza esplicita dal numero quantico m , o proiezione del momento angolare lungo un asse di quantizzazione).

Mediante l'algebra dei commutatori e considerando la composizione di tre momenti angolari, essi derivarono tutti gli elementi di matrice di quelli che oggi conosciamo come coefficienti di Racah $W(l_1 s_1 j; l' j')$

Fu proprio su questo elegante lavoro di Pauli e Güttinger, oltre che sul precedente libro di Born e Jordan, che Condon e Shortley basarono la loro discussione del momento angolare nel capitolo III del loro libro di spettroscopia²⁸, testo che costituì il punto di riferimento per tutte le tecniche basate sul momento angolare nel calcolo degli spettri atomici per i successivi venti anni, fino alla metà degli anni 50.

Allo stesso periodo appartiene l'epocale serie di lavori di Giulio Racah sulla teoria degli spettri complessi. L'enfasi di Racah è tutta sulla spettroscopia atomica; le sue tecniche sono completamente algebriche e nella medesima tradizione del lavoro di Pauli e Güttinger. Il primo passo del percorso concettuale di Racah è la deduzione dei coefficienti di Wigner con metodi algebrici (nel secondo articolo della serie³⁵), seguita dalla definizione, in termini dei rispettivi commutatori, degli

operatori tensoriali generali basati sulle matrici del momento angolare. Questi ultimi portano (ibidem, capitolo 3) all'algebra degli operatori tensoriali, una struttura, come visto, già implicita nel teorema di Wigner-Eckart. I coefficienti di Racah sono dapprima introdotti come coefficienti di accoppiamento per calcolare il prodotto scalare di operatori tensoriali (ibidem, equazione n. 38) e successivamente come coefficienti di trasformazione tra diversi schemi di accoppiamento di tre momenti angolari. Nello stesso lavoro venivano date le formule algebriche esplicite per tutti i (nuovi) coefficienti di Racah, le relative proprietà di simmetria (S4) e due delle tre possibili regole di somma indipendenti. Avendo così forgiato i suoi strumenti, Racah passa quindi a fornire un dettagliato resoconto di applicazioni spettroscopiche del suo formalismo. Le idee avviate nel secondo lavoro sono ulteriormente elaborate nel terzo³⁶: i coefficienti di parentela frazionaria, le relazioni esplicite per il coniugio di fase e l'introduzione del cosiddetto "operatore di seniorità". Nello sviluppare questi concetti spettroscopici Racah era andato molto oltre il suo punto di partenza, cioè l'introduzione di metodi algebrici nella teoria del momento angolare, tanto che nel quarto e conclusivo lavoro della serie, pubblicato a qualche anno di distanza dai primi tre³⁷, egli era addirittura costretto a tornare ai metodi della teoria dei gruppi per facilitare la comprensione della sua formidabile analisi. L'avanzamento nella tecnica del momento angolare raggiunto da Racah divenne subito del massimo interesse, non solo e non tanto nella spettroscopia atomica ma piuttosto nella teoria della correlazione angolare delle emissioni nucleari, dove il metodo di Racah fu applicato per primo da Gardner (1949), da Lloyd e successivamente dallo stesso Racah e da Blatt. Peraltro, a sottolineare il sostanziale equilibrio tra vantaggi e svantaggi

Spettri atomici

La spettroscopia atomica, disciplina iniziata da Fraunhofer e Kirchhoff nella prima metà dell'800 grazie agli importanti progressi tecnologici nell'ottica, ha trovato una sistematizzazione solo con l'avvento della meccanica quantistica, dal 1913. Facendo passare luce attraverso un vapore di atomi si possono registrare delle immagini fotografiche in cui compaiono delle righe, con modalità diverse se si fa un esperimento di emissione o di assorbimento di luce. La distanza relativa di queste righe, come fu scoperto da Bohr, è legata a "salti" energetici degli elettroni. La presenza di certe righe nello spettro è però legata alle "regole di selezione" dettate dal momento angolare totale J , somma del momento orbitale L e di spin S di tutti gli elettroni di un certo atomo.

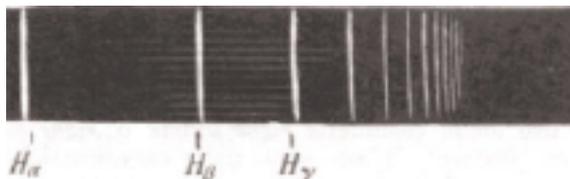


Figura 1: Spettro atomico dell'atomo di idrogeno. Le prime quattro linee della "serie" cadono nel visibile, le altre nell'ultravioletto. Fu J. J. Balmer a trovare, nel 1885, la relazione empirica che descrive la sequenza delle lunghezze d'onda corrispondenti alle righe. L'interpretazione delle righe spettrali rimase oscura finché Niels Bohr, nel suo famoso articolo nel *Philosophical Magazine* del 1913, introdusse l'ipotesi della quantizzazione dell'energia e del momento angolare orbitale. Le "serie" corrispondono a salti quantici con uguale livello di partenza, e furono dette, in base all'apparenza fotografica, *sharp*, *diffuse*, *principal*.

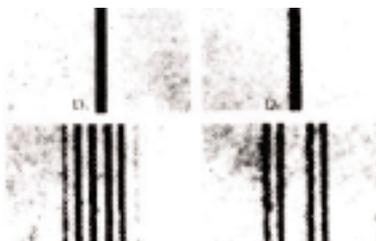


Figura 2: Immagine tratta dal lavoro originale di P. Zeeman del 1897, in cui si vede lo sdoppiamento delle due righe di assorbimento D1 e D2 dell'atomo di sodio qualora la sorgente sia posta in un campo magnetico B . La separazione delle righe è dovuta al fatto che si tratta di salti quantici tra stati con uguale differenza di momento angolare totale J , ma provenienti da livelli con differenti combinazioni di momento angolare orbitale L e spin S . Come dimostrato dall'esperimento di Stern e Gerlach, l'interazione con il campo magnetico permette di distinguere tra i diversi valori di L e S a parità di J . Zeeman utilizzava come sorgente un tubo a scarica saturo di vapori di sodio.



Figura 3: Spettro della stella z-Puppis misurato da C. Pickering nel 1896. Tra le linee della serie di Balmer si intravedono altre linee. Viktor Rydberg pensò si trattasse delle linee della cosiddetta serie *sharp* dell'atomo d'idrogeno. Calcolò teoricamente, a partire dalla serie *diffuse* la lunghezza d'onda della prima linea della serie *principal* trovando una lunghezza d'onda di 4688 Å. Poi trovò nello spettro della z-Puppis una linea (indicata in figura) che aveva una lunghezza d'onda di 4686 Å. Rydberg credeva che il piccolo errore fosse trascurabile, dovuto ad un errore nelle osservazioni. Solo dopo il lavoro di Bohr nel 1913 verrà data la corretta interpretazione del problema: la serie *sharp* osservata non era da attribuire agli atomi d'idrogeno, bensì ad atomi di elio ionizzati.

Dato che L ed S sono dei vettori che, come detto nel testo, in meccanica quantistica hanno solo una delle tre componenti x,y,z ben specificata nello spazio (ad esempio la proiezione lungo l'asse z del campo magnetico, L_z e S_z) il valore del momento totale J può prendere tutta una serie di valori a parità di L ed S . Allo stesso modo, la proiezione del momento angolare M_J dipende dai valori delle proiezioni L_z e S_z . Quali siano questi valori possibili ce lo dicono i coefficienti di Wigner o, in maniera equivalente, i coefficienti di Racah.

Il cosiddetto fattore di Landé, g_L , è un particolare coefficiente (di Wigner o di Racah) che dipende dal valore di momento angolare totale J dell'elettrone e dai valori di momento orbitale L e di spin S che lo compongono, e collega questi valori alla separazione in energia ΔE tra le righe spettrali di uno stesso atomo corrispondenti a valori diversi di J , L ed S , quando i salti quantici avvengono nella regione interessata da un campo magnetico (come negli esperimenti di Stern e Gerlach, o di Zeeman). La separazione in energia è data dalla semplice espressione:

$$\Delta E = g_L \mu_B M_J \left| \frac{\hbar}{2} \right| \quad \text{ed il fattore di Landé ha la forma:} \quad g_L = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

delle due descrizioni gruppale ed algebrica, fu proprio nel contesto di queste applicazioni nucleari che Ugo Fano (con il quale Racah collaborò per un certo periodo) sottolineò come l'elemento fondamentale nell'algebra degli operatori tensoriali non sia, in fondo, il coefficiente di Racah ma piuttosto il simbolo $9-j$ di Wigner (come oggi lo conosciamo), il quale deriva dagli elementi di matrice del prodotto tensoriale più generale di due operatori tensoriali.

La teoria della correlazione angolare nelle reazioni nucleari fu lo stimolo che portò alla prima tabulazione numerica dei coefficienti di Racah. La ricerca di relazioni ricorsive per facilitare questa tabulazione portò così Biedenharn alla scoperta della terza regola di somma indipendente dei coefficienti³⁸, mentre un risultato simile venne trovato indipendentemente da J. P. Elliott³⁹ nel caso dei calcoli di struttura nucleare. Ma tutti questi risultati erano già contenuti implicitamente in un manoscritto originale di Wigner, misteriosamente rimasto nell'ombra per quasi venticinque anni.

5. Wigner, dalla periferia al premio Nobel

Davanti all'invasione dei più semplici metodi algebrici in spettroscopia, Wigner proseguì solitario con le sue considerazioni sul ruolo della teoria dei gruppi nel momento angolare, concentrandosi sulla categorizzazione delle caratteristiche essenziali del gruppo delle rotazioni che

sono responsabili della struttura particolarmente semplice dei coefficienti di addizione vettoriale. Questo lo portò all'idea di un "gruppo semplicemente riducibile" ambivalente (cioè tale che ogni classe contiene anche il suo elemento inverso) e privo di molteplicità (il prodotto di Kronecker non contiene ciascuna rappresentazione più di una volta)⁴⁰.

Queste considerazioni culminarono in uno straordinario manoscritto, "On the matrices which reduce the Kronecker products of representations of simply reducible groups" (1941) che, piuttosto stranamente, rimase non pubblicato fino al 1965 quando fu incluso nel libro di Biedenharn e van Dam (²⁴ p.87). In quel manoscritto veniva elaborata in tutti i suoi dettagli l'intera struttura dei simboli $3n-j$. Non è chiaro perché Wigner abbia rinunciato a pubblicare un lavoro di questa importanza. Forse il successo che ormai riscuotevano i metodi algebrici nell'analisi dei dati spettroscopici atomici e nucleari lo sconsigliò dall'insistere con il tentativo di affermare la teoria dei gruppi, o magari egli si ritrovò troppo preso nelle fasi iniziali del progetto Manhattan. Probabilmente non sapremo mai la verità. Per indicare almeno una parte degli scopi di questo manoscritto lungamente inedito di Wigner bisogna cominciare dal teorema di Wigner-Eckart che, come detto, era una delle generalizzazioni già contenute nel libro di Wigner del 1931. Il contenuto essenziale del teorema di Wigner-Eckart è l'asserzione secondo cui nella teoria quantistica del momento angolare



Giulio Racah (1909-1965). Discendente di una antica e rinomata famiglia di ebrei livornesi, nacque a Firenze, si laureò nella stessa città nel 1930 e studiò poi a Roma con Fermi. Divenuto lettore a Firenze nel 1932, quindi professore di fisica a Pisa nel 1937 (classificandosi secondo nel concorso vinto da Ettore Majorana), fu costretto a lasciare la cattedra alla promulgazione delle leggi razziali del 1938. Immigrato nel 1939 in Palestina, cambiò il suo nome nell'ebraico Yoel. Nel 1948 fu comandante di un avamposto ad Hagana, sul monte Scopus. Fu il creatore della fisica teorica del giovane stato d'Israele, insegnò fisica teorica alla Hebrew University di Gerusalemme, dove divenne in seguito Dean of Science, poi rettore e infine presidente. In suo onore, l'istituto di fisica della Hebrew University ed uno dei crateri della Luna portano oggi il suo nome

si può definire un gruppo di operatori tensoriali unitari che formano una base completa e ortonormale per un qualunque altro operatore tensoriale. L'elemento di matrice ridotto per un dato operatore tensoriale è semplicemente la sua proiezione rispetto all'operatore di Wigner, cioè un operatore invariante. Questo fatto può essere convenientemente parafrasato grazie ad una osservazione di Racah, secondo cui il teorema di Wigner-Eckart separa gli aspetti fisici del problema (gli elementi di matrice ridotti, cioè gli invarianti) dagli aspetti puramente geometrici (queste fondamentali idee sono ulteriormente generalizzabili a strutture geometriche diverse dalle rotazioni nello spazio tridimensionale, ⁴¹⁻⁴⁵). Un secondo ruolo logicamente equivalente per i coefficienti di Wigner è quello di coefficienti di accoppiamento da cui il nome originariamente usato di "coefficienti di accoppiamento vettoriale" (vector coupling coefficients). L'accoppiamento coinvolge due diversi spazi (lo spazio dei bra e quello dei ket), per cui si arriva naturalmente a studiare quale accoppiamento produce degli elementi invarianti. I particolari coefficienti di Wigner che sono utili a questo scopo giocano il ruolo di una relazione metrica, e sono gli speciali "simboli 1-j".

Questi due aspetti dei coefficienti di Wigner possono essere abbinati considerando l'accoppiamento tra due operatori di Wigner (tensori unitari). Questa operazione definisce un nuovo operatore tensoriale che - proprio in virtù del teorema di Wigner-Eckart - è equivalente a un nuovo operatore tensoriale unitario a meno di un fattore di normalizzazione. L'elemento di matrice ridotto che così si ottiene è un operatore invariante formato da cinque coefficienti di Wigner (due dei quali sono necessari per esprimere l'accoppiamento). Fra parentesi, notiamo che gli elementi di matrice di questo

nuovo operatore invariante sono proprio i familiari coefficienti di Racah. È evidente che questo processo di generazione di nuovi invarianti può continuare indefinitamente; in questo modo (un po' pedestre) abbiamo di fatto parafrasato l'introduzione dei simboli 3n-j di Wigner, che vennero definiti e studiati per la prima volta nel suo lavoro non pubblicato del 1941.

L'elegante derivazione ad opera di Julius Schwinger dell'intera teoria quantistica del momento angolare dal punto di vista della seconda quantizzazione di un sistema bosonico di sistemi a spin-1/2 risale pure allo stesso periodo (è contenuta in un oscuro rapporto tecnico della US Atomic Energy Commission, numero NYO-3071 del 1952). La trattazione di un momento angolare generale come composto da sistemi di spin-1/2 era già stata introdotta, come visto, da von Neumann e Wigner, e da Weyl, ma la considerazione del sistema di bosoni in seconda quantizzazione aggiunge un'ulteriore, enorme potenzialità all'intera tecnica. Peraltro, sembra essere andato del tutto ignorato che questa stessa idea era stata proposta assai prima da Pascual Jordan, in un breve lavoro nel quale il gruppo generale unitario era discusso in termini di strutture in seconda quantizzazione sia fermioniche che bosoniche⁴⁶. Jordan era specificamente interessato al problema della teoria a molti corpi, e la sua era la prima applicazione assoluta delle tecniche della seconda quantizzazione a questo campo. Le applicazioni della teoria quantistica del momento angolare, in particolare l'uso delle tecniche algebriche di Racah e di quelle gruppali di Wigner, sono divenuti oggi così diffusi che sarebbe impossibile, e probabilmente inutile, tentarne una rassegna sinottica. A parte il campo delle correlazioni angolari, già menzionato, si potrebbero individuare i due campi della spettroscopia atomica e nucleare, come quelli in cui i due metodi ebbero il mag-

giore impatto. Uno dei problemi fondamentali, se non il problema fondamentale, della spettroscopia sia atomica che nucleare è la costruzione di funzioni d'onda antisimmetriche ad n particelle a partire dagli stati (degeneri) di una data banda di energia. Seguendo Slater, la procedura standard impiega stati costruiti con determinanti di funzioni d'onda simmetriche per raggiungere l'antisimmetria, ma le funzioni d'onda risultanti non sono sempre autofunzioni del momento angolare. Una tecnica alternativa, introdotta da Gray e Wills, impiega operatori di proiezione per isolare dai determinanti di Slater le autofunzioni volute del momento angolare. Lo svantaggio di tale procedura, notato dallo stesso Racah, è però che la tecnica richiede un uso eccessivo degli operatori tensoriali diventando spesso inutilmente complicata (va peraltro notato che successivamente a queste obiezioni, l'uso degli operatori di proiezione è stato molto sviluppato ed è divenuto molto importante nella chimica quantistica⁴⁷). Un approccio alternativo, il cosiddetto metodo genealogico già introdotto da Bacher e Goudsmit, considera il problema ricorsivo: lo stato ad n particelle è costruito aggiungendo una particella ai possibili stati parenti ad $(n-1)$ particelle. I coefficienti che esprimono questa costruzione sono detti coefficienti di parentela frazionaria. Uno dei maggiori avanzamenti contenuti nei lavori di Racah fu appunto l'avvio di una trattazione sistematica di tali coefficienti.

Ci si può chiedere all'infinito quale sarebbe stato lo sviluppo della meccanica quantistica senza l'intuizione di Wigner. Quello che è sicuro è che, ai tempi in cui egli cominciò ad applicare la teoria dei gruppi a problemi di fisica il soggetto era considerato ostico anche da grandi fisici del calibro di Schrödinger, Ehrenfest e Born⁴⁸. Nell'introduzione del citato libro sugli spettri atomici di Condon e Shortley

del 1951²⁸ si leggeva: "Il lettore avrà sentito menzionare che questa matematica [la teoria dei gruppi, ndr] è di grande importanza per il nostro soggetto. Noi siamo riusciti ad impararla."

L'inusuale iniziazione di Eugene Wigner, che si formò dapprima come ingegnere e iniziò quindi a dedicarsi alla fisica affrontando argomenti di natura decisamente applicativa, lo rende per molti versi un fisico "di periferia", al confronto dei fisici dalla discendenza aurea che vanno dalla scuola di Berlino di Max Planck alla Gottinga di Born. Il suo è un eccellente esempio di quanto nella scienza possa essere fruttuosa la contaminazione tra domini solo in apparenza lontani. (Voglio ricordare a questo proposito che la spettroscopia delle fibre tessili iniziata proprio da Herman Mark a Berlino può essere considerata come una delle spinte iniziali ad un'altra fondamentale rivoluzione scientifica del 900: la scoperta della struttura a doppia elica del DNA, partita proprio dall'applicazione delle tecniche di spettroscopia dei raggi X sviluppate per le fibre lunghe della cellulosa⁴⁹. La clamorosa irruzione di Wigner nella teoria quantistica venne da lui stesso descritta come un esempio del motto "la fortuna capita agli stupidi", in una intervista con John Walsh⁵⁰: "Quando tornai a Budapest nel 1920 ero un ingegnere chimico. Ma mi abbonai alla rivista *Zeitschrift für Physik*, dove lessi i lavori di Born, Jordan e Heisenberg. Così, quando ricevetti l'offerta di tornare a Berlino come fisico, non potei resistere [...]. L'offerta proveniva da Weissemberg, che era interessato alla spettroscopia e alla diffrazione dei raggi X. Lui mi diede un problema, che io trovai facile da risolvere, ma poi mi chiese di mettere la soluzione in una forma più elegante (il già citato aneddoto relativo al libro di algebra di Weber, ndr). Questo mi portò alla teoria dei gruppi. C'è un proverbio tedesco che dice *Der Dumme hat*

Gluck (lo stupido ha fortuna, n.d.r.). E funzionò nel mio caso, perché ben presto mi resi conto dell'importanza che la teoria dei gruppi poteva avere in meccanica quantistica. E Johnny von Neumann mi diede un grande aiuto per trovare la giusta collocazione di quella teoria."

Bibliografia per la parte 2

Da questa bibliografia sono, con poche eccezioni, esclusi i lavori scientifici relativi ad applicazioni e verifiche sperimentali del momento angolare. L'intento di questa lista, di fornire una base bibliografica-storica per eventuali approfondimenti degli sviluppi metodologici della teoria quantistica del momento angolare.

28. E. U. CONDON e G. H. SHORTLEY, *The theory of atomic spectra*, Cambridge University Press, London 1951.
29. J. C. SLATER, articolo sui determinanti
30. E. P. WIGNER, *Gruppentheorie und ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren*, Vieweg, Braunschweig, 1931, ristampato nella traduzione di J.J Griffin, *Group Theory and its Application to the Quantum Mechanics of Atomic Spectra*, Academic Press, New York 1959.
31. C. ECKART, *Review of Modern Physics* 2 (1930) p.305
32. R. CASIMIR e B. L. van der Waerden, *Mathematische Annalen* 111. (1935) p.1
33. M. BORN e P. JORDAN, "Elementäre Quantenmechanik", Springer-Verlag, Berlino 1930.
34. W. PAULI e P. GÜTTINGER, *Zeitschrift für Physik* 67. (1931) p.762
35. G. RACAHA, *Physical Review* 62. (1942) p.438
36. G. RACAHA, *Physical Review* 63. (1943) p.367
37. G. RACAHA, *Physical Review* 76. (1949) p.1352
38. L. C. BIEDENHARN, *Journal of Mathematics and Physics*, 31. (1953) p.287
39. J. P. ELLIOTT, *Proceedings of the Royal Society*, A 218. (1953) p.370
40. E. P. WIGNER, *Annalen der Mathematik* 63. (1941) p.57
41. A. P. STONE, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 57. (1961) p.460
42. L.C. BIEDENHARN, *Physics Letters* 3. (1963) p.254
43. B. DIU, *Nuovo Cimento* 28. (1963) p.466
44. J. GINIBRE, *Journal of Mathematical Physics* 4. (1963) p.720
45. M. MOSHINSKY, *Journal of Mathematical Physics* 4. (1963) p.1128
46. P. JORDAN, *Zeitschrift für Physik* 94. (1935) p.531
47. P. LÖWDIN, *Review of Modern Physics* 35. (1963) p.345
48. A. I. MILLER, "Symmetry and Imagery in the Physics of Bohr, Einstein and Heisenberg", in *Symmetries in Physics*, edito da M. G. Doncel, A. Hermann, L. MICHEL e A. PAIS, Barcellona, 1987.
49. R. C. OLBY, "The path to the double helix: the discovery of DNA", Dover, New York, 1994.
50. J. WALSH, "A Conversation with Eugene Wigner", *Science* 181. (1973) p.52.

Con riferimento all'articolo "L'ENEA al servizio della Pubblica Amministrazione per lo sviluppo sostenibile", apparso sul precedente numero 2/2005 di Energia, Ambiente e Innovazione, si precisa che coautori dello stesso sono l'ing. Francesco Capello, del Centro ENEA di Palermo, promotore del progetto regionale SICE-NEA e l'ing. Giovanni De Paoli, ideatore del Progetto ENEA, per la scuola, "Educarsi, al futuro".

Nuove tecnologie per la memoria: riproduzione digitale delle sculture di Giuliano Minguzzi

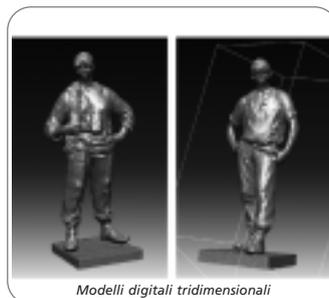
SERGIO PETRONILLI

ENEA,

Unità di Agenzia per lo Sviluppo Sostenibile

In occasione del 60° anniversario della battaglia di Porta Lama, il Comune di Bologna, Progetto Nuove Istituzioni Museali, in collaborazione con l'ENEA di Bologna, Unità di Agenzia Progetti di Trasferimento Tecnologico per le PMI, ha promosso la realizzazione della copia in scala del "Monumento al Partigiano e alla Partigiana" (1947) dello scultore Luciano Minguzzi. L'intervento si è articolato in due fasi distinte: quella di acquisizione della geometria del monumento, mediante la tecnologia denominata ingegneria inversa, e la seconda di prototipazione rapida per la riproduzione delle copie in scala, conformi all'originale. Nella salvaguardia dei beni culturali, ed in particolare di quelle opere dove l'aspetto morfologico assume un ruolo primario, l'uso di sistemi di acquisizione digitale e di tipo CAD/CAM consentono, sotto opportune condizioni, sia di

ottenere preziose informazioni sulle caratteristiche morfologiche dell'opera d'arte, nel rispetto dell'integrità del reperto, sia di eseguire interventi di simulazione e pianifi-



Modelli digitali tridimensionali

cazione dell'azione di restauro.

L'ingegneria inversa (Reverse Engineering) è quella tecnologia che, a partire dal modello fisico, consente di risalire alla sua descrizione matematica costituita dalle coordinate dei punti sulla sua superficie. Il risultato è una rappresentazione tridimensionale del reperto visibile con i moderni sistemi CAD o fruibile attraverso internet mediante

software dedicati. La fase di acquisizione digitale mediante ingegneria inversa del Monumento di Porta Lama è stata svolta mediante l'utilizzo del sistema di scansione a triangolazione laser senza contatto, capace di acquisire ad ogni scansione una grande quantità di punti con elevata precisione, così da mantenere la fedeltà geometrica tra le sculture reali e quelle virtuali. Per la ricostruzione dei modelli digitali tridimensionali sono state eseguite, per ognuna delle due statue, più di trecento scansioni successivamente riallineate mediante l'utilizzo di marker di riferimento, facendo uso di software dedicati al fine di ottenere il modello geometrico completo.

La scelta della struttura ottimale che consentisse di eseguire le scansioni al coperto, senza ostacoli al posizionamento dello scanner, è stata eseguita mediante una simulazione virtuale dello scenario delle operazioni di scansione. È stata quindi ricostruita con software CAD (Computer Aided Design), sia la struttura di protezione che la figura di ingombro delle due statue (ottenute da semplici immagini digitali), permettendo di avere informazioni utili sia per la scelta della copertura più idonea, che per il suo posizionamento. Uno dei problemi maggiori incontrati nella fase di ricostruzione dei modelli digitali è stato il completamento della geometria dei modelli nelle zone in sottosquadro, ovvero quelle zone nascoste che il fascio laser non riesce a raggiungere completamente. Per ovviare a questo problema, è stata messa a punto una metodologia che consente di ricostruire parti incomplete di un modello digitale tridimen-

sionale mediante l'uso di un programma di modellazione CAD di tipo free-form.

Una volta ultimata la fase di ricostruzione dei modelli digitali, si è passati alla fase di prototipazione rapida utilizzando un sistema multigetto (MJM-Multi Jet Modeling, Thermojet) che deposita strati di un materiale termoplasti-



Figura 2

Parte superiore del Partigiano alla fine della fase di prototipazione rapida

co simile alla cera (dello spessore di circa 0,04 mm), materiale che presenta buone caratteristiche di applicazione nel processo di microfusione a cera persa, in quanto non genera residui all'interno del guscio ceramico dopo la fase di scolatura, comportandosi come la cera tradizionale e consentendo di ottenere delle fusioni di ottima qualità.

Obiettivo della fase di prototipazione rapida è quello di

sostenere, a partire dal modello digitale tridimensionale opportunamente scalato, un modello da utilizzare come copia sacrificale nel processo di microfusione a cera persa. In questo caso non volendo realizzare il modello pieno, sia per motivi legati al peso che per i problemi relativi alla fusione, è stato necessario creare sul modello digitale un opportuno spessore interno di 4,5 mm, corrispondente a quello minimo in genere usato dalla fonderia Venturi Arte per questa tipologia di oggetti. Dato che le limitate dimensioni di lavoro della macchina non consentono di ottenere dei modelli di dimensioni tali da fornire un aspetto estetico soddisfacente, si è deciso di realizzarli con un'altezza di circa 500 mm utilizzando un fattore di scala pari a 0,2 (1:5). Questa soluzione ha comportato la divisione del modello in due parti da riassemblare in un secondo tempo, prima della fase di fusione e la creazione di un opportuno accoppiamento geometrico, al fine di consentire il corretto riallineamento del componente superiore con quello inferiore. Particolare attenzione è stata posta alla disposizione del modello rispetto al piano di crescita della macchina di prototipazione rapida, al fine di ottenere sia la migliore qualità superficiale, sia la rimozione ottimale dei supporti depositati dalla macchina per sostenere le parti geometriche in sottosquadro. Per la realizzazione di ogni componente, dei quattro in cui sono state divise le due statue, sono occorse circa 18 ore di lavoro della macchina di prototipazione rapida (Thermojet), in pratica poco più di tre giorni,

in quanto la macchina può lavorare in condizioni non presidiate anche durante la notte. Dopo la fase di prototipazione si è passati alla fase di desupportazione consistente nell'asportazione del materiale di supporto e a quella di finitura superficiale, allo scopo di preparare i modelli alla successiva fase di fusione.

Quest'ultima operazione è stata realizzata nella fonderia Venturi Arte di Bologna che vanta una grande esperienza nella tecnica della fusione a cera persa applicata alla riproduzione di questa tipologia di oggetti. Ottenuti i modelli in bronzo, dopo opportune e complesse fasi di lavorazione, questi sono stati sottoposti a trattamenti termici e di ossidazione al fine di conferire alla superficie la patina con il colore desiderato. In questo caso, la scelta delle patine è stata effettuata con la consulenza dell'Accademia delle Belle Arti di Bologna, consentendo di ottenere un effetto estetico del tutto simile a quello delle statue originali.

Il percorso seguito mostra che è possibile, mediante l'utilizzo delle tecnologie di ingegneria inversa e di prototipazione rapida, riprodurre in scala opere d'arte di grandi dimensioni e di alto valore storico, mantenendo inalterato il senso artistico dell'opera stessa.

Quello presentato nell'esperienza di Porta Lama è un lavoro pilota destinato sia a suscitare l'interesse della comunità artistica e scientifica impegnata nella ricerca di nuove applicazioni tecniche, sia a trasformarsi in un'occasione per riscoprire e valorizzare un'opera d'arte insieme alla sua memoria storica.

Figura 3

Riproduzione in scala 1:5 dei Partigiani di Porta Lama realizzati in bronzo a partire dai modelli in cera prodotti con tecnologie digitali e di prototipazione rapida



dal **MONDO****Celle a combustibile a carbone****Il Brasile punta sui biocombustibili****Scienza e Tecnologia: avanza l'Asia****Accordo spaziale Europa-India****CELLE A COMBUSTIBILE A CARBONE**

Negli USA sono state realizzate delle celle a combustibile che convertono direttamente il carbone in energia elettrica.

Le Direct-Carbon Fuel Cell (DCFC), realizzate presso il Lawrence Livermore National Laboratory in California, anziché impiegare un combustibile gassoso, tipicamente idrogeno, sono alimentate con uno slurry composto da un carbonato fuso (di litio, sodio o potassio) e particelle di carbone estremamente fini (10-1000 nanometri di diametro). Lo slurry stesso costituisce il componente anodico. Diversamente dalle tradizionali celle a carbonati fusi (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cells), in cui il carbonato

costituisce l'elettrolita, a mantenere la massa fusa separata dal comparto catodico c'è un separatore ceramico, alimentato ad aria, che permette al contempo la migrazione degli ioni carbonato tra anodo e catodo. La temperatura di funzionamento è 750-850 °C. La resa elettrica della cella si aggira intorno all'80% e la potenza è pari a 1 kW/m², sufficientemente elevata per applicazioni pratiche. La tecnologia è complessa, ma se riuscirà ad affermarsi, il carbone competerà con il gas naturale anche nelle fuel cell.

IL BRASILE PUNTA SUI BIOCOMBUSTIBILI

In occasione dell'inaugurazione della prima centrale di produzione di biodiesel, il presidente brasiliano Lula ha affermato che il Brasile intende diventare il maggior produttore mondiale di combustibili estratti da risorse naturali rinnovabili.

Il Brasile già da tempo utilizza l'alcol di canna da zucchero per produrre bioetanolo, come additivo o sostituto della benzina; di recente il governo ha lanciato un programma analogo per produrre biodiesel utilizzando un olio estratto dalla "mamona", una pianta amazzonica di facile adattamento a tutto il paese.

Inizialmente al gasolio minerale ricavato dal petrolio sarà aggiunta una percentuale del 2 per cento di biodiesel, poi progressivamente, con l'adozione di motori adattati, questo diventerebbe il carburante unico per i motori diesel in circolazione in Brasile.

SCIENZA E TECNOLOGIA: AVANZA L'ASIA

Il panorama scientifico globale sta cambiando rapidamente e per gli U.S.A., che da lungo tempo vantano il predominio per l'innovazione, potrebbero esserci cattive notizie.

I governi di molti altri paesi stanno rafforzando i propri programmi educativi e di ricerca, e come risultato, il gap fra gli Stati Uniti e i suoi competitori d'oltreoceano si sta restringendo, soprattutto per quanto riguarda i paesi asiatici (Cina, Corea del Sud, Giappone, Taiwan, Singapore e India). Secondo uno studio presentato al recente convegno dell'American Chemical Society, tenuto in California, il numero di ricercatori in Asia sta crescendo rapidamente, in quanto gli asiatici - e soprattutto i cinesi - si laureano sempre di più. Contemporaneamente, il numero di cittadini statunitensi che raggiungono la laurea o il dottorato sta diminuendo. Inoltre, dal 1995 al 2001 la Cina, la Corea del Sud e Taiwan hanno aumentato i fondi per la ricerca e lo sviluppo di circa il 140 per cento, mentre gli U.S.A. hanno aumentato i propri investimenti soltanto del 34 per cento (il 68 per cento del quale proviene dal settore privato e non è destinato alla ricerca di base).

ACCORDO SPAZIALE EUROPA-INDIA

Per effettuare la prima missione lunare dell'India, Chandrayaan-1, è stato stipulato in marzo un accordo di cooperazione tra l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e l'Indian Space Research Organisation (ISRO). L'Europa fornirà strumentazione di precisione (identica a quella utilizzata dall'ESA nel 2003 per la missione Smart-1) e in cambio riceverà la disponibilità immediata di tutti i dati forniti dagli strumenti. L'ISRO, sin dal 1975, ha sviluppato numerosi veicoli da lancio e satelliti per l'osservazione della Terra, per le telecomunicazioni e per le previsioni atmosferiche. Il nuovo satellite indiano, che sarà lanciato nel 2007/2008 e dovrebbe restare operativo per due anni, in-dagherà sull'origine e l'evoluzione della Luna e del sistema solare.

cronache

dall'UNIONE EUROPEA

Un portale aperto per la scienza

Nucleare di terza generazione per Francia e Finlandia

La futura politica spaziale europea

UN PORTALE APERTO PER LA SCIENZA

Sinapse, indirizzo web europe.int.eu/sinapse, sta per Scientific Information for Policy Support in Europe. È il portale lanciato recentemente dalla Commissione Europea, che propone le "Pagine gialle per la consulenza scientifica". Sinapse, infatti, ospita una biblioteca di articoli e pareri scientifici rilevanti ed è uno strumento per aiutare i decisori politici a conoscere l'ampio spettro di informazioni scientifiche a volte contraddittorie. A inserire materiali nel portale saranno gli stessi specialisti dei Centri di ricerca, pubblici e privati, ma anche del mondo industriale, non solo per far conoscere il loro lavoro, ma anche per generare reazioni da parte

dei decisori ed esplorare possibili impatti sociali.

Una delle sezioni del sito, early warning, si propone di evidenziare quelle potenziali situazioni di crisi che sembrano emergere da un insistito dibattito scientifico, e quindi costituire un campanello d'allarme per i decisori politici.

NUCLEARE DI TERZA GENERAZIONE PER FRANCIA E FINLANDIA

Dopo un periodo di stasi negli ordinativi di reattori nucleari a fissione in Europa, nuove commesse hanno rianimato il settore. A fine 2003 la finlandese TVO ha ordinato un reattore nucleare all'industria costruttrice Framatome ANP, azienda francese partecipata dalla tedesca Siemens. A fine 2004 anche l'Electricité de France ha ordinato un nuovo reattore, da 1525 MW, alla Framatome ANP. In entrambi i casi si tratta del nuovo reattore di terza generazione, denominato European Pressurized Water Reactor (EPR). Il reattore viene considerato un perfezionamento dei reattori tradizionali di seconda generazione e avrebbe una ciclo di vita di 60 anni. È ritenuto più sicuro ed economico dei reattori utilizzati finora perché caratterizzato da miglior sfruttamento del combustibile, semplificazione dei sistemi di sicurezza e minore produzione di scorie. Anche improbabili guasti con fusione del nucleo avrebbero ripercussioni limitate all'interno dell'impianto.

Attualmente 58 reattori nucleari producono oltre il 78% della produzione di energia elettrica della Francia, ma si prevede che nel 2020 la metà di essi, dopo 40 anni di esercizio, saranno sostituiti, completamente o in parte, con nuovi reattori. Nella fase intermedia gli ordinativi di reattori EPR consentiranno al paese di provare la tecnologia e

renderla accessibile già nel 2012-2015 per mantenere viva l'opzione nucleare.

LA FUTURA POLITICA SPAZIALE EUROPEA

La Commissione europea ha pubblicato una comunicazione in cui delinea gli aspetti della politica spaziale europea, di prossima attuazione.

Le priorità della politica riguardano due obiettivi: lo sfruttamento e l'esplorazione dello spazio. Le priorità dell'Unione saranno determinate dal potenziale offerto dallo spazio per contribuire alle sue politiche e attività, e si concentreranno pertanto sulle applicazioni.

In particolare, le priorità attuali dell'UE sono: Galileo (il suo sistema di navigazione satellitare), GMES (monitoraggio globale dell'ambiente e della sicurezza) e la ricerca a lungo termine sulle tecnologie di comunicazione satellitare nel contesto dell'iniziativa Società europea dell'informazione nel 2010.

L'ESA si occuperà principalmente dell'esplorazione dello spazio e degli strumenti di base da cui dipendono lo sfruttamento e l'esplorazione dello stesso: accesso allo spazio, conoscenza scientifica e tecnologie spaziali.

La politica spaziale europea sarà accompagnata da tre nuovi strumenti:

- una politica industriale specifica per il settore, che consenta all'Europa di garantire le fonti industriali e tecnologiche essenziali e le relative competenze;
- una politica in materia di cooperazione internazionale che risponda agli ampi obiettivi geopolitici delle politiche per le relazioni esterne dell'Unione;
- strumenti per investire in programmi e per garantire la loro gestione efficiente.

dall'**ITALIA****XX Spedizione Italiana
in Antartide****Pirelli International
Award2004****Giornata mondiale per
l'ambiente****XX SPEDIZIONE ITALIANA
IN ANTARTIDE**

Un milione di anni: a tanto ammonterà l'età del ghiaccio prelevato attraverso due carotaggi, dalla XX Spedizione italiana in Antartide, svoltasi dal 14 ottobre al 20 febbraio ed i cui risultati sono stati presentati il 21 aprile presso la sede del CNR. La spedizione, cui hanno partecipato circa 250 persone tra ricercatori e tecnici, e che è promossa dal Consorzio PNRA per l'attuazione del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide, di cui fanno parte ENEA, CNR, OGS e INGV, ha permesso di far pervenire un singolare reperto archeologico: il più antico ghiaccio mai visto dall'uomo.

Il reperto è venuto alla luce dalla

perforazione fino a 3000 m dalla calotta antartica portata a termine da EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica).

Ai ricercatori servirà per comprendere le variazioni climatiche del passato e prevedere quelle del futuro.

La perforazione è iniziata nel 1996 presso la Stazione italo-francese Concordia, nella località Dome C, e si è conclusa nel dicembre 2004. Le carote raccolte coprono circa 10-12 cicli glaciali e interglaciali, rispetto ai 4 contenuti (420.000 anni) in quella perforata presso la base russa di Vostok nel 1998.

L'ulteriore step previsto è raggiungere il ghiaccio di 1,5 milioni di anni.

Mentre alcuni ricercatori erano impegnati sui ghiacci, altri sulla nave oceanica Italica, conducevano studi di geologia biologica marina, fisica e chimica dell'atmosfera, ecologia marina.

L'attività sperimentale della campagna oceanografica è stata intensa e sono stati raggiunti alcuni risultati. Tre questi la raccolta di carotaggi marini nel Mare di Ross, che permettono di coprendere le fluttuazioni climatiche passate fino a 200.000 anni, e un carotaggio marino dell'Oceano meridionale di 4.500 m, che permette di risalire a un milione di anni fa, vale a dire ad 11 cicli glaciali. Inoltre, la continuazione delle misure di anidride carbonica in atmosfera nelle rotte della nave Italica ha permesso di calcolare dal 1994 ad oggi una crescita di CO₂ pari a 1,7 parti per milione all'anno anche in zone scarsamente popolate dell'emisfero australe.

**PIRELLI INTERNATIONAL
AWARD2004**

Si è svolta il 26 maggio a Roma la consegna dei premi della nona edizione del Pirelli International Award (www.Pirelliaaward.com), il primo concorso internazionale dedicato alla comunicazione scientifica e tecnologica gestito interamente su Internet. Dopo aver valutato più di mille candidature, pro-

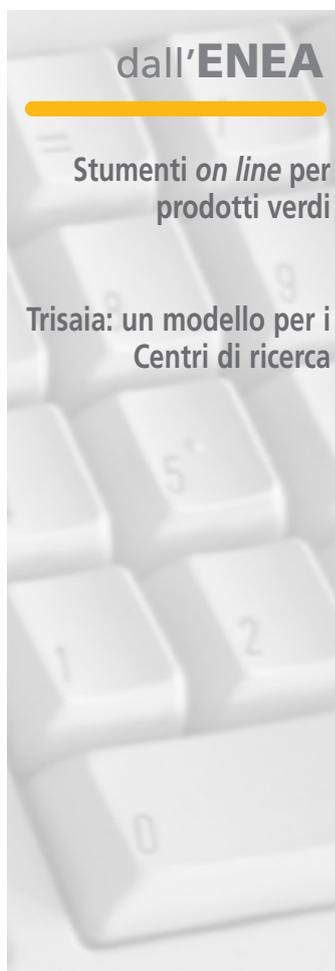
venienti da oltre 50 paesi del mondo, in particolare (circa il 70%) da università e istituti di formazione, la Giuria internazionale ha assegnato i premi, suddivisi nelle categorie Didattica Multimediale, Ambiente, Information and Communication Technologies (ICT) e Generazione Alice. Il top Pirelli Prize, del valore complessivo di 25.000 euro, è stato assegnato a Patrick J. Lynch, direttore del "MedMedia Group" della Scuola di Medicina dell'Università di Yale per il progetto "Introduction to Cardiothoracic Imaging".

Nel prossimo autunno si svolgerà la cerimonia di premiazione del Pirelli Relativity Challenge, il concorso dedicato ad Albert Einstein che il Gruppo Pirelli ha organizzato in occasione dell'anno internazionale della Fisica e che consiste nello spiegare la teoria della relatività attraverso la multimedialità e in soli cinque minuti.

**GIORNATA MONDIALE PER
L'AMBIENTE**

Il 5 giugno di ogni anno viene celebrata la Giornata mondiale dell'ambiente, indetta dalle Nazioni Unite. Quest'anno la celebrazione principale è avvenuta nella città di S. Francisco ed il tema è stato "Città verdi". Anche l'Unione Europea ha celebrato la ricorrenza attraverso la manifestazione "Giornate verdi urbane 2005", collocata nell'ambito della Settimana verde dell'UE. In Italia, oltre le manifestazioni che si sono svolte in diversi Comuni, anche l'Accademia Nazionale dei Lincei ha organizzato per il 6 giugno (essendo il 5 domenica) la XXIII giornata per l'ambiente con una conferenza didattico/scientifica dal titolo: "La qualità dell'aria nelle città italiane". La manifestazione dell'Accademia dei Lincei, diretta in particolare alle giovani generazioni, è stata riconosciuta come credito formativo.

cronache



dall'ENEA

Strumenti on line per
prodotti verdi

Trisaia: un modello per i
Centri di ricerca

STRUMENTI ON LINE PER PRODOTTI VERDI

Dare un aiuto alle piccole e medie imprese, nello sviluppo e nella commercializzazione di prodotti verdi (ecocompatibili e ideati nel pieno rispetto dell'ambiente), e alle Pubbliche Amministrazioni, nell'erogazione a servizio di supporto di questo processo.

È questo l'obiettivo del nuovo sito web, all'indirizzo www.ecosmes.net, accessibile dal novembre 2004 e dopo una prima fase sperimentale, presentato il 3 maggio a Bologna dall'ENEA e CNA (Conferazione nazionale dell'artigianato e della piccola e media impresa), in occasione del convegno nazionale "La via ambientale per l'innovazione del prodotto". Il progetto nasce all'interno del

programma europeo e Content ed è finanziato al 50% dall'UE e per l'altro 50% dai partner dell'iniziativa, per un totale di 4 milioni di euro.

Nel portale è possibile reperire informazioni sull'analisi del ciclo di vita dei prodotti, dal recupero e dalla provenienza dei materiali fino al trattamento e al commercio, al fine di fornire un quadro sulla valutazione di ecocompatibilità.

Nel sito compare anche un'area dedicata all'ecodesign e alle guide tecniche per orientare gli imprenditori verso interventi di innovazione tecnologica per tutte le filiere del prodotto.

Si tratta di informazioni dedicate non solo alle Pmi, ma anche a esperti di consulenza in materia che si articolano su diversi livelli di approfondimento, dalla conoscenza dei percorsi possibili all'attuazione degli interventi di ammodernamento in ambito di sostenibilità ambientale.

Tutte le informazioni sono finalizzate ad agevolare il processo di adeguamento delle imprese e delle Pubbliche Amministrazioni alle nuove direttive europee legate alle Politiche Integrate di Prodotto (IPP).

TRISAIA: UN MODELLO PER I CENTRI DI RICERCA

Al convegno "La certificazione ambientale e della sicurezza di organizzazioni complesse", che si è tenuto il 12 maggio a Roma nel corso del FORUM PA, è stato presentato il Progetto SIAMESI, un progetto che ha permesso al Centro Ricerche ENEA della Trisaia (Matera) di essere il primo Centro di ricerca pubblico ad avere ottenuto una doppia certificazione per l'Ambiente e per la Sicurezza, secondo le norme ISO 14001 e OHSAS 18001, grazie ad un innovativo sistema di gestione, tale sistema governa in modo integrato tutti gli aspetti ambientali e di

sicurezza connessi alle attività svolte, messo a punto per migliorare le prestazioni del Centro nel suo complesso. Alcuni dei principali obiettivi raggiunti riguardano: le procedure atte a far decollare gli appalti verdi, la riutilizzazione delle acque di scarico ai fini irrigui attraverso un impianto di fitodepurazione, l'ottimizzazione della gestione dei rifiuti, la razionalizzazione del consumo della carta.

Il modello di gestione integrata adottato è da considerare come un modello pilota trasferibile, con gli opportuni adattamenti del caso anche ad altre particolari realtà territoriali. Infatti, Il Centro Ricerche ENEA della Trisaia, per le sue caratteristiche di estensione e per l'ampia diversificazione delle attività che vi si svolgono, è una realtà fortemente complessa che può essere rapportata ad altre tipologie di aggregazioni territoriali altrettanto articolate e complesse, come quelle costituite da un insieme di comuni di un'area geografica omogenea per ambiente e cultura, o da un distretto industriale, o da una grande area metropolitana.

Per favorire l'adozione del modello di gestione integrata dell'ambiente e della sicurezza realizzato, l'ENEA è pronto a mettere a disposizione le proprie conoscenze tecnico-scientifiche, metodologiche e gestionali svolgendo così il proprio ruolo di sviluppo dell'innovazione e di trasferimento al sistema imprenditoriale del Paese e alla PA, a cominciare dalla sperimentazione al proprio interno di processi innovativi finalizzati all'efficienza, all'efficacia e alla sostenibilità ambientale di una cultura di management orientata ai principi dello sviluppo sostenibile anche in altre aree del Paese

INCONTRI

Festambiente 2005

Fuel Cells Forum
a Milano

HYPOTHESIS VI:
l'idrogeno nei PVS

Applicazioni innovative
per Galileo

FESTAMBIENTE 2005

Legambiente ripropone quest'anno, dal 5 al 15 agosto, l'appuntamento con il festival internazionale di ecologia.

Il festival, giunto alla XVII edizione ha luogo nel Parco naturale della Maremma presso il Centro per lo sviluppo sostenibile Il Girasole.

Accanto ai convegni ed agli appuntamenti di approfondimento sulle tematiche ambientali, nella grande area espositiva, stand di Ministeri, Parchi, Regioni, Province, Amministrazioni locali presentano progetti per la tutela del territorio, la promozione di prodotti tipici, le attività nel campo della conservazione dei beni culturali, le azioni innovative per la sostenibilità urbana.

Per informazioni:
www.festambiente.it

FUEL CELLS FORUM A MILANO

Si terrà a Milano, il 12 e il 13 luglio, la quarta edizione del Fuel Cells Forum. L'iniziativa è stata organizzata dalla Divisione Energy & Utilities dell'Istituto Internazionale di Ricerca e prevede la partecipazione, oltre a ENEA, H2IT, Regione Lombardia, Università Bocconi, Centro Ricerche Fiat, Zincar, Renco, anche di Hamburger Hochbahn, la società di trasporti di Amburgo, che illustrerà l'esperienza di questa città per il trasporto pubblico con bus a celle a combustibile nell'ambito del progetto europeo CUTE.

Fa parte del programma anche la visita al Laboratorio per l'Idrogeno della Bicocca, che consentirà di visitare gli impianti di produzione di idrogeno, il distributore e le auto a idrogeno.

HYPOTHESIS VI: L'IDROGENO NEI PVS

Per la prima volta al di fuori di un paese europeo, si è svolto a La Havana (Cuba), dall'8 al 12 maggio, la sesta edizione del simposio internazionale HYPOTHESIS "Hydrogen Power Theoretical and Engineering Solutions". Le diverse sessioni parallele prevedevano come argomenti principali i progetti e le visioni nazionali e regionali, su sistemi di produzione da combustibili fossili e rinnovabili e su fuel cell e sistemi ausiliari. Numerosa la presenza di ricercatori italiani di varie Università, dell'ENEA e del CNR.

Il confronto è servito ad evidenziare le differenze di problemi e soluzioni tra paesi sviluppati ed in via di sviluppo: fa riflettere, infatti, l'apparente facilità con cui un sistema inefficiente e con bassi livelli di consumi e di tecnologie, come quello cubano, possa raggiungere,

con innovazioni limitate e di medio livello, una propria sostenibilità energetica.

In tale contesto sembrano interessanti le opportunità che potrebbe avere l'industria italiana nella collaborazione con tali paesi.

APPLICAZIONI INNOVATIVE PER GALILEO

Piccole imprese, imprenditori e ricercatori potranno ricevere 50.000 euro quale sostegno allo sviluppo imprenditoriale per la migliore idea nelle applicazioni per Galileo, il sistema europeo di navigazione satellitare.

Il concorso Galileo Masters 2005, iniziato il 1° maggio (con termine il 30 giugno). È volto a favorire nelle piccole imprese di tutta Europa la progettazione di nuovi prodotti per Galileo o per gli attuali standard GPS, GLONASS e EGNOS, ciascuno dei quali verrà notevolmente potenziato dal sistema europeo di navigazione.

Quest'anno, il concorso si terrà in sette regioni europee attive nel settore dell'alta tecnologia: Londra (Regno Unito), Göteborg (Svezia), Nizza-Sophia Antipolis (Francia), Repubblica Ceca, Varese (Italia), Olanda meridionale (Paesi Bassi) e Monaco (Germania). Esperti di ciascuna regione selezioneranno l'idea migliore nella zona di competenza, e tra i vari candidati verrà scelto un vincitore assoluto.

A tutti i vincitori verrà offerto gratuitamente uno spazio espositivo al Systems, salone internazionale delle tecnologie dell'informazione e delle telecomunicazioni, che si terrà a Monaco il prossimo ottobre, mentre il primo classificato potrà utilizzare per sei mesi un ufficio all'interno di un incubatore d'impresa nella regione di appartenenza, nonché consulenza e supporto commerciale. Oltre a quanto detto, verranno conferiti premi per un valore di circa 50.000 euro. Questo concorso è importante poiché produce utilizzi innovativi per i nostri sistemi di navigazione e, in seguito, produrrà reddito per la tecnologia spaziale.

LETTURE**State of the World
2005****Linee guida per la
definizione di un
Piano Strategico per
lo sviluppo del
vettore energetico
idrogeno****I costi della non
scienza**

le militari, che hanno modalità del tutto inadeguate a risolvere, in particolare, le cause di un problema che ha molteplici volti.

La situazione è efficacemente sintetizzata da Mikhail Gorbachev "Cinque anni fa tutti i 191 Stati membri dell' ONU si impegnarono a raggiungere entro il 2015 gli otto Obiettivi di Sviluppo del Millennio. Alla fine del 2004, però, ci si è dovuti rassegnare ad ammettere che "a livello mondiale i progressi socio-economici, la sicurezza e la sostenibilità non rispecchiano la realtà oggettiva di molte regioni del pianeta".

State of the World 2005 ricompone il significato del termine "sicurezza", evidenziando i grandi fenomeni che sono alla base dell'instabilità globale: dalla diffusione incontrollata delle armi leggere alla dipendenza dell'economia dal petrolio, dalle dinamiche demografiche alle risorgenti malattie infettive fino ai contrasti sulle risorse, dal cibo all'acqua.

Il dato che emerge è soprattutto la necessità imprescindibile del coinvolgimento della società civile nella realizzazione di un'idea condivisa di sicurezza.

molte delle informazioni disponibili. Vengono infatti identificate le principali tematiche che compongono lo scenario dell'uso dell'idrogeno come vettore energetico: caratteristiche, produzione, stoccaggio, distribuzione, utilizzo, sicurezza e normativa; ed inoltre produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, segregazione dell'anidride carbonica. E per ciascuna tematica sono redatte una serie di schede nelle quali sono raccolte le informazioni non riservate. Il risultato è un quadro sullo stato dell'arte di una filiera, nella maggior parte dei casi ancora in fase di sviluppo pre-industriale, nel quale si evidenzia quanto il Sistema Paese Italia è in grado di offrire, anche nel confronto internazionale.

I COSTI DELLA NON SCIENZA

A cura di
Franco Battaglia e Angela Rosati
21^{mo} SECOLO, 2004, pagine 206,
euro 15,00

Il volume raccoglie le relazioni presentate al convegno nazionale "Il Principio di precauzione", tenuto a Roma nel febbraio 2004, dall'Associazione Galileo 2001.

Il libro, come scrive Enrico Bellone nella Presentazione, non è solo la radiografia di un paese malato ma anche un breviario ragionato di terapie possibili. Il volume, oltre le relazioni generali di Franco Battaglia, Carlo Bernardini e Tullio Regge, contiene trattazioni dettagliate su specifici esempi. Francesco Sala denuncia la limitazione dell'uso dell'ingegneria genetica in agricoltura, mentre Paolo Sequi, scrive sulle distorsioni dell'applicazione del principio di precauzione alla prevenzione dell'inquinamento dei suoli. Del paradosso rifiuti ci rende partecipe Luciano Caglioti, e l'ultima relazione, di Cesare Marchetti, ci parla di economia a idrogeno, quell'idrogeno nuovo sex symbol energetico. C'è e n'è quanto basta per riflettere, ammonisce Giorgio Salvini nel suo intervento.

STATE OF THE WORLD 2005

Sicurezza Globale
Worldwatch Institute
Edizione italiana a cura di
Gianfranco Bologna
2005, pagine 304, euro 20,00

Le analisi dei ricercatori del Worldwatch si articolano quest'anno attorno al tema della sicurezza, che si è imposto come principale problema nell'agenda mondiale.

Emerge un allarmante cambio di rotta nei significati, dove il concetto stesso di "sicurezza" appare omologato all'interno del concetto di "guerra al terrorismo", mentre appare evidente che proprio questa è tra le cause scatenanti della crescente instabilità globale. Il pericolo è che a gestire i problemi della sicurezza siano chiamate sempre di più strutture, come quel-

**LINEE GUIDA PER LA
DEFINIZIONE DI UN PIANO
STRATEGICO PER LO
SVILUPPO DEL VETTORE
ENERGETICO IDROGENO**

A cura di Marco Carcassi
Edizioni Plus - Università di Pisa,
aprile 2004, pagine 216, euro
30,00

La pubblicazione è il frutto di numerosi dibattiti avvenuti fra i Soci del Forum Italiano dell'Idrogeno, negli ultimi tre anni, con il fine di creare un "Sistema Idrogeno" in Italia. Si prefigge, perciò, di definire le linee guida che possano essere di riferimento nello sviluppo di un Piano Strategico di supporto all'introduzione dell'idrogeno come vettore energetico del prossimo futuro.

Il volume raccoglie e riorganizza