

(\*) Il nucleo iniziale di questo lavoro è frutto di uno stage trimestrale compiuto da Riccardo Scotton presso la SMI, a completamento di un Master in divulgazione della scienza organizzato da «Il Rasoio di Occam», Torino, nell'anno 2002. Ringraziamo inoltre Claudio Cassardo e Pietro Salizzoni per la lettura critica del testo.

# Introduzione ai modelli numerici di previsione meteorologica (NWP)

**Riccardo Scotton, Luca Mercalli, Claudio Castellano, Daniele Cat Berro**  
Società Meteorologica Italiana (\*)

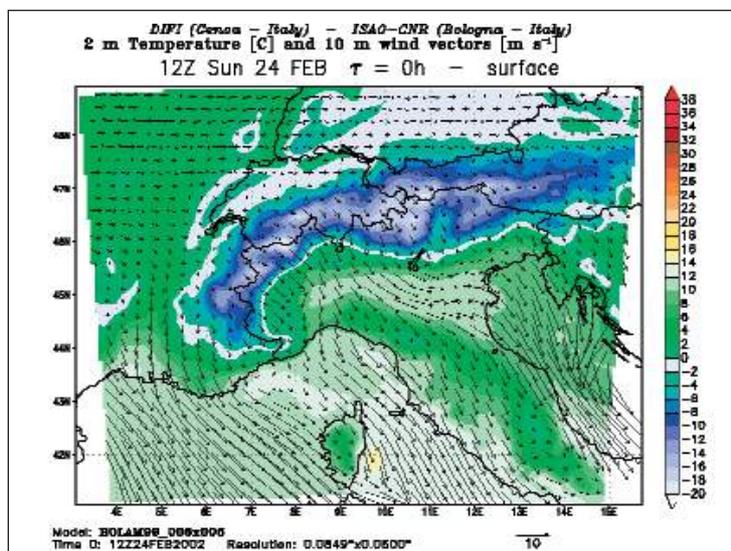
La previsione meteorologica numerica (NWP *Numerical Weather Prediction*) costituisce uno degli aspetti più affascinanti e complessi della fisica dell'atmosfera. Oggi si può affermare che l'obiettivo di conoscere in anticipo l'evoluzione del tempo con un ragionevole grado di affidabilità è stato finalmente raggiunto, grazie soprattutto allo sviluppo degli elaboratori elettronici. La rete Internet mette attualmente a disposizione i risultati dei modelli di previsione ad un pubblico sempre più vasto che varia dagli scienziati ricercatori agli amatori. D'altro canto bisogna sottolineare che la diffusione dei dati meteo attraverso i modelli, pur rappresentando un elemento di progresso scientifico, purtroppo spesso banalizza e inflaziona l'informazione, che se non opportunamente filtrata attraverso un minimo di preparazione teorica, può indurre molti all'errore di interpretazione e alla confusione. Inoltre, specialmente per i non addetti ai lavori, l'affidabilità delle previsioni e la competenza dei responsabili dei

siti internet non sono deducibili dall'apparenza del sito stesso; infatti la veste grafica molto curata talvolta può nascondere enormi carenze di rigore scientifico al suo interno. Ecco perché la redazione di Nimbus ha sentito la necessità di approfondire questo tema, sia per venire in

ze belliche. Durante la guerra di Crimea una tempesta provocò la distruzione del vascello Henri IV e di 38 navi mercantili causando 400 morti, per cui Napoleone III diede incarico all'astronomo Urbain Le Verrier (1811-1877) di verificare la possibilità di prevenire simili catastrofi naturali. Lo scienziato chiese ad astronomi e meteorologi in tutta Europa di inviargli le loro osservazioni in giorni fissi, 12, 13, 14, 15 novembre 1854, ricevendo ben 250 risposte dettagliate. Analizzando i dati dei suoi colleghi, Le Verrier notò che la tempesta era in atto da diversi giorni e che dall'osservazione cronologica delle cartine si poteva riuscire a prevedere lo spostamento della perturbazione; risultò evidente come una rete organizzata di stazioni meteorologiche potesse servire allo scopo previsionale, e questo fu l'inizio dell'era sinottica sviluppatasi tra la fine del 1800 e

«Il tempo è un sistema caotico, e la sua previsione numerica è un obiettivo di grande difficoltà» ROBERTO. BUIZZA, 2002 (ECMWF).

1. Un'uscita del modello BOLAM riferita ai campi di vento e di temperatura a 10 m dal suolo: è un esempio dei risultati attuali di un lungo cammino iniziato quasi un secolo fa da un piccolo gruppo di uomini di intelligenza fuori dal comune, e sviluppatosi via via con l'apporto di centinaia di altri ricercatori e della crescita delle tecnologie informatiche.



2. Andrea Buzzi, ideatore del modello BOLAM, fotografato nel suo ufficio del CNR- ISAC a Bologna. [www.isac.cnr.it](http://www.isac.cnr.it)



3. Claudio Cassardo, oltre che appassionato meteorologo, è docente di fisica al Dipartimento di Fisica Generale dell'Università di Torino. [www.ph.unito.it/dfg](http://www.ph.unito.it/dfg)



aiuto nella formazione di un approccio più consapevole verso l'impiego dei risultati dei modelli, sia per restituire a quanti nel passato e nel presente hanno lavorato e lavorano, in questo affascinante e complesso campo della scienza (restando, il più delle volte, nell'ombra), un doveroso riconoscimento. Ci siamo avvaluti della collaborazione del prof. Claudio Cassardo dell'Università di Torino e del dott. Andrea Buzzi di Bologna, dirigente di ricerca presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (Fig.2-3). Gran parte dei contenuti di questo articolo sono stati ricavati da interviste ai due studiosi che ringraziamo per la collaborazione fornitaci.

## Le origini della previsione meteorologica

Come per tanti altri campi della scienza, le ragioni iniziali dell'indagine meteorologica a scopo previsionale derivano da esigen-

l'inizio del 1900. Quegli anni erano caratterizzati dai viaggi di esplorazione in terre lontane, dallo sviluppo dei commerci, dall'espansione delle terre coltivate causa l'aumento della richiesta di cibo delle città. Per soddisfare le nuove esigenze della popolazione in crescita, le scienze fisiche subirono un forte impulso; nuove scoperte si succedevano e il conseguente sviluppo tecnologico metteva a disposizione macchine e strumenti sempre più sofisticati. Un ottimismo crescente e la fiducia assoluta nel progresso della scienza generò nel pubblico l'illusione positivista che l'intero universo fosse governato da leggi semplici che stavano per essere comprese fino nei minimi dettagli e che il pianeta Terra potesse essere trasformato dall'uomo a suo piacimento. Nel 1904 il meteorologo norvegese **Vilhelm Bjerknes** (1862-1951, vedi riquadri) teorizzò per

## I pionieri dei modelli meteorologici



### Vilhelm Friman Koren Bjerknes (Oslo, 14.03.1862 - 09.04.1951)

Fisico e meteorologo norvegese, tra i fondatori della moderna scienza meteorologica. Figlio di Carl Bjerknes, professore di matematica all'Università di Oslo (a quel tempo *Kristiania*) particolarmente impegnato in studi sull'idrodinamica, iniziò le sue esperienze scientifiche proprio aiutando il padre nella ricerca. Terminati gli studi universitari in matematica e fisica a Oslo nel 1888, e slegatosi dalla collaborazione con il padre, iniziò un viaggio in Europa, che dapprima lo portò a Parigi, e successivamente a Bonn, dove rimase due anni quale collaboratore di Hertz nelle sue ricerche sulla risonanza elettrica (di grande importanza per lo sviluppo della radio). Tornato in Norvegia per completare la tesi di dottorato, nel 1893 divenne professore di meccanica applicata e fisica matematica all'Università di Stoccolma. Intanto proseguì le ricerche applicando le teorie dei vortici di Helmholtz e Thomson alla circolazione atmosferica ed oceanica, e intuì che, una volta determinato lo stato iniziale dell'atmosfera, sarebbe stato possibile prevederne il comportamento futuro utilizzando le leggi della fluidodinamica e della termodinamica: nel 1904 pubblicò i risultati degli studi nel lavoro «*Weather forecasting as a problem in mechanics and physics*» in *Meteorologische Zeitschrift*. Divenuto professore all'Università di Oslo nel 1907, riuscì lì a fondare una scuola per lo studio della meteorologia dinamica. Nel 1912 acquisì la cattedra di geofisica all'Università di Leipzig (Germania) e la direzione del locale Istituto di Geofisica, e lì lo seguì gran parte del *team* di ricerca che intorno a lui si era costituito a Oslo; con il figlio Jacob, anch'esso valente studioso in meteorologia, stabilì una rete di stazioni meteorologiche in Norvegia, base per la definizione della *teoria dei fronti*. Nel 1917 si trasferì all'Università di Bergen: a questo periodo risalgono i primi tentativi di utilizzo delle equazioni matematiche e dei dati meteorologici rilevati per la previsione del tempo, tuttavia la grande complessità delle formule impedì la rapida soluzione dei problemi richiesti dall'utilizzo pratico della previsione. Gran parte dei principali risultati di questo periodo di studi sono contenuti in *On the Dynamics of the Circular Vortex with Applications to the Atmosphere and to Atmospheric Vortex and Wave Motion* (1921). Nel 1926 riprese l'insegnamento all'Università di Oslo, dove rimase fino al 1935, anno di conclusione della sua attività scientifica e didattica.



### Lewis Fry Richardson (11.10.1881, Newcastle upon Tyne, England - 30.09.1953, Kilmun, Scotland)

A questo scienziato si deve il successivo e più importante approccio matematico alla previsione meteorologica. Sviluppò la sua formazione scientifica presso il *Durham College of Science* di Newcastle, e successivamente presso il *King's college* di Cambridge, dove si laureò brillantemente in Scienze Naturali nel 1903. I suoi impieghi nella ricerca e nella didattica negli anni seguenti furono molteplici, soprattutto in qualità di fisico e chimico. Dal 1913 al 1916 operò presso il *Meteorological Office*. Tra il 1916 e il 1923 tentò di risolvere il problema della previsione del tempo tramite il calcolo numerico: l'esperimento fallì, anche perché in assenza di calcolatori elettronici non era possibile risolvere in tempo utile l'enorme quantità di calcoli richiesta per la previsione. Pubblicò i suoi lavori in *Weather Prediction by Numerical Process*, partendo dalle informazioni che Bjerknes aveva raccolto in *Dynamical meteorology and hydrography*. I suoi studi vennero in parte condotti in Francia durante le pause di servizio come autista di ambulanze nel corso della prima guerra mondiale. Richardson immaginava una sorta di «officina» per la previsione meteo, costituita da migliaia di matematici (64.000 per la precisione) impegnati simultaneamente nella risoluzione dei calcoli, per acquisire la velocità necessaria alla produzione di una previsione applicabile in tempo utile. Ma questo era un sogno che soltanto i primi calcolatori elettronici avrebbero risolto, circa 30 anni più tardi.



### Jule Gregory Charney (San Francisco, California, 01.01.1917 - Boston, Massachusetts, 16.06.1981)

Con questa brillante figura la meteorologia approda finalmente al primo successo operativo nella previsione numerica. Frequentò la University of California di Los Angeles (UCLA), dove studiò matematica, individuando il suo filone di ricerca nello studio della dinamica atmosferica ed oceanica. Dal 1942 al 1946 fu insegnante di fisica e meteorologia all'UCLA, e proprio nel 1946 discusse una tesi di dottorato dal titolo «*Dynamics of long waves in a baroclinic westerly current*»; il lavoro venne pubblicato sul *Journal of Meteorology*, occupando quasi per intero il numero dell'ottobre 1947. Questo studio accentuava il ruolo delle «onde lunghe» dell'alta atmosfera nel determinare il comportamento degli strati sottostanti, rispetto all'influenza del fronte polare. Durante un anno di permanenza presso l'Università di Oslo (1947-48), a seguito degli stimoli ricevuti dall'incontro con **Carl-Gustav Rossby** a Chicago, proseguì le ricerche sviluppando una serie semplificata di equazioni per modellizzare il movimento delle onde atmosferiche a scala planetaria, nota come «*approssimazione quasi-geostrofica*». Dal 1948 al 1956 fu membro dell'Institute for Advanced Study di Princeton, New Jersey: in questo periodo mise a frutto le sue ricerche grazie alla stretta collaborazione con il norvegese **Ragnar Fjørtoft** e con il celebre matematico di origine ungherese **John von Neumann**, a quel tempo incaricato di sviluppare un progetto di calcolatore elettronico, e oggi considerato il padre della moderna informatica. Fu questo il *team* di scienziati che nel 1950 realizzò con successo la prima previsione numerica del tempo, effettuando i calcoli sul calcolatore a valvole ENIAC (*Electronical Numerical Integrator and Computer*), di proprietà dell'esercito e installato ad Aberdeen (Maryland, USA), lo stesso che venne impiegato per lo sviluppo del *progetto Manhattan* sulla bomba atomica. I risultati ottenuti - tramite un modello barotropico - per la previsione di altezza del geopotenziale a 500 hPa furono incoraggianti, e questo esperimento di portata storica aprì definitivamente l'era della previsione meteorologica su base matematica. Nel 1954 lo stesso Charney contribuì all'istituzione di un'unità di previsione presso l'Ufficio Meteorologico degli Stati Uniti. Dal 1956 al 1981 fu professore al Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston. Moltissimi furono i progetti di ricerca cui prese parte in questo periodo: segnaliamo il GARP (*Global Atmospheric Research Program*), un esperimento internazionale indetto per migliorare la modellizzazione e la previsione del comportamento atmosferico. Nel 1990 l'*American Meteorological Society* ha pubblicato la ristampa in un volume dei più importanti lavori di Charney. I suoi manoscritti sono conservati presso gli archivi del MIT.



**Carl Gustav Arvid Rossby (Stoccolma, Svezia, 28.12.1898-19.08.1957)**

Iniziò ad occuparsi di meteorologia, e in particolare di oceanografia aderendo alla «scuola» di Bjerknes nel 1918. Dopo aver seguito lo scienziato norvegese all'Università di Leipzig nel 1921, l'anno successivo tornò in Svezia, dove entrò allo Swedish Meteorological Hydrologic Service. Per tre anni, fino al 1925, partecipò in qualità di meteorologo a spedizioni oceanografiche alle isole Jan Mayen e intorno a quelle britanniche, in Portogallo e Madeira. Nel 1926 si trasferì negli USA, proseguendo la ricerca presso l'unico istituto di meteorologia allora esistente, il *Government Weather Bureau* a Washington D.C. In questo periodo elaborò numerosi e significativi lavori sulla turbolenza atmosferica e sulla dinamica della stratosfera. Dal 1928 al 1939 fu professore al MIT, dove si occupò di termodinamica delle masse d'aria e di turbolenza atmosferica ed oceanica. Concentrò le sue attenzioni in particolare sulla circolazione generale dell'atmosfera, a cui cominciò ad applicare i concetti di *vorticità* e *momento*, oggi fondamentali nello sviluppo di questo settore. Nel 1940 divenne direttore del Dipartimento di Meteorologia dell'Università di Chicago. In questo periodo elaborò le teorie sulle *onde lunghe atmosferiche*, per le quali in primo luogo è ricordato, dette «Onde di Rossby». Il suo ruolo fu determinante anche nello sviluppo delle equazioni per la previsione numerica del tempo, e la sua influenza fu importante nella formazione scientifica di Charney. Dal 1947 tornò frequentemente a Stoccolma, e divenne direttore del locale Istituto di Meteorologia, applicandosi allo sviluppo di sistemi di previsione numerica per l'Europa. Fu inoltre fondatore della rivista di geofisica *Tellus*.



**John von Neumann (Budapest, Ungheria, 28.12.1903 - 08.02.1957, Washington D.C., USA)**

Fin dall'infanzia dimostrò una straordinaria intelligenza e memoria, e propensione per le discipline matematiche (a sei anni eseguiva a mente divisioni a otto cifre). Nel 1921 terminò gli studi al *Ginnasio Luterano* di Budapest e nel 1926 conseguì sia il diploma in ingegneria chimica alla *Technische Hochschule* di Zurigo, sia il dottorato in matematica all'Università di Budapest. All'epoca il suo genio era già noto tra gli esponenti nella comunità matematica mondiale. Nel 1930 si trasferì a Princeton, dove divenne professore l'anno successivo, e nel 1933 entrò a far parte del primo gruppo di sei matematici presso il neonato *Institute for Advanced Studies*, che aveva sede proprio in Princeton. Le sue ricerche ebbero un grande ruolo nello sviluppo della meccanica quantistica. In qualità di consulente delle forze armate statunitensi lavorò al *Progetto Manhattan* per la costruzione della prima bomba atomica, e dopo la seconda guerra mondiale si concentrò sullo sviluppo del calcolo automatico, al punto da essere oggi riconosciuto come padre del moderno computer. Riconobbe che il problema meteorologico fosse il più adatto da sottoporre al calcolatore, e per questo organizzò il *team* di ricercatori che elaborò la prima previsione numerica del tempo. Nel 1956 fu insignito dell'*Enrico Fermi Award*, ma in seguito il cancro lo sottrasse rapidamente alla vita.



**Edward Norton Lorenz (West Hartford, Connecticut, USA, 23.05.1917 - vivente)**

Il suo nome è indissolubilmente legato all'elaborazione della teoria del caos. È professore emerito al *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) di Boston. Da ragazzo era stato un «maniacco» del tempo, almeno tanto da tenere precise tabelle delle temperature massime e minime registrate tutti i giorni davanti alla casa dei suoi genitori a West Hartford nel Connecticut. Trascorrevano però più tempo dentro casa a giocare con libri di enigmi matematici che non fuori a osservare il termometro (GLEIK J., 1987). Si diplomò al *Dartmouth College* nel 1938, pensando che la matematica fosse la sua vocazione, ma durante la seconda guerra mondiale fu assegnato al servizio di previsione meteorologica dell'aviazione. Dopo la guerra decise di restare nel campo della meteorologia applicandovi le sue conoscenze matematiche. Nel 1948 entrò infatti al MIT, dove ricoprì incarichi di docenza e ricerca per decenni, fino al 1981, quando fu nominato professore emerito. Il suo lavoro fondamentale riguardante il caos fu pubblicato nel 1963 sul *Journal of Atmospheric Sciences* con il titolo *Deterministic nonperiodic flow*.

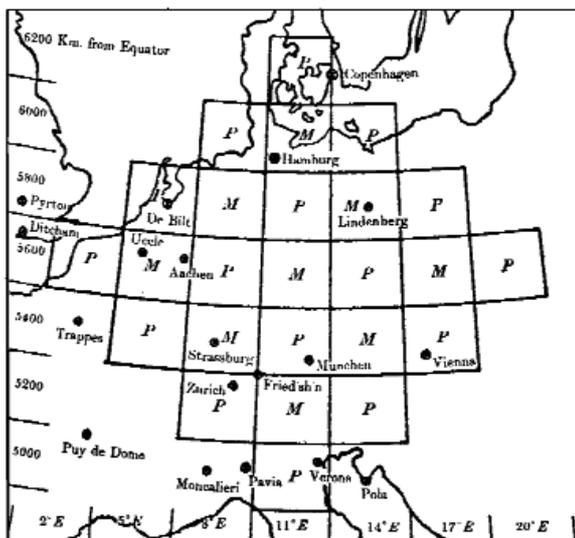


**Akio Arakawa**

Laureatosi in fisica all'Università di Tokyo nel 1950. A partire dal 1961 inizia a frequentare il Dipartimento di Meteorologia dell'Università della California a Los Angeles (UCLA), dove lavora con un grande modellista numerico, **Yale Minz** (1916-1991), che a sua volta aveva discusso la tesi nientemeno che con Jacob Bjerknes, fondatore dello stesso dipartimento. Il suo contributo principale è legato all'elaborazione di complessi schemi matematici per la soppressione delle instabilità numeriche nei modelli.



**Fedor Mesinger** è uno dei massimi esperti mondiali nel campo della modellistica numerica dell'atmosfera. Laureatosi in meteorologia nel 1960 all'Università di Belgrado, concepì nel 1973 il modello numerico noto come HIBU (Hydrometeorological Institute and Belgrade University). Insieme ad Arakawa scrisse, nel 1976 per la WMO, la monografia *Numerical methods used in atmospheric models*, ancora oggi un classico sull'argomento. Ha diagnosticato il motivo di generazione di disturbi nei modelli alle differenze finite, sviluppando metodi alternativi, introducendo la coordinata verticale *eta* e sviluppando il modello ETA oggi operativo in vari servizi di previsione nel mondo. Ha condotto la sua attività scientifica, oltre che all'Università di Belgrado, anche negli USA (NCAR, UCLA, Princeton), in Francia e in Italia, presso l'*Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics* di Trieste.



4. (in alto) La griglia utilizzata da Richardson nel 1922 per il primo esperimento manuale di previsione meteorologica numerica. Le celle hanno un lato di circa 250 km; sono indicate le stazioni meteorologiche utilizzate per inizializzare il modello, tra cui compare anche Moncalieri, l'Osservatorio centrale della Società Meteorologica Italiana.

5. (qui sopra) La sede del CNR di Bologna dove è ubicato l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima.

primo che la previsione del tempo era fondamentalmente un problema deterministico ai valori iniziali, ossia note le equazioni della fisica che spiegano il comportamento del fluido atmosferico insieme ai dati osservativi al tempo iniziale  $t=0$ , l'evoluzione dei fenomeni in ogni istante successivo poteva essere predetta con la precisione che si voleva. Prevedere lo stato del tempo sarebbe stata solo una questione di reperimento dei dati sperimentali e di tempo di calcolo, così come la previsione delle orbite planetarie aveva rappresentato l'esempio più eclatante di applicazione delle leggi del moto. Questa visione semplicistica della meteorologia è oggi ampiamente superata, come discuteremo più avanti, tuttavia le idee di Bjerknes costituiscono il primo fondamentale passo verso la previsione del tempo su basi numeriche e non solo con l'aiuto dell'osservazione. La sfida alla risoluzione delle complesse equazioni che regolano lo stato dell'atmosfera fu raccolta tra il 1916 e il 1923 dall'inglese **Lewis Fry Richardson** (vedi riquadro), il quale fu il primo a tentare di applicare i metodi del calcolo numerico all'analisi di un caso di studio su una porzione limitata d'Europa, in cui era stata organizzata una fitta (per l'epoca) rete di osservazioni utilizzando tra l'altro allo scopo anche i pri-

mi palloni sonda. Egli impiegò oltre un anno per eseguire a mano tutti i calcoli necessari a prevedere l'evoluzione di alcune variabili riferite ad un solo giorno! I risultati di Richardson furono tuttavia clamorosamente sbagliati, e a posteriori oggi possiamo dire che ciò avvenne non solo per l'incompletezza dei dati iniziali a disposizione dello scienziato, ma soprattutto a causa del metodo utilizzato che racchiudeva in sé un errore subdolo che portava all'instabilità numerica e che fu possibile correggere solo diversi anni dopo (si veda il box matematico). Richardson sbagliò i calcoli, ma ebbe il merito di aprire la strada ad un approccio diverso al problema, fondato sull'impiego di tecniche di calcolo approssimato eseguito in successione. Infatti dai suoi studi emerse chiaramente l'esigenza di sviluppare una capacità di elaborazione assai più elevata per soddisfare l'ambizioso progetto della risoluzione in tempo utile delle equazioni matematiche. Ed infatti il metodo rimase nel dimenticatoio fino a che non furono inventati i primi elaboratori elettronici.

Si dovette attendere fino al 1950 perché negli Stati Uniti **Jule Gregory Charney** (1917-1981), **Ragnar Fjortoft** e **John Von Neumann** (1903-1957) realizzassero la prima previsione numerica del tempo, utilizzando il calcolatore elettronico ENIAC, costruito pochi anni prima presso l'università di Pennsylvania, dietro impulso del piano di sviluppo belli-

co nucleare. A partire da quel periodo le potenzialità dei nuovi strumenti di calcolo aumentarono di pari passo con la complessità dei programmi, al punto che oggi la previsione atmosferica rappresenta uno dei campi di prova più severi per i nuovi elaboratori.

Senza lo sviluppo dell'informatica e dei microprocessori oggi sarebbe impossibile ottenere non solo delle previsioni meteorologiche affidabili, ma anche effettuare delle indagini approfondite in tutti quei settori in cui sono coinvolti sistemi complessi formati da una moltitudine di variabili (dalla fluidodinamica alla biologia molecolare).

#### Definizione di modello e delle principali equazioni costituenti (equazioni primitive)

In generale un modello è una rappresentazione schematica e semplificata della realtà fisica, descritta attraverso un insieme di equazioni che simulano il comportamento della natura. Un programma al calcolatore utilizza dei dati di ingresso (*input*), esegue una *corsa* (run) elaborando degli algoritmi complessi costituiti dall'insieme di equazioni più le regole di calcolo per le soluzioni ed esprime il risultato sotto forma di un nuovo insieme di numeri, o *output* (uscita).

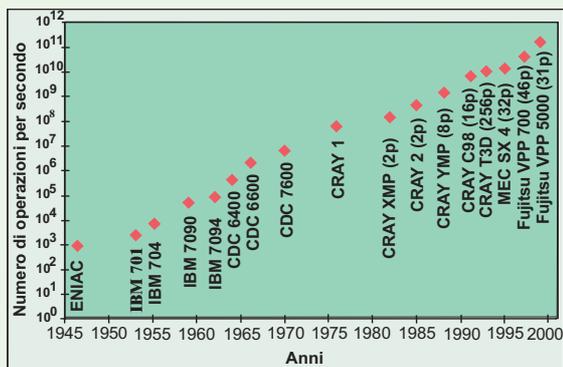
Nel caso della previsione atmosferica gli algoritmi sono costituiti dall'insieme di **equazioni differenziali alle derivate parziali** che descrivono la dinamica



6. Uno dei metodi di rappresentazione dell'atmosfera da parte dei modelli numerici consiste nella suddivisione in un grigliato che identifica volumi d'aria dove per semplificare i calcoli le caratteristiche fisiche vengono ritenute omogenee. Questa immagine, ripresa il 21.06.2003 in bassa Val di Susa (TO), dove varie scie di condensazione d'aereo si intersecano ad angolo retto, traccia nel cielo un grigliato realistico di alcune decine di km di lato. Le intersezioni delle linee sono dette «nodi» ed è in corrispondenza di questi che vengono eseguiti i calcoli (f. L. Mercalli).

## I supercomputer: uno strumento indispensabile alla previsione meteorologica

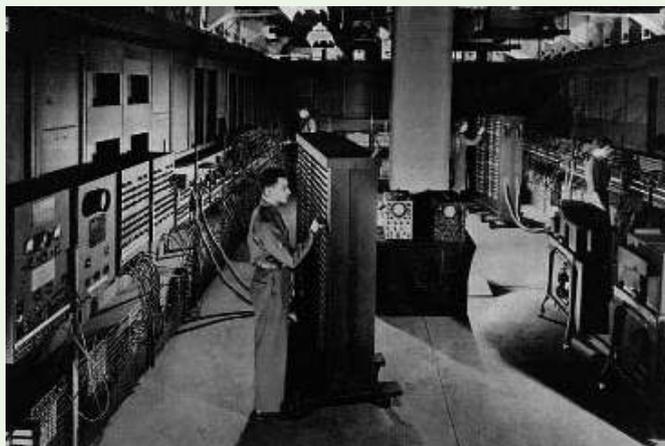
Lo sviluppo della previsione numerica del tempo è indissolubilmente legato a quello dei computer. Il 5 marzo 1950 l'équipe di Charney fece girare il primo modello di previsione sul computer ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Calculator*), utilizzato per il calcolo delle traiettorie balistiche nei laboratori militari di Aberdeen, Maryland. Si trattava di un vero e proprio «mostro» composto da 18.000 valvole termoioniche e 1500 relais per un totale di 30 tonnellate di materiale su 180 m<sup>2</sup>. Consumava moltissima energia e per funzionare aveva bisogno di 140 kW di potenza. Era in grado di effettuare circa 1000 operazioni al secondo, e veniva alimentato tramite schede perforate. Charney e i suoi collaboratori impiegarono 33 giorni e 33 notti per programmare l'ENIAC ed eseguire la prima previsione. Nel 1958 con l'IBM 7070, primo calcolatore a *transistor*, si apriva una nuova generazione di macchine, che in seguito ebbe un'ulteriore svolta con l'introduzione dei circuiti integrati super miniaturizzati e i supercomputer massivamente paralleli. Nel



7. Tra i motivi principali del progresso della previsione numerica vi è certamente l'aumento della potenza di calcolo dei computer. Il grafico mostra l'aumento del numero di operazioni al secondo nel corso degli anni. I numeri tra parentesi sono i processori utilizzati simultaneamente (per elaboratori paralleli).



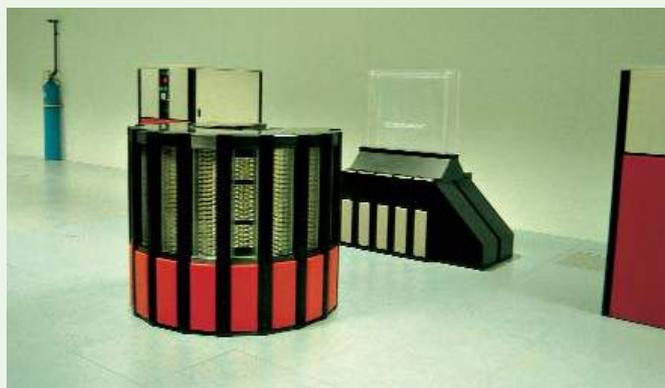
9. (a sinistra) 4 aprile 1950, l'équipe di ricercatori che ha realizzato la prima previsione numerica del tempo posa davanti al supercomputer ENIAC; da sinistra, H.Wexler, J. von Neumann, M. H. Frankel, J. Namias, J. C. Freeman, R. Fjortoft, F. W. Reichelderfer e J.G. Charney.



10. (a destra) Una veduta dell'ENIAC, operativo dal 1946 al 1955 presso i Ballistic Research Laboratories di Aberdeen, Maryland (USA).



11. (a sinistra) Il supercomputer Fujitsu VPP 5000 installato nel 1999 alla sede di Météo France a Toulouse, come appariva nel 2001. Ha una potenza di 250 miliardi di operazioni al secondo (250 Gigaflop).

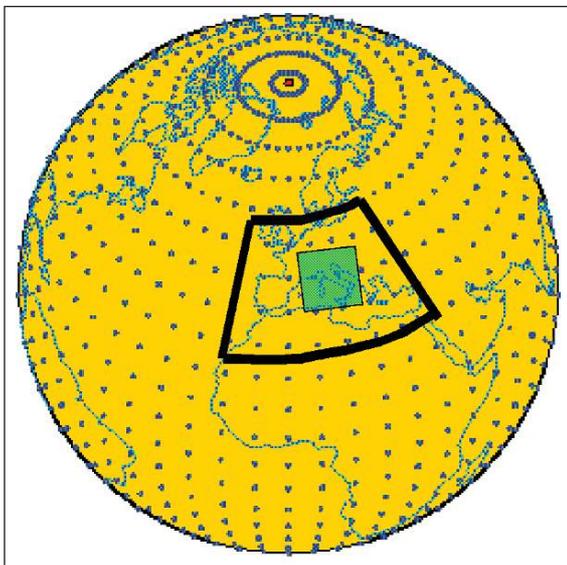
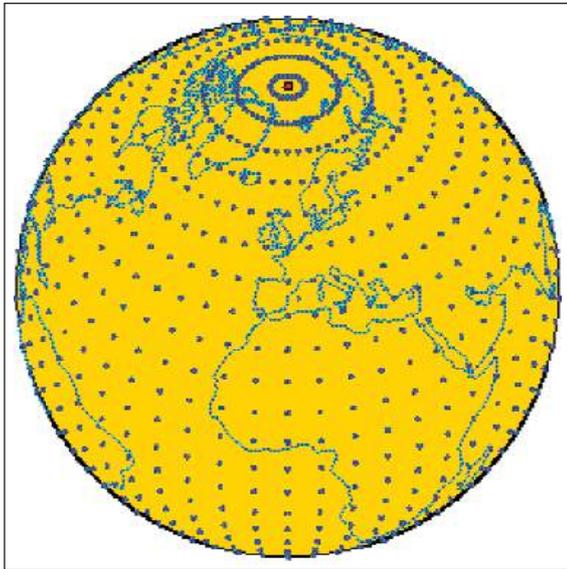


12. (a destra) Sempre presso la sede di Météo France, il vecchio CRAY in attività nel 1992 (f. L. Mercalli).



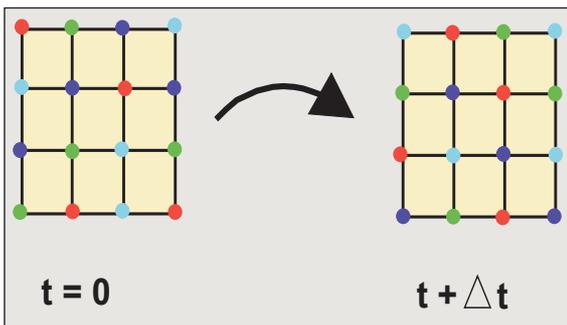
8. L'Earth Simulator (Giappone), con una potenza di calcolo di 40 Teraflop, è il più grande supercomputer del mondo.

1979 presso l'ECMWF era operativo il supercomputer CRAY 1A, che aveva una potenza massima di 160 Megaflop (Megaflop = 1 milione di operazioni in virgola mobile al secondo), 2.5 Gigabyte di disco fisso, e impiegava circa 5 ore per produrre una previsione a 10 giorni. Attualmente presso l'ECMWF è attivo un IBM Cluster 1600 con 2000 processori, potenza massima di calcolo di 10.4 Teraflop, 8.4 Terabyte di spazio disco; è 64.000 volte più potente del CRAY 1A. Il Met Office (UK) sta completando, nei propri uffici di Exeter, l'installazione del nuovo supercomputer NEC SX-6 da 44 milioni di dollari. E' composto di 240 processori, ognuno della potenza di 8 Gigaflop (potenza di picco di 1.9 Teraflop). Sarà completato nella primavera 2004. Il più potente calcolatore esistente oggi al mondo è l'Earth Simulator, in Giappone, che occupa un edificio di 50 x 65 x 17 m; esso ha una potenza totale di ben 40 Teraflop (40.000 miliardi di operazioni al secondo!), e viene anche impiegato per simulazioni climatiche con modelli accoppiati atmosfera - oceano.

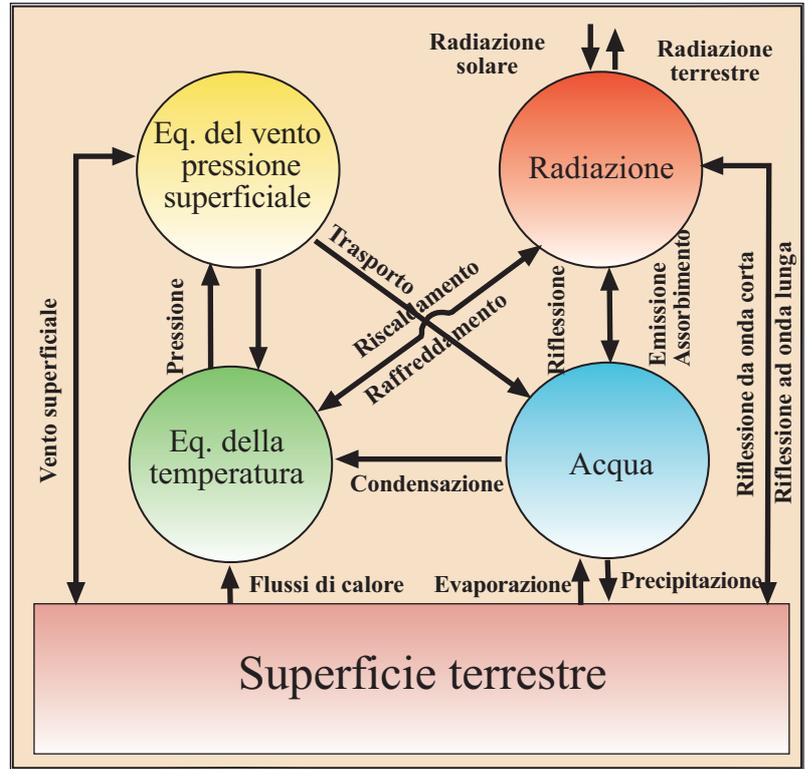


14 a, b. (sopra) Schema di griglia costruita per un Modello globale (GM), su tutta la superficie terrestre, ripetuta per ognuno dei livelli verticali in cui è divisa l'atmosfera. Sulla superficie terrestre ci sono 360 meridiani e 180 paralleli. Un tipico modello globale che giri a 0.5° avrà 720x360 punti griglia su una superficie. Se distribuito per 31 livelli verticali, dato che ci sono 6 variabili calcolate ogni 15 minuti, i dati griglia in un giorno saranno perciò  $720 \times 360 \times 31 \times 6 \times 24 \times 4 = 4.628.275.200$ .

15. (sotto) Rappresentazione semplificata delle operazioni svolte sulla griglia. In ciascuno dei nodi vengono fissate le condizioni iniziali al tempo  $t=0$ . L'algoritmo calcola negli istanti successivi, ad ogni time-step  $t$ , i valori delle variabili di interesse meteorologico, applicando tecniche di calcolo numerico. I diversi colori dei punti simboleggiano i diversi valori delle variabili assunti dopo un'integrazione temporale.



16. (a destra) Schema di griglia costruita per un generico modello di circolazione atmosferica.



13. Descrizione simbolica dei processi considerati in un modello numerico di simulazione dell'atmosfera.

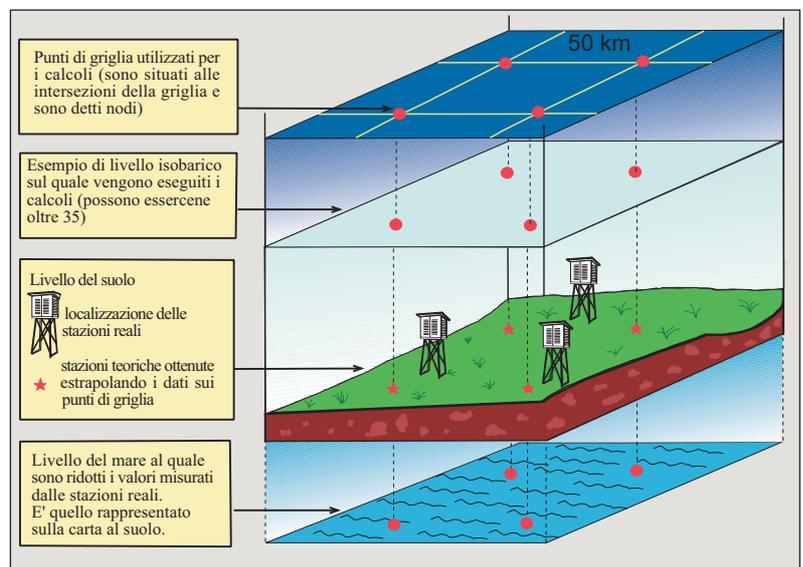
dell'atmosfera. Il nucleo principale di un codice di calcolo volto alla soluzione di tale sistema di equazioni è costituito all'incirca da un paio di centinaia di pagine scritte generalmente in linguaggio FORTRAN. Parti specifiche (o *subroutine* in termini tecnici) dei modelli, come ad esempio le parti relative al trattamento matrici, funzioni matematiche standard e parti grafiche possono utilizzare altri linguaggi, usualmente il C. In fig. 13 è raffigurato uno schema a blocchi di un modello numerico di previsione atmosferica. Come dati di ingresso nel modello, ossia quelli misurati dalle stazioni meteorologiche, bisogna fornire la pressione al suolo, la velocità del vento nelle sue componenti orizzontali, la tempera-

tura e l'umidità dell'aria in tutto lo spessore dell'atmosfera (in pratica fino a circa 20÷50 km di altezza). Queste variabili sono anche chiamate *prognostiche* e compaiono nel modello anche (ma non solo) come *derivate rispetto al tempo*

$$\frac{\partial}{\partial t}$$

(si legge «de su de t»; si rimanda all'approfondimento matematico, a pag. 27, per la spiegazione dei termini).

Sono le più importanti non solo perché in genere coincidono con le variabili oggetto delle osservazioni, ottenute a caro prezzo, ma soprattutto perché nel procedere del calcolo permettono di ricavare anche tutte le altre variabili che da esse dipendono, cosiddet-



17. Tabella riassuntiva delle caratteristiche dei principali modelli meteorologici globali.

Modello globale	Gestore	Caratteristiche	Risorse
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF)	Modello spettrale a 511 armoniche; 60 livelli verticali; risoluzione 40 km; 1 Run giornaliero alle ore 12 UTC con previsioni a +168 ore	www.ecmwf.int www.westwind.ch www.wetterzentrale.de/topkarten/ weather.unisys.com/ecmwf/index_eur.html
GFS - Global Forecast System (ex AVN)	National Center for Environmental Prediction (NCEP-NOAA)	Modello spettrale a 254 armoniche; 64 livelli verticali; risoluzione 52 km; 4 Run giornalieri alle ore 00, 06, 12, 18 UTC con previsioni a +84 ore	www.westwind.ch www.wetterzentrale.de/topkarten/ www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html
GFS - Global Forecast System Medium Range (ex AVN)	National Center for Environmental Prediction (NCEP-NOAA)	Modello spettrale a 170 armoniche; 42 livelli verticali; risoluzione 95 km; 4 Run giornalieri alle ore 00, 06, 12, 18 UTC con previsioni da +90 a +180 ore	www.westwind.ch www.wetterzentrale.de/topkarten/ www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html
GFS - Global Forecast System Long Range (ex MRF)	National Center for Environmental Prediction (NCEP-NOAA)	Modello spettrale a 126 armoniche; 28 livelli verticali; risoluzione 191 km; 4 Run giornalieri alle ore 00, 06, 12, 18 UTC con previsioni da +192 a +384 ore	www.westwind.ch www.wetterzentrale.de/topkarten/ www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html
NOGAPS - Navy Operational Global Atmospheric Prediction System	U.S. Navy's Fleet Numerical Meteorology Center (FNMOC)	Modello spettrale a 239 armoniche; 30 livelli verticali; risoluzione 56 km; 2 Run giornalieri alle ore 00, 12 UTC con previsioni a +144 ore	www.fnmc.navy.mil www.westwind.ch www.wetterzentrale.de/topkarten/
GME - Global Modell	Deutscher WetterDienst (DWD)	Modello a punti di griglia; Risoluzione 60 km; 31 livelli verticali; 2 Run giornalieri alle 00, 12 UTC con previsioni a +168 ore	www.dwd.de www.westwind.ch www.wetterzentrale.de/topkarten/
Arpège	Météo France	Modello spettrale a 358 armoniche; risoluzione variabile da 23 km su Francia a 133 sulla Nuova Zelanda; 41 livelli verticali; 4 Run giornalieri alle ore 00, 06, 12, 18 UTC con previsioni a +96, +42, +72, +30 ore	www.meteo.fr www.cnrm.meteo.fr
MM5 - Mesoscale Model Fifth Generation	University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)	Modello a punti di griglia; risoluzioni variabili; modello non-idrostatico	www.ucar.edu www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html www.westwind.ch
UKMET - Met Office Unified Model System	Met Office UK	Modello a punti di griglia; risoluzione 60 km; 30 livelli verticali; 1 Run giornaliero con previsioni a +120 ore	www.met-office.gov.uk www.westwind.ch
GEM - Global Environmental Model	Canadian Meteorological Centre (CMC)	Modello a punti di griglia; risoluzione di 0,9°; 28 livelli verticali	http://www.msc-smc.ec.gc.ca/cmc/index_e.html www.westwind.ch
JMA - Japan Meteorological Agency	Japan Meteorological Agency	Modello spettrale a 213 armoniche; risoluzione 93 km; 40 livelli verticali; 1 Run giornaliero alle ore 12 UTC con previsioni a +192 ore	http://ddb.kishou.go.jp www.westwind.ch www.wetterzentrale.de/topkarten/

18. (sotto a sinistra) Rappresentazione schematica di un modello numerico globale a punti di griglia, che mostra la suddivisione in volumi elementari per i quali sono eseguiti i calcoli, generalmente ai nodi della griglia. I colori riguardano una scala di temperatura (rosso = caldo; blu = freddo); sono anche riportati i vettori del vento (da Lab. Météorologie Dynamique, CNRS).

19. (sotto a destra) Una caratteristica peculiare del modello Arpège di Météo France è quella di utilizzare una maglia variabile, più fitta sulla zona di interesse (in questo caso la Francia e l'Europa), e progressivamente meno dettagliata nelle aree più lontane. La metà dei punti di griglia totali è concentrata nel cerchio passante per la Groenlandia e il Sahara, mentre il quadrato verde rappresenta l'area dove viene fatto girare il modello ad area limitata «Aladin» con risoluzione 10 km. Il modello Arpège suddivide l'atmosfera in 4 milioni di «blocchetti» elementari.

te diagnostiche. L'obiettivo di una previsione è quello di restituirci, dopo i calcoli, le variabili predette di velocità del vento, temperatura, pressione, umidità a varie altezze dal suolo. Da queste si possono poi ricavare tutte le altre grandezze dipendenti come precipitazioni, nuvolosità, ecc... Spesso i modelli traducono tutte queste informazioni sotto forma di una moltitudine di mappe colorate, cui forse il lettore si sarà già imbattuto nel visitare i siti Internet dedicati. Ma quali sono le equazioni principali che sono utilizzate dai modelli? Ovviamente non si posso-

no scrivere qui tutte per esteso, tuttavia possiamo citare le più importanti, dette **primitive**:

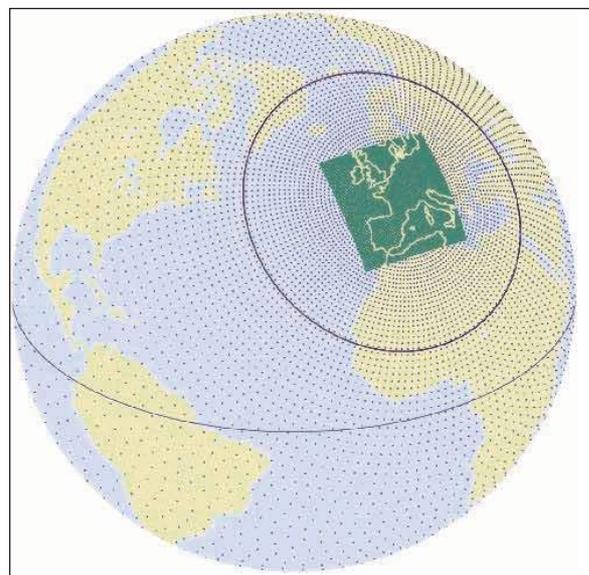
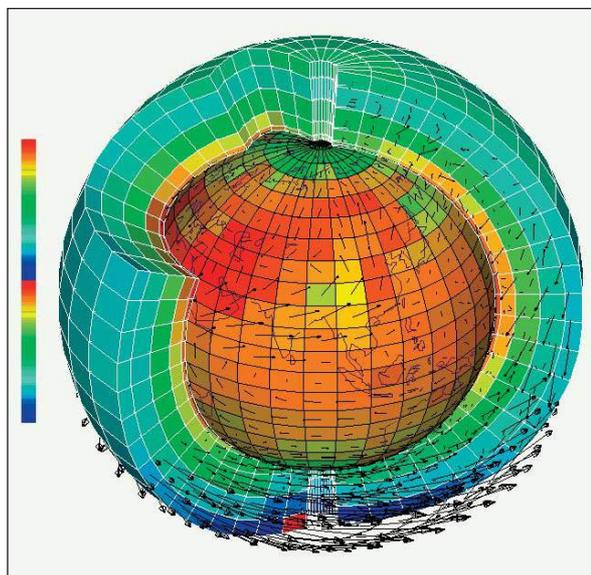
- **Equazioni di Navier-Stokes (NS)** per la definizione delle componenti del campo di vento (anche dette equazioni di bilancio della quantità di moto in un fluido).
- **Equazione della termodinamica** (è il fondamentale *primo principio della termodinamica*, detto anche di *conservazione dell'energia*, spesso banalizzato nell'espressione *nulla si crea, nulla si distrugge*).
- **Equazione di evoluzione del**

**vapore acqueo** (tiene conto di tutti i processi che compongono il ciclo dell'acqua e dei suoi passaggi di stato, cioè evaporazione, condensazione, fusione, solidificazione e sublimazione).

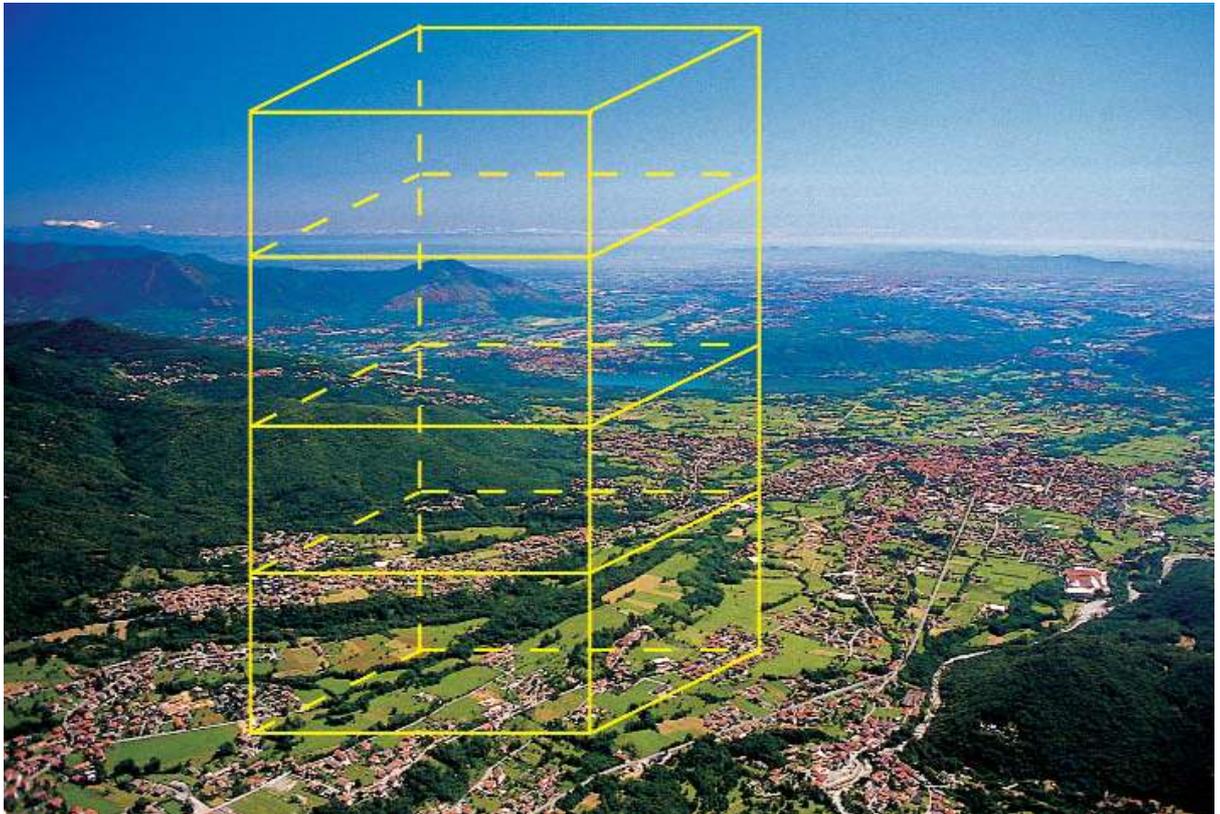
- **Equazione di continuità** (che deriva dalla legge di conservazione della massa). Assicura che in un dato volume la quantità d'aria che entra sia pari a quella che esce.

A queste equazioni conservative prognostiche si aggiungono:

- **Equazione di stato dei gas**, che lega pressione, densità, tem-



20. La massa dell'atmosfera terrestre è pari a circa 5.3 milioni di miliardi di tonnellate di gas ( $5.3 \times 10^{18}$  kg). Il 99% di questa massa si trova sotto i 30 km di altitudine. In ogni momento sono anche presenti - sotto forma di vapore - circa  $13.000 \text{ km}^3$  di acqua. Questi numeri rendono l'idea della complessità di un modello globale, che può applicare le leggi fisiche fondamentali (moto, termodinamica...) solo a un campione molto ridotto di punti. Veduta aerea di una porzione di atmosfera terrestre presso i Laghi di Avigliana, ad Ovest di Torino, il 24.05.2002 (f. L. Mercalli).



21. LAMBO (Limited Area Model Bologna) è un modello idrostatico operativo presso l'ARPA Emilia Romagna SMR, basato su NCEP ETA, con risoluzione orizzontale di 20 km e 32 livelli verticali. Qui a destra, un esempio di una carta di previsione delle precipitazioni.

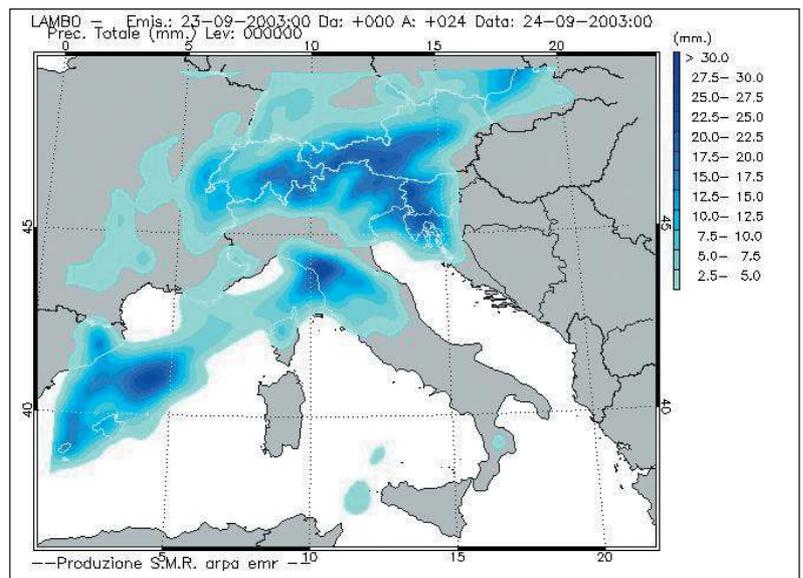
22. (sotto) Confronto tra le reali condizioni atmosferiche esistenti su un terreno montuoso e quelle rappresentate in modo semplificato dal modello.

peratura e volume di una massa d'aria.

- **Equazione idrostatica**, che riguarda la relazione approssimata tra la variazione di pressione con la quota e la densità dell'aria.

**Dai modelli globali a quelli ad area limitata**

In rete è disponibile un numero assai elevato di modelli, fatto non del tutto giustificato da ragioni puramente scientifiche. E' senza dubbio ragionevole che i modelli locali possano distinguersi per adattarsi alle diverse caratteristiche geografiche (es.: orografia, vegetazione) o per i diversi metodi numerici di risoluzione impiegati, o ancora per la diversità nel trattamento dei processi fisici e delle parametrizzazioni (turbolenza, convezione, flussi superficiali, ecc...). Lo sviluppo indipendente dei modelli tra l'altro consente il cosiddetto *multimodel forecast* una linea promettente di previsione basata sul confronto dei risultati di più modelli, di cui parleremo più avanti. D'altro



canto le equazioni fondamentali utilizzate sono note da un paio di secoli e ovviamente sono le stesse per tutti. Qualche volta però anche motivi commerciali spin-

gono i centri specializzati a modificare alcune parti di un programma anche minime, per poter rivendicare poi la paternità sui risultati che effettivamente diffe-

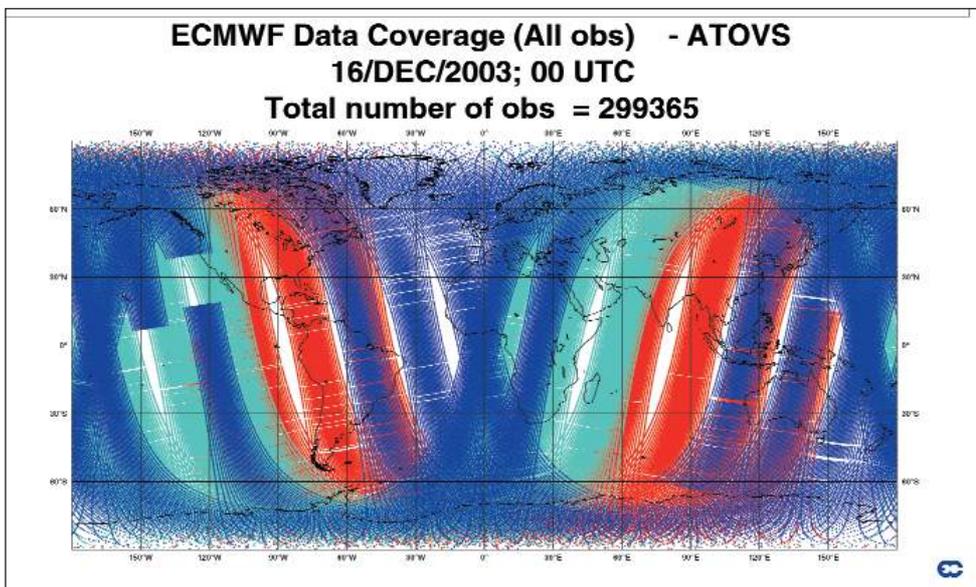
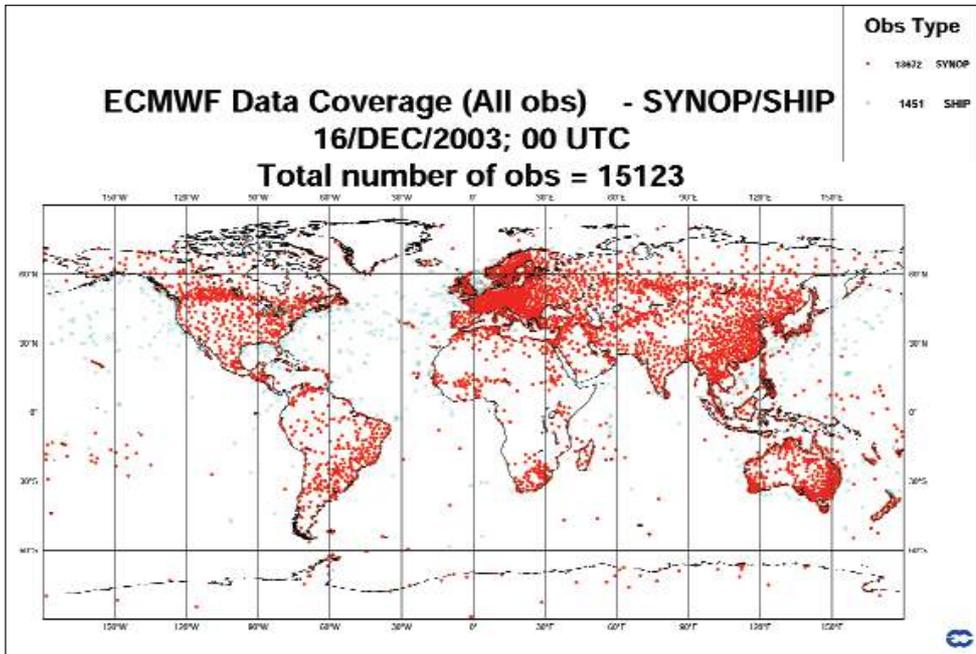
Territorio reale con venti discendenti, vortici e precipitazioni indotti dal rilievo.

Fonte: COMET Program, ridis.

Territorio semplificato dal modello e previsione: il modello non è in grado di risolvere i processi fisici associati a un rilievo complesso o ripido

**Le nuvole non sono sfere, le montagne non sono coni, le coste non sono cerchi, la corteccia non è liscia, nè il fulmine viaggia in linea retta.**

BENOIT MANDELBROT (1924-vente, inventore dei frattali).



23 a, b. Distribuzione delle stazioni osservative nel globo per il giorno 16.12.2003 (in alto), usate per inizializzare il modello globale ECMWF. Sono evidenti le diverse densità di distribuzione a seconda dei continenti, e la carenza di dati nelle zone oceaniche. Ciò influenza la definizione dello stato iniziale dell'atmosfera (al tempo  $t_0$ ). Le stazioni sinottiche terrestri sono circa 15.000 (in alto), e vengono affiancate da circa 3300 boe, 37.500 osservazioni da aerei, 600 radiosonde e quasi 300.000 osservazioni termiche da satellite (tramite sensore AMSU - Advanced Microwave Sounding Unit) (figura qui sopra).

riranno assai poco o per nulla da quelli di un modello concorrente. Verrebbe naturalmente da pensare se non si possano ottenere migliori risultati unendo e coordinando le forze anziché disperderle. Lasciamo al lettore ulteriori considerazioni in merito, per affrontare il discorso delle diverse tipologie di modello. Si individuano due tipi: Modello Globale (GM = *Global Model*) o ad Area Limitata (LAM = *Limited Area Model*). È intuitivo che i modelli globali prendono in considerazione tutta l'atmosfera terrestre, mentre quelli ad area limitata lavorano su parti più ristrette di territorio. Una soluzione analitica semplice delle equazioni, valida in conti-

nuo per tutti i punti della superficie terrestre, non esiste, per cui i matematici ricorrono all'espedito di dividere l'atmosfera sott'indagine in una serie di punti fissi, trasformando una soluzione *continua* in una soluzione *discreta*. È come se invece di strisciare sul terreno, adattandosi ad ogni asperità, la scelta sia quella di saltare da un punto ad un altro. Non si può dire che la conoscenza del mondo dal punto di vista di una rana sia così peggiore di quella di un serpente, considerando soprattutto che la maggior velocità della prima costituisce un vantaggio! Ebbene gli scienziati agiscono in questo caso proprio come le rane, immaginando che le condizioni del

mondo tra un salto e l'altro non siano poi così dissimili. Ciò che è importante far notare, al di là di questa analogia, è che il metodo opera per salti, è veloce di quel tanto che basta per fornirci i risultati di cui abbiamo bisogno in tempo utile ed è potente, poiché non abbiamo posto limiti alla lunghezza dei salti.

In termini tecnici la semplificazione adottata si chiama *discretizzazione*. Ciò significa che alle derivate che compaiono nei vari termini, si sostituiscono delle differenze. Questa sostituzione rende le equazioni affrontabili mediante il calcolo numerico, in assenza di metodi alternativi per ricavare le soluzioni analitiche. Tale processo comporta la definizione di una serie di punti fissi, selezionati nel dominio di definizione delle variabili delle equazioni. Ogni variabile viene quindi completamente identificata dai suoi valori su questi punti, i cosiddetti *punti di griglia*, mentre le derivate spaziali diventano differenze calcolate tra punti di griglia presi in successione ordinata. Si noti che ad ogni punto griglia è associata una «fetta» di atmosfera, la cui caratteristica sono rappresentate dai valori assunti dalle variabili. La previsione diventa un procedimento per il calcolo dei valori futuri delle variabili meteorologiche su tutti i punti di griglia (Fig. 15). Nel caso specifico si immagina di sezionare completamente l'atmosfera sia in orizzontale sia in verticale mediante una griglia tridimensionale di forma opportuna. Non ci sono regole che impongono il numero di punti (chiamati anche nodi) da usare, anche se è evidente che infittendo la griglia l'intervallo di separazione tra i punti diminuisce e da ciò risulta una miglior precisione dello schema numerico. In pratica è la potenza di calcolo dello strumento elettronico che limita la scelta dei punti: o si considera tutto il globo e quindi si tiene ampia la distanza tra i nodi, oppure ci si concentra su un'area infittendo il passo di griglia, guadagnando così in risoluzione.

Poiché le capacità di calcolo automatico non sono infinite, i GM, avendo il passo di griglia più grande, introducono le più importanti semplificazioni, operando con risoluzioni tra i 40 e i 100 km in orizzontale. I LAM, riducendo la zona di interesse, impiegano una griglia più fine, con passo di 5÷20 km. Nella verticale, la porzione di atmosfera considerata si può estendere fino ad un'altezza di 30÷70 km, distribuiti su qualche decina di livelli, in modo non uniforme (più fitti vicino al suolo, dove è necessaria una migliore definizione verticale). È importante sottolineare che i GM servono ad inizializzare i LAM, ossia all'istante iniziale  $t=0$  relativo all'inizio dei calcoli i LAM

24. Le osservazioni meteorologiche sono un elemento fondamentale per la definizione dello stato iniziale dell'atmosfera sul quale il modello andrà a calcolare l'evoluzione. Qui a fianco, sito di rilevamento presso le strutture di Météo France a Toulouse (f. L. Mercalli).



utilizzano le uscite dei GM come valori iniziali, quindi elaborano una previsione su una previsione. Inoltre i GM forniscono ai LAM le condizioni al contorno laterali durante tutto il tempo di previsione. Ovviamente ci saranno delle lacune, perché le condizioni iniziali e al contorno su tutti i punti della maglia più fitta non sono note; sarà necessario quindi interpolare questi dati con tecniche opportune. Soffrendo di queste importanti incertezze e procedendo poi nei calcoli per conto proprio, i LAM permettono di produrre previsioni molto dettagliate, ma valide solo da poche ore fino a circa due giorni (infatti ciò che avviene all'esterno dell'area trattata dal LAM influenza il tempo al suo interno, e più l'intervallo di previsione al quale ci interessiamo è lungo, più questa influenza si fa sentire). Vi è poi una classe particolare di modelli a passo variabile, usata solo da Météo France (ARPEGE), con griglia più fitta solo per la zona di primario interesse. L'idea sembrerebbe buona poiché con un unico modello si potrebbero abbracciare sia previsioni globali che locali, tuttavia in questo caso gli stessi autori ne limitano di molto l'efficacia, poiché oltre un certo zoom, dell'ordine dei 30 km nel piano orizzontale, non si può andare. Nella fig. 17 sono elencati i principali tipi di modelli globali che si possono incontrare su Internet. Per quel che riguarda la previsione indicata, si consideri che è pratica usuale quella di ottenere previsioni emesse per periodi diversi da quelli indicati, facendo girare i modelli su scale e armoniche diverse (e per questo motivo l'affidabilità previsionale potrà variare a seconda dei casi). Si deve tenere conto che, a seconda delle politiche dei servizi nazionali, i centri meteorologici possono anche decidere di non mettere in rete gratuitamente

tutti i risultati delle previsioni. Difatti nella maggior parte dei casi le mappe con un più elevato valore commerciale sono disponibili solo a pagamento!

#### Il processo di assimilazione dei dati

Abbiamo accennato precedentemente all'inizializzazione, che comporta la definizione dei valori iniziali in tutti i punti di griglia

**Forse un tempo, nel lontano futuro, sarà possibile procedere coi calcoli più velocemente di quanto procedono i fenomeni meteorologici, a un costo inferiore ai risparmi che l'umanità potrà fare grazie alle informazioni ricevute. Ma questo è un sogno. LEWIS FRY RICHARDSON, 1922**

(sia orizzontali che verticali) per ciascuna delle variabili diagnostiche, nonché le condizioni al contorno. Per raggiungere tale scopo, deve essere preventivamente eseguito un lungo lavoro

di preparazione chiamato processo di *assimilazione dei dati*, che in termini di tempo, calcolo ed elaborazione è la parte più pesante di un modello, tanto che esso ormai è sviluppato autonomamente, con tecniche dedicate. E' noto che esiste su tutto il globo una rete interconnessa di stazioni meteorologiche sinottiche, coordinate dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale, che effettuano misure in continuo delle variabili fisiche di interesse e le trasmettono nei centri di raccolta dati. Anche i dati da satellite, e i risultati delle misurazioni su navi e boe oceaniche concorrono allo scopo. Come si può immaginare, la distribuzione dei punti di misura non è omogenea lungo i nodi di griglia e questo rappresenta il primo problema. Inoltre, specialmente sugli oceani, proprio là dove nascono i cicloni che interessano le medie latitudini, i dati sono carenti o mancano del tutto (Fig. 23a). Sono pochissime poi le stazioni che fanno rilievi verticali in altezza utilizzando i palloni sonda (circa un migliaio in tutto il mondo, con notevoli lacune al di sopra degli oceani e

delle zone scarsamente abitate). Non solo quindi i dati sono carenti, ma molti di essi possono essere affetti da errore, per cui è indispensabile effettuare un controllo severo di

qualità per ogni dato (esistono procedure automatiche particolari atte allo scopo che riescono a filtrare i valori errati) e anche questa è un'operazione che richiede tempo. L'interpolazione

#### La situazione dei servizi meteorologici in Italia

In Italia come noto non esiste, come ad esempio in Francia e nella maggior parte dei paesi europei, un unico centro meteorologico nazionale civile. Ragioni storiche e motivi strategici hanno vincolato per molti anni il servizio di previsione meteorologica nazionale al ristretto dominio del Ministero della Difesa AM - UGM (Aeronautica Militare - Ufficio Generale per la Meteorologia). Sotto le crescenti esigenze dei fruitori di questo servizio, verso il 1980 divenne evidente come l'Aeronautica Militare da sola non potesse bastare a soddisfare tutte le richieste. Accadde quindi che le Regioni e i Ministeri presero l'iniziativa autonoma di impiegare mezzi e investire risorse nel settore meteorologico. Il risultato di queste azioni è che adesso le competenze di quello che dovrebbe essere un servizio meteo nazionale sono state via via frammentate e distribuite su sette diversi ministeri (Difesa, Agricoltura, Marina, Trasporti, Ambiente, Istruz. e Ricerca, Presidenza del Consiglio), ossia 7 ministeri non solo hanno bisogno di meteorologia, ma la praticano con proprie iniziative (spesso parzialmente e in modo sconsiderato); se a questi sommiamo i contributi regionali, arriviamo alla situazione attuale paradossale di una ventina di servizi meteo-ambientali. In un panorama così frammentato anche i privati sono riusciti a trovare un proprio spazio, tanto che l'offerta sul mercato di prodotti legati alle previsioni è oggi decisamente sovrabbondante, anche se la qualità lascia molte volte a desiderare. Un altro aspetto da non sottovalutare in questo panorama disorganizzato, è l'estrema difficoltà a reperire dati complessivi e serie storiche per eventi accaduti su vaste aree del paese, che riguardano competenze così frammentate.

25. Progetto COMPARE II, 1990: simulazione di vortice sottovento sui Pirenei e confronto con l'osservazione (OBS, la prima a sinistra). Come si può notare, sia la velocità del vento (proporzionale alla lunghezza delle frecce) sia la direzione sono molto ben ricostruite dal modello BOLAM.

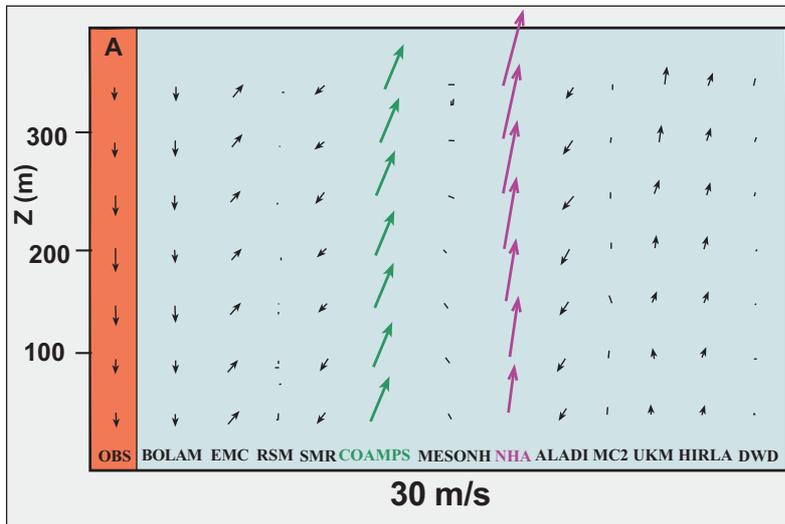
ottimale consiste nel trasportare i dati nei punti di griglia all'istante voluto correggendoli per le condizioni locali. Infine i dati vanno resi omogenei e corretti per evitare discontinuità con le misure precedenti. Il risultato di tutte queste operazioni si traduce in insiemi di dati su griglie numeriche che vengono poi tradotte in carte denominate *analisi*, ossia mappe grafiche dei valori delle variabili di interesse osservate a una determinata ora del giorno. Giusto per dare un'idea, occorrono alcune ore per completare un processo di assimilazione dati, e le risorse umane e finanziarie investite per il miglioramento di queste tecniche sono superiori a quelle finalizzate al miglioramento della struttura dei modelli stessi.

Ecco alcune cifre relative al modello del Centro Europeo di Reading: 4000 miliardi di operazioni sono necessari per l'assimilazione dei dati su quattro cicli di analisi necessari per un solo giorno; i dati di circa 40 mila stazioni di osservazione (al suolo e in quota) vengono utilizzati per ciascuna analisi.

La parte del modello relativa alla sola previsione di un LAM a risoluzione modesta (es: 20 km) potrebbe essere eseguita tranquillamente da un personal computer, ma la parte di assimilazione dati rimane patrimonio dei pochi centri mondiali attrezzati a farlo. Fa piacere sapere che la NOAA americana mette a disposizione su Internet i dati dei suoi modelli globali che possono essere utilizzati come valori iniziali e al contorno per operare con modelli ad area limitata.

**La struttura dei modelli**

Per capire quali sono gli «ingredienti» costituenti i modelli sentiamo Andrea Buzzi, un vero protagonista del settore, nel cui gruppo di ricerca è stato sviluppato il BOLAM (*BO*logna *L*imited *A*rea *M*odel), unico modello me-



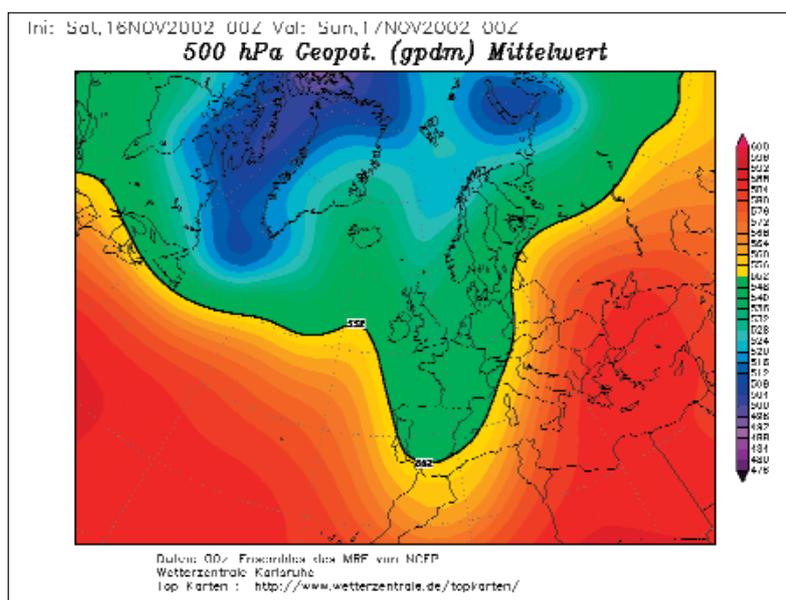
**Modello BOLAM: principali aspetti fisici inclusi**

Si tratta di un modello ad area limitata, disponibile in due versioni. 1) **risoluzione di 21 km**: condizioni iniziali e al contorno fornite ogni 6 ore dai campi su livelli ibridi dell'ECMWF (analisi delle ore 00 UTC su griglia ruotata, ricevute tramite l'Aeronautica Militare); run di 72 ore (dalle 00 alle 72 UTC); griglia orizzontale ruotata di 154 x 144 punti con risoluzione di 0.20 gradi; 30 livelli verticali; 2) **risoluzione di 6,5 km**: condizioni iniziali e al contorno fornite dal BOLAM 21 km ogni 90 minuti; run di 36 ore (dalle 12 alle 48 UTC); griglia orizzontale ruotata di 140 x 130 punti con risoluzione di 0.06 gradi; 40 livelli verticali.

- Radiazione: solare e infrarossa, interazione con le nubi (RITTER & GELEYN e ECMWF RRTM - MORCRETTE);
- Diffusione verticale dipendente dal numero di Richardson (strato superficiale e parametrizzazione PBL);
- Bilancio termico di superficie e bilancio idrico; nuovo schema del suolo e della vegetazione in sviluppo (in collaborazione con l'Istituto Idrometeorologico di Russia - PRESSMAN, 2002);
- Schema microfisico esplicito a 5 idrometeorie (nubi di ghiaccio, nubi d'acqua, pioggia, neve, grandine), derivante da SCHULTZ (1995) and DROFA (2001);
- Parametrizzazione convettiva: a seconda dei casi, Emanuel o Kain-Fritsch; il secondo consente l'interazione con schemi microfisici più accurati (SPENCER & STENSRUD, 1998).
- Interfacciamento con modelli oceanici e idrogeologici;
- Accoppiamenti con modelli WAM e POM (modello MIAO, LIONELLO & MALGUZZI, 2000).
- Accoppiamento con modello idrogeologico distribuito (DIMO-SOP, Univ. di Brescia) per evento MAP-SOP.

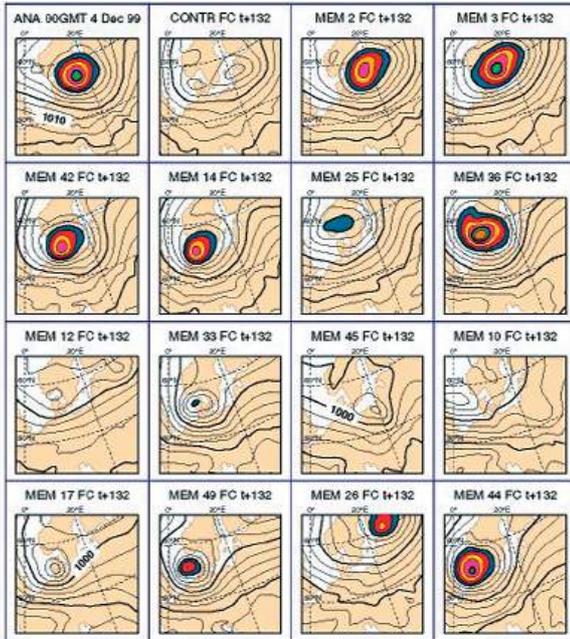
<http://www.cmirl.ge.infn.it/map/bolam/bolamit.htm>

26. Un'uscita del modello globale GFS, che rappresenta l'altezza geopotenziale a 500 hPa. La generazione automatica di carte cromatiche ha recentemente agevolato il lavoro del previsore.



teorico ad essere stato elaborato per la maggior parte in Italia, e che ha raggiunto, come vedremo in seguito, un notevole grado di affidabilità.

Le equazioni di Navier - Stokes (NS) vengono utilizzate per definire le componenti del campo di vento. La risoluzione del sistema di equazioni è ottenuta disaccoppiando i movimenti della massa d'aria lungo i piani orizzontali, la cui descrizione è affidata alle equazioni NS, rispetto a quelli lungo l'asse verticale (movimenti ascensionali di correnti termiche) descritte mediante equazioni di bilancio termico. La precisione del calcolo è intrinsecamente legata all'infittimento della griglia utilizzata dallo schema numerico a seguito delle discretizzazioni del sistema di equazioni. Per risolvere il campo di moto



... dal punto spaziotemporale in cui mi trovo si diparte un fascio di possibilità che più procedono nel tempo più divergono a cono verso futuri completamente diversi tra loro...

ITALO CALVINO, *Ti con zero* (1967).

nei suoi più piccoli dettagli si dovrebbe utilizzare una griglia fittissima aumentando a dismisura risorse e tempi di calcolo.

Il motore della circolazione atmosferica, è costituito dagli scambi termici, e la parte del modello che li spiega è detta parte *diabatica radiativa*. Il computo della radiazione solare comprende la diffusione e l'assorbimento del calore da parte delle varie superfici, nubi comprese. Essa rappresenta la parte più pesante di calcolo all'interno del modello (escluso il processo di assimilazione dati che, come abbiamo visto, sta all'esterno), pur operando delle grosse semplificazioni, come ad esempio evitare di trattare in modo singolo le frequenze di emissione e assorbimento della radiazione.

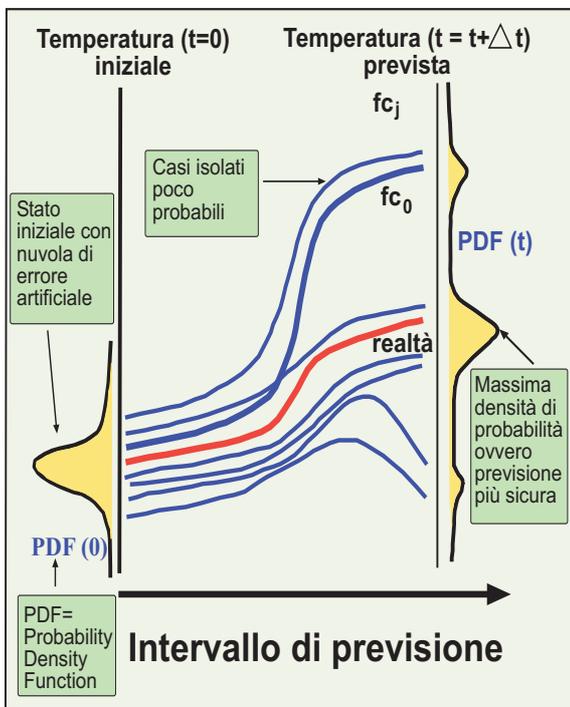
Un'altra parte complessa è quella relativa all'acqua, al cui ciclo sono legati fondamentali processi. Nei modelli più semplici sviluppati in passato, tutta la parte di umidità che superava il limite di saturazione veniva considerata come precipitazione, tenendo conto in tale processo del solo calore latente ceduto all'atmosfera. Ci si accorse tuttavia che il non considerare l'evaporazione costituiva già un problema, che poteva avere ripercussioni su tutti gli strati sottostanti alla precipitazione. Gli effetti correlati all'evaporazione causano variazioni nella nuvolosità e quindi influenzano anche la parte radiativa. La non buona trattazione della formazione delle nubi influenza la dinamica delle idrometeore per cui questi modelli facevano piovere troppo e in modo localizzato. In realtà si è visto che migliorando la parte cosiddetta microfisica, ossia la descrizione dei fenomeni che avvengono in buona

parte su scala microscopica, come ad esempio la formazione di goccioline e cristalli di ghiaccio, i processi vengono diffusi e ritardati quanto basta per essere ricollocati e distribuiti nella giusta scala temporale e spaziale. Ad esempio il vento in quota tende a ridistribuire la precipitazione rispetto alla zona di formazione, anche per alcune decine di chilometri.

Le scale caratteristiche di questi processi sono inferiori al passo della griglia usata dal modello e vengono dunque detti di «sotto-griglia». Per valutarne l'influenza sull'intero sistema essi vengono pertanto sottoposti a una procedura detta di «parametrizzazione».

**La scuola di Bologna**

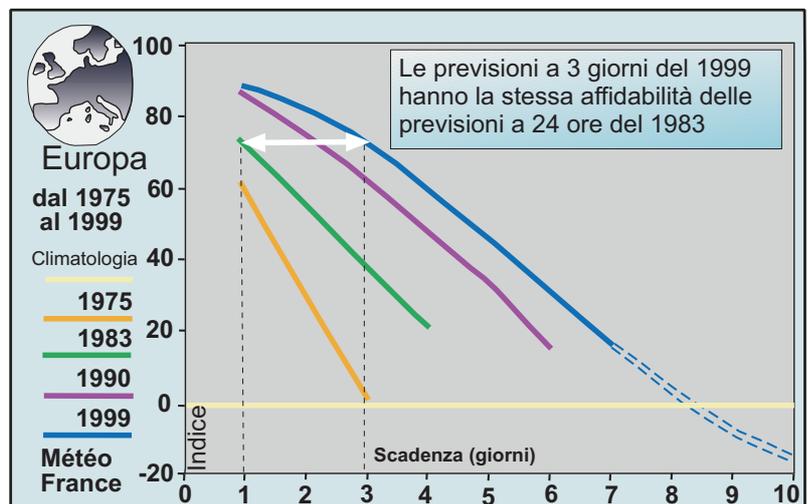
Da un punto di vista strettamente scientifico in Italia il primo e più autorevole gruppo che ha sviluppato autonomamente un proprio modello è quello di Bologna. Alla fine degli anni 1960 il professor Giampietro Puppi della locale Università si fece promotore di un'iniziativa volta a dare impulso alla scienza meteorologica in Italia, in accordo con il professor Ottavio Vittori, fondatore di quello che diventò l'istituto FISBAT del CNR, recentemente confluito nell'istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC) di Bologna. Obiettivi finali erano le previsioni delle maree a Venezia e delle tempeste nel Mediterraneo dovute alla formazione dei cicloni, specie quelli di natura orografica di difficilissima previsione con i metodi di allora. Verso la metà degli anni 1970, Anna Trevisan fu promotrice dello sviluppo di un modello in coordinate isoentropiche (le superfici di livello erano costituite dai punti ad

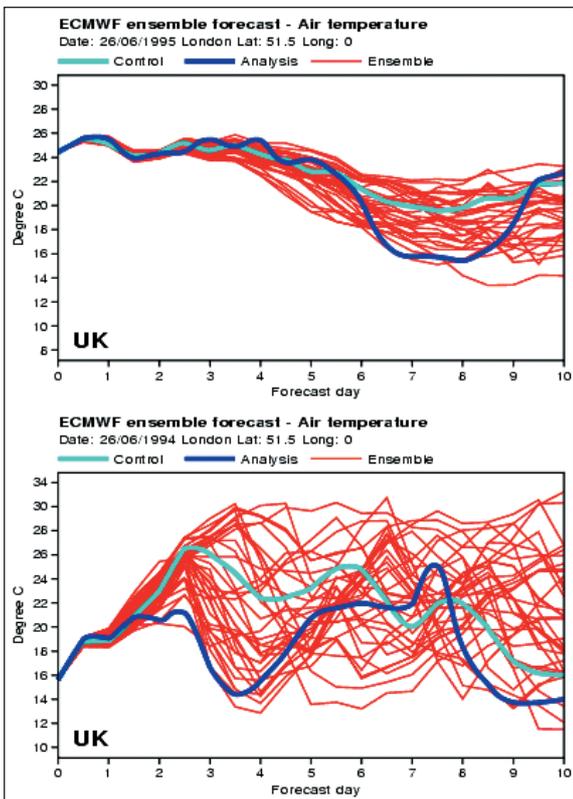


27. Illustrazione dell'insorgenza del caos nella previsione atmosferica. In alto a sinistra è raffigurata l'analisi della pressione al suolo in un giorno qualsiasi in una determinata regione. Perturbando le condizioni iniziali, anche solo di poco, si osserva come le diverse previsioni ottenute possano essere assai diverse fra loro.

28. Previsione di ensemble. Una descrizione completa di una previsione atmosferica basata su metodi numerici può essere definita in modo rigoroso in termini di funzione di densità di probabilità (PDF). La previsione di ensemble assegna affidabilità superiore a quegli eventi che si distribuiscono attorno ad una più densa nuvola di probabilità. L'esempio ipotetico si riferisce ad un possibile andamento di una qualsiasi delle variabili di previsione meteo. In rosso è indicata l'evoluzione reale.

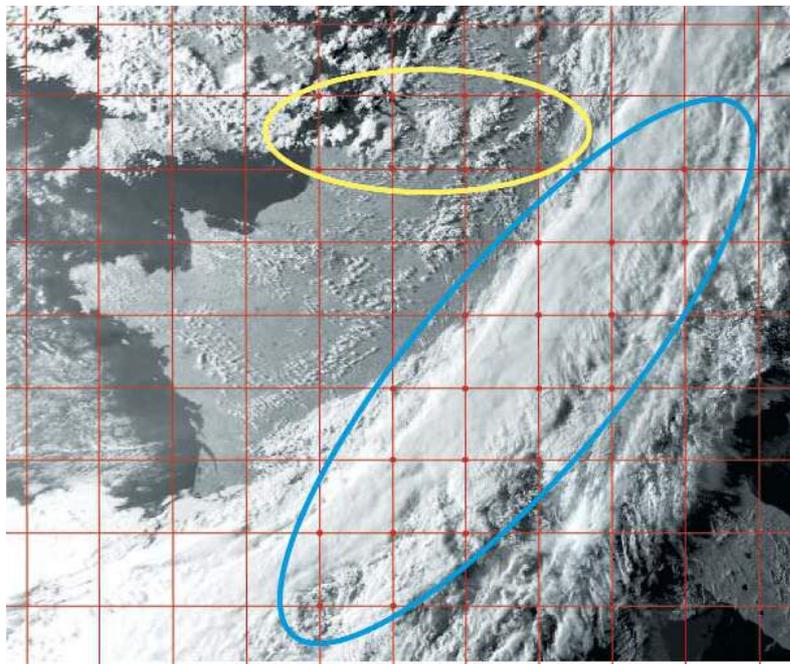
29. Esempio del miglioramento della qualità delle previsioni numeriche negli ultimi 25 anni sull'Europa. Come si può notare, si possono oggi formulare previsioni fino a 7 giorni con alto grado di affidabilità, superiore cioè al limite della previsione climatologica ottenuta con la sola applicazione delle frequenze osservate nel passato (approccio stocastico e non deterministico).





30 a. b. «Plumes» di previsione ECMWF per la temperatura dell'aria a Londra a partire dal 26.06.1995 (in alto) e dal 26.06.1994 (in basso). Ogni quadro contiene 33 previsioni su stati iniziali molto simili. Nel primo caso la previsione è più robusta e le linee divergono lentamente rispetto al secondo caso, in cui esse assumono andamento caotico già dal secondo giorno (da BUZZA, 2000).

eguale entropia), che costituiva un punto di partenza per la previsione numerica. Verso gli inizi degli anni 1980 i ricercatori del FISBAT e del Dipartimento di Fisica di Bologna hanno intrapreso una collaborazione con il gruppo di Belgrado che utilizzava il cosiddetto modello HIBU, sviluppato nel decennio precedente dai validissimi Fedor Mesinger e Zavisa Janjic e che si trasformò in seguito nel modello ETA utilizzato anche dal Servizio Meteorologico degli Stati Uniti (NCEP). Questo progetto fu foriero di numerosi sviluppi che condussero successivamente al modello denominato LAMBO, adottato e tuttora operante presso il Servizio Meteo dell'ARPA dell'Emilia Romagna. All'inizio degli anni 1990, anche su impulso del Ministero dell'Agricoltura, iniziò lo sviluppo indipendente del modello BOLAM (e della versione DALAM, tuttora operativa presso l'attuale Mini-



31. (in alto) La risoluzione del grigliato è fondamentale per cogliere strutture meteorologiche di scala differente: nel contorno giallo si individuano nubi cumuli multiformi, che non vengono «viste» da nessuno dei punti di griglia, mentre nel contorno azzurro il fronte nuvoloso esteso è ben individuato da numerosi punti di griglia (immagine NOAA VIS del 13.07.1998).

32. Nelle zone montuose ai processi convettivi già difficili da individuare si aggiungono le difficoltà di approssimare correttamente il rilievo. Qui sopra, formazione di cumuli orografici a scala locale il 24.05.2002 sulla Val Sangone, Prealpi occidentali presso Torino (f. L. Mercalli).

stero delle Politiche Agricole). Anche se si possono ottenere i nomi anagrammando le parole, questi due modelli sono diversi, avendo avuto sin dall'origine uno

sviluppo indipendente. La qualità del modello BOLAM è stata affinata di molto negli ultimi anni, e questo modello ad area limitata è considerato oggi nel mondo della ricerca, tra i migliori in termini di qualità e affidabilità previsionale.

Molto lavoro si è reso necessario per migliorare il trattamento degli effetti della composizione del suolo, delle montagne, della distribuzione della vegetazione e degli insediamenti umani. Su questi aspetti Buzzi ammette che il modello potrebbe ancora essere migliorato nella rappresentazione di pareti verticali ripide, poiché l'attuale versione dell'orografia non è adatta a simulare alcuni fenomeni che avvengono in prossimità di zone orografiche complesse (ma questo è in realtà un punto debole per ogni modello, come abbiamo già fatto nota-

**1973: viene fondato il Centro Europeo per le Previsioni a medio termine (ECMWF) a Reading (UK).**

**1979: prima previsione a medio termine (10 giorni) su un computer CRAY1; il tempo di calcolo era di 5 ore.**

**Oggi: su un IBM Cluster 1600, con potenza 64.000 volte superiore, gira il modello globale T<sub>1</sub>51 1L60, passo di griglia di 40 km, 60 livelli verticali (fino a 70 km di quota), intervallo di integrazione di 15 minuti; per una previsione a dieci giorni tempo di calcolo inferiore a due ore e oltre 20.000 miliardi di operazioni da svolgere.**

re in precedenza).

Un confronto tra i vari modelli LAM è un fatto raro, e quando accade esso rappresenta un'occasione importante per gli addetti ai lavori che si sentono stimolati a portare al limite le prestazioni del proprio modello. Il discorso è valido in generale e riguarda tutti i campi di applicazione delle scienze, poiché ogni confronto fra scienziati permette di mettere in discussione i risultati dei lavori di ognuno e correggere eventuali errori. Durante questi esercizi si cerca di ricostruire l'evoluzione di eventi atmosferici a posteriori, fornendo a tutti i partecipanti le medesime condizioni iniziali; quindi si confrontano tra di loro gli output dei vari modelli con le osservazioni, per capire le origini delle differenze e degli errori inevitabilmente prodotti.

Come esempi di casi di studio si possono citare i seguenti esperimenti, correlati di diagrammi esplicativi: (1986) COMPARE I, ricostruzione di un ciclone extra tropicale; (1990) COMPARE II (fig. 25), ricostruzione di un vortice sottovento ai Pirenei, COMPARE III, previsione della crescita di un uragano molto intenso. Più recentemente (1999) nell'ambito del progetto MAP (*Mesoscale Alpine Program* [www.map.ethz.ch](http://www.map.ethz.ch), vedi anche *Nimbus 17-18*, p. 12) sono stati effettuati confronti relativi a diversi eventi alluvionali. Il modello BOLAM si è sempre piazzato tra i migliori in ciascuno degli esperimenti proposti.

#### Differenza tra modelli idrostatici e non idrostatici

Nell'affrontare qualsiasi tipo di problema scientifico si utilizzano sempre delle equazioni matematiche che al di fuori dell'insieme ristretto di alcuni casi semplici e gestibili in laboratorio, presentano però notevoli difficoltà ad essere risolte nelle applicazioni pratiche e ingegneristiche. Tuttavia è possibile in molti casi operare delle semplificazioni eliminando tutti quei termini che, a seconda dell'ambito di definizione del problema stesso, risultano inferiori ad altri per ordini di grandezza. Questa operazione si chiama in gergo «analisi di scala». Nel nostro box matematico, si può vedere come nell'equazione del moto compaiono diversi termini tra cui l'accelerazione di gravità, e le forze di attrito tra le particelle d'aria (meglio definite come forze dissipative). Le osservazioni dimostrano che il cambiamento di pressione con l'altezza è proporzionale a  $-\rho g$ . Si osserva inoltre che la dimensione orizzontale dei cicloni atmosferici è di almeno due ordini di grandezza maggiore del loro sviluppo verticale (ossia circa 1000 km contro 10 km) e che i moti prevalenti sono quelli orizzontali. In relazione a questo, l'accelerazione verticale dell'aria

#### Il metodo scientifico

A partire da Galileo Galilei (1564-1642), invero considerato il primo scienziato moderno, ci si rese conto che l'osservazione dei fenomeni naturali unita alla sintesi matematica permetteva di riassumere in poche leggi fondamentali il variegato dispiegarsi della molteplicità, solo apparentemente disordinata ed inafferrabile, della realtà fisica. Dall'esame di casi più semplici (esempio: caduta libera dei corpi), fino alla descrizione dei fenomeni più complessi e caotici come il regime turbolento dei fluidi, la comprensione dei fenomeni naturali è migliorata attraverso i secoli, uscendo dall'ambito ristretto dei laboratori per essere applicata alla conoscenza dell'intero universo: le leggi di natura valide per il nostro mondo sono le stesse ovunque, e possono essere verificate (o meglio falsificate) da chiunque possiede le conoscenze di base necessarie. Il linguaggio comune a tutte le scienze, ovvero la grammatica con cui è stato scritto il libro della Natura, è la matematica. Il neofita avrebbe necessità di conoscere almeno i rudimenti di analisi matematica per capire il significato delle formule contenute nei modelli. Sfortunatamente è necessario un lungo e faticoso periodo d'istruzione per raggiungere una comprensione appena sufficiente della matematica coinvolta nei processi fisici che stiamo discutendo. Abbiamo comunque cercato di comprendere in una sezione di questo articolo almeno alcune equazioni contenute nei modelli e abbiamo incluso in un glossario alcuni termini specialistici. L'obiettivo minimo che ci proponiamo è quello di dare un'idea della complessità delle equazioni e dei fondamenti matematici, rimandando per una trattazione più approfondita ai testi in bibliografia.

(cioè lungo la componente Z dell'atmosfera) a scala sinottica è di svariati ordini di grandezza inferiore a  $g$ , l'accelerazione di gravità; anche le forze di attrito interno sono trascurabili.

Con queste assunzioni, l'equazione di Navier Stokes che descrive la terza componente del moto si semplifica e diventa:

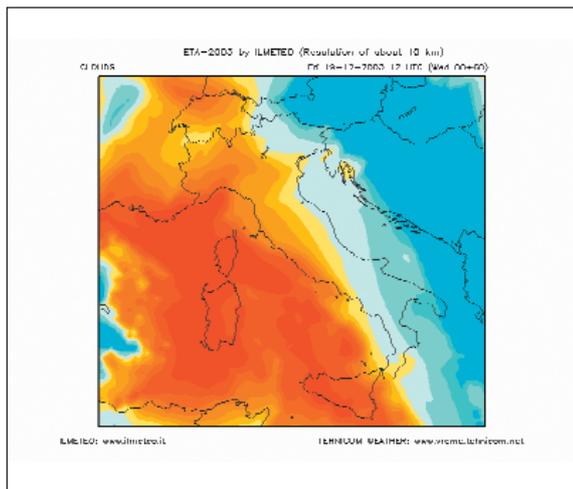
$$\partial p / \partial z = -\rho g$$

ossia l'equazione idrostatica. Essa si interpreta dicendo che il gradiente della pressione verticale (termine a sinistra dell'equazione) è bilanciato esattamente dalla forza di gravità (termine a destra). Si definisce *approssimazione idrostatica* l'insieme delle approssimazioni fatte sinora, e modelli idrostatici sono quelli che la impiegano, in genere tutti i modelli globali e quelli ad area limitata con passo di griglia fino a circa 5 km. Tali modelli derivano la componente verticale della velocità del vento a partire dall'equazione di continuità. Questo modo di trattare le equazioni consente di semplificare i calcoli e accorciare il tempo macchina, ovviamente a scapito della descrizione dei fenomeni violenti in atmosfera a piccola scala, in cui i moti verticali (convezione) assumono importanza cruciale, come i temporali o le trombe d'aria. Per questo nei modelli più fini, con passo di griglia dell'ordine 2-3 km o inferiore, non si esegue tale approssimazione idrostatica, e i modelli sono chiamati per l'appunto *non idrostatici*. Ciò non basta, poiché come abbiamo sottolineato la descrizione più dettagliata dei moti atmosferici deve essere accompagnata da una descrizione anche migliore della microfisica,

adeguata a quanto avviene non solo nelle nubi stratificate ma anche in quelle temporalesche. Pure la parametrizzazione della turbolenza deve essere rivista per adeguarla alla diversa risoluzione, mentre la parametrizzazione della convezione può essere eliminata, se la risoluzione è sufficiente (almeno 1 km circa) per rappresentare esplicitamente tale processo instabile. Un nuovo modello non idrostatico (chiamato MOLOCH) è già in uno stadio avanzato di sviluppo da parte dei ricercatori di Bologna.

#### Limiti dei modelli

Nella sua prima versione della fine anni 1970 il modello del Centro Europeo (ECMWF) aveva un passo di griglia di 180 x 180 km, e fino a metà degli anni 1980 l'intero arco alpino italiano era rappresentato da non più di 3-4 nodi; ciò costituiva necessariamente una grossolana semplificazione. Per fare un esempio Torino e Milano venivano collocate ad un'altitudine di quasi 2000 m e le previsioni sulle città indicavano neve per buona parte dell'anno! Anche se adesso la scala è stata affinata a meno di 40 x 40 km e queste città risultano collocate ad un'altitudine più realistica, questo esempio è utile per allertare il lettore che si accinge ad utilizzare gli output dei modelli. I GM vedranno ogni nube su un punto esteso almeno quanto il quadrato di griglia (fig. 31), che si può intendere come la dimensione minima del pixel di risoluzione del modello. La stessa entità delle precipitazioni che inducono fenomeni alluvionali non è quindi ad oggi quantificabile dai GM. E' per questo che devono essere sviluppati i modelli LAM, che contengono una miglior descrizione delle variabili locali, come



33. **ETA Model** è un modello regionale. Venne sviluppato nel 1978 all'Università di Belgrado da Zavisla Janyic e Fedor Mesinger. Dal gennaio 1979 è operativo al Federal Hydro-meteorological Institute (FH-MI). Alla metà degli anni 1980 Janyic esportò il modello ETA al National Meteorological Center (ora NCEP) negli USA, dove venne implementato con successo dal 1993. Oggi il modello è usato in più di 20 istituti di meteorologia nel mondo e in 5 paesi è utilizzato per la previsione operativa. ETA 2003 è la versione di ETA model modificata da Ivan Ristic e Antonio Sanò, operativo sull'Italia. ETA 2003 è un modello idrostatico ad area limitata con risoluzione di circa 10 km (previsti 6 km entro il 2004); è inizializzato con i dati del modello globale GFS con due Run giornalieri alle ore 00 e 12 UTC e fornisce previsioni fino 144 ore (www.ilmeteo.it, www.westwind.ch).

l'orografia del terreno e una trattazione fine dei fenomeni micro-fisici. Come però è facilmente intuibile, bisogna porre dei limiti precisi nella descrizione fine e dettagliata delle caratteristiche geografiche poiché queste parti del programma richiedono grandi risorse di calcolo, magari a scapito di altre parti più critiche, per cui molti compromessi e tagli si rendono necessari nel momento della definizione finale del modello. Anche se oggi si è abbastanza concordi nell'affermare che ci possiamo spingere fino a 5÷6 giorni nel definire delle previsioni affidabili, rimane sempre nel pubblico la richiesta di aver con molto più anticipo le condizioni meteo al fine di programmare al meglio le proprie attività. Abbiamo messo in rilievo le carenze nella disponibilità di dati osservativi distribuiti su tutta la superficie terrestre, e sulla non completa descrizione di tutti quei processi appartenenti al dominio della turbolenza e della microfisi. Tutti questi fattori negativi

**L'obiettivo principale di ogni istituzione di didattica e ricerca meteorologica dovrebbe essere gettare un ponte tra il matematico e l'uomo pratico, ovvero consentire al meteorologo di rendersi conto del valore di una modesta educazione teorica e indurre il teorico a dare ogni tanto un'occhiata alla carta del tempo.** CARL GUSTAV ROSSBY (1934)

aumentano le incertezze previsionali. Esistono tuttavia dei limiti temporali ben precisi per una previsione, che non dipendono nemmeno dalle capacità di calcolo degli elaboratori, dalle approssimazioni numeriche matematiche, dall'incompletezza della descrizione fisica dei fenomeni o dal numero di stazioni meteo distribuite sul pianeta. Ovviamente aumentare il numero e la qualità dei dati osservati ha migliorato di molto le capacità previsionali in questi ultimi anni (si veda al riguardo la fig. 29), tuttavia gli studiosi del campo si accorsero ben presto che oltre più di tanto non ci si poteva spingere. Nel 1963 **Edward Lorenz**, professore al dipartimento di Meteorologia del MIT di Boston, dimostrò che un sistema complesso come quello atmosferico presenta un'altissima sensibilità ai valori iniziali. Troncando il numero di cifre decimali, ad esempio dopo solo la settimana, Lorenz fece notare che le soluzioni dei modelli erano afflitte da notevoli dispersioni nei risultati, e che sarebbe stato impossibile spingersi in previsioni oltre i 10÷15 giorni. Detto in altri termini, la struttura della dinamica dell'atmosfera descritta dall'insieme di equazioni non lineari dei modelli è

molto sensibile a piccolissime variazioni dei dati di partenza, quelli ottenuti dai dati delle stazioni e assimilati mediante la procedura già descritta. E' pertanto un sistema parzialmente caotico.

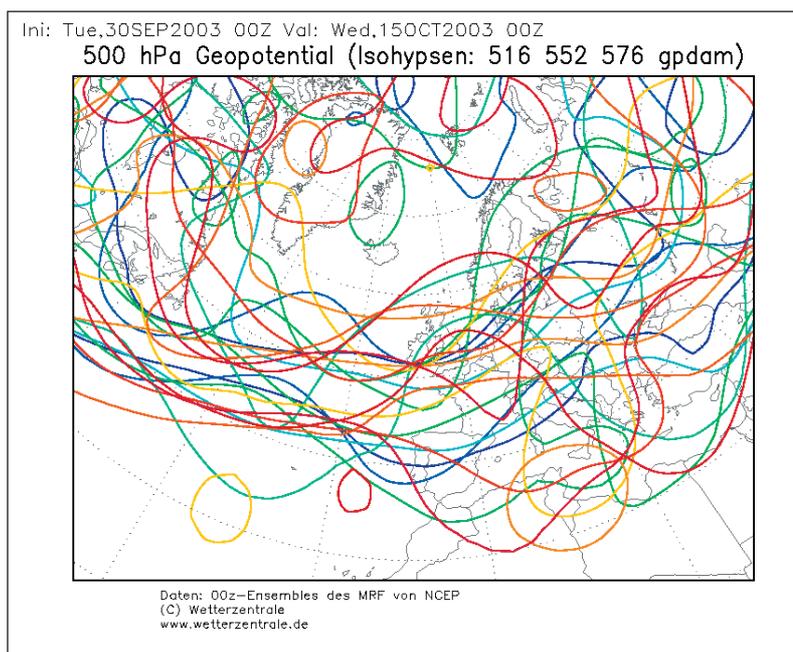
In modo poetico la situazione è sintetizzata dalla famosa battuta che «un battito d'ali di una farfalla in Brasile potrebbe provocare un tornado in Texas». Problemi noti come quello dei «tre corpi» in astronomia o del «doppio pendolo» misero in crisi la visione deterministica del mondo che all'incirca un secolo fa lasciava presupporre che si potesse prevedere lo stato dell'universo in ogni istante futuro conoscendone le condizioni iniziali. Il problema sta proprio nella conoscenza «esatta» delle condizioni, che dovrebbe appunto essere infinita, ma che data la limitatezza dei mezzi a disposizione rimarrà per sempre una mera illusione. E' quindi impossibile determinare le condizioni iniziali con infinito grado di precisione per cui dobbiamo abbandonare l'idea di prevedere il futuro (non solo in campo meteorologico) con largo anticipo, utilizzando i metodi deterministici classici sviluppati sinora.

Possiamo adesso metterci il cuore in pace e sgombrare il campo dalle facili illusioni e magari cercare di rendere ancora più accurato e preciso quello che già si possiede e che rappresenta peraltro un successo non trascurabile.

**La previsione d'ensemble (EPS - Ensemble Prediction System)**

Negli ultimi anni è stato proposto un nuovo metodo di interpretazione dei risultati dei modelli che si avvale di tecniche dinamico-statistiche. Detto in parole semplici, considerata l'instabilità intrinseca delle equazioni dai ri-

**I fisici amano pensare che tutto ciò che si deve fare consiste nel dire: «Queste sono le condizioni; e ora, che cosa accadrà subito dopo?»** RICHARD P. FEYNMAN (1918-1988).



34. Esempio di «spaghetti plot», uno dei prodotti dell'Ensemble prediction, che visualizza la maggiore o minore caoticità delle uscite; in questo caso le isoipse a 500 hPa risultano assai disperse, indicando una previsione a 15 giorni poco attendibile.

### L'assimilazione dei dati: come si determina lo stato iniziale del modello

Tiziana Paccagnella, Area Modellistica Meteorologica - ARPA - SMR Emilia-Romagna

Il primo passo della catena modellistica che porta alla definizione dello stato futuro dell'atmosfera (previsione) è la determinazione dello stato attuale che, ovviamente, è basato sulle osservazioni meteorologiche disponibili nell'area di interesse. Queste provengono da una rete di rilevamento estremamente disomogenea mentre, ai fini dell'analisi, è necessario dare un quadro coerente e completo dello stato dell'atmosfera che, nel caso dei modelli di circolazione generale (GCM), deve estendersi a tutto il globo. L'analisi implica la necessità di propagare l'informazione disponibile in corrispondenza delle stazioni collocate in modo irregolare sul territorio a tutti i punti di un grigliato regolare che ricopra la zona geografica di interesse. I primi tentativi di produrre un'analisi oggettiva, effettuata cioè senza l'intervento umano, risalgono alla metà del ventesimo secolo (PANOFSKY, 1949, GILCHRIST e CRESSMAN, 1954). Dopo una prima fase, nella quale il problema della «propagazione» del dato ai punti di griglia era affrontato con tecniche di pura interpolazione matematica, emerse la necessità di tenere in considerazione le proprietà fisiche e statistiche del sistema con metodologie sensibilmente più complesse. La disomogeneità della rete osservativa, particolarmente evidente sugli oceani e nelle aree scarsamente popolate, ha inoltre reso necessaria l'introduzione nelle procedure di una «stima a priori» del campo che si vuole analizzare: un campo di prima scelta denominato *campo di Back-Ground BG (o First-Guess)*. Il BG ha il compito di fornire comunque una stima del campo meteorologico su tutta l'area e, in presenza di osservazioni, il valore dell'analisi dipende sia dal BG sia dalle osservazioni. Come BG inizialmente venivano utilizzati i dati climatologici ma, col progressivo miglioramento dei modelli, il BG viene ora comunemente estratto da previsioni a brevissimo termine effettuate dal modello stesso. Gli elementi a disposizione per rappresentare lo stato iniziale dell'atmosfera tramite procedure di analisi, sono quindi essenzialmente due: le osservazioni e il BG. Questi due elementi devono poi essere utilizzati in modo ottimale tenendo in considerazione le loro proprietà statistiche e le leggi fisiche che regolano il comportamento del sistema. Un metodo di analisi a lungo utilizzato, ed impiegato tuttora presso molti centri meteorologici, è il metodo dell'*Optimal Interpolation* (GANDIN, 1963) che ha rappresentato un notevole avanzamento concettuale rispetto alle precedenti metodologie basate sul metodo alle *Correzioni Successive* (BERGTHORSSON & DOOS, 1955; CRESSMAN

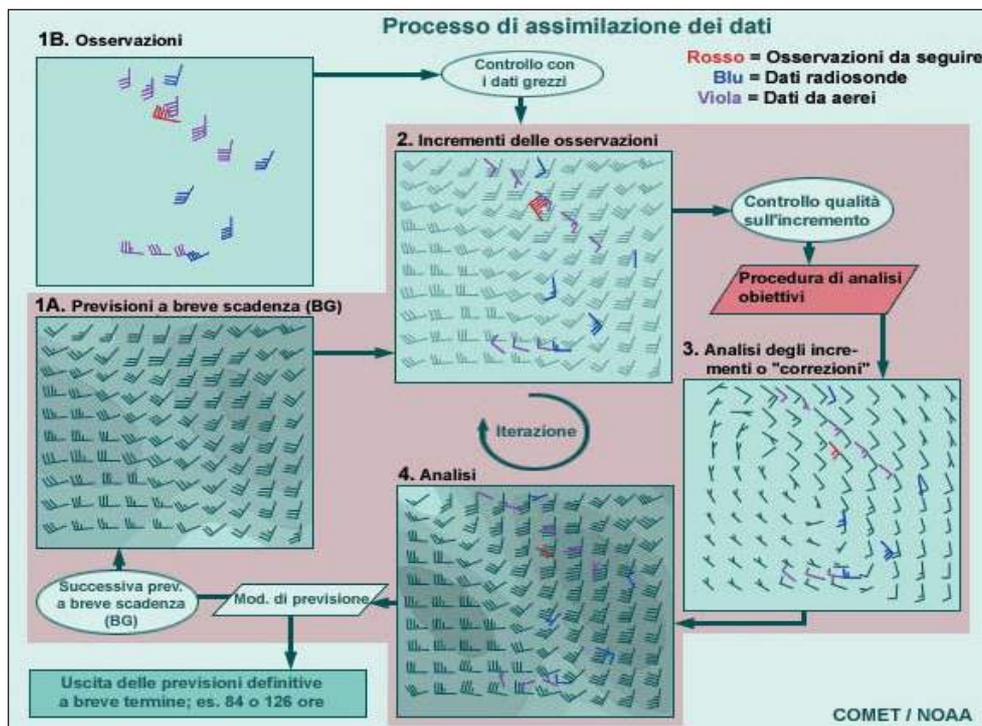
1959)). La formula di base utilizzata dai due metodi è simile:

<b>Differenza</b> tra il valore analizzato su un punto griglia e il campo di prima scelta sullo stesso punto.	=	<b>Somma pesata</b> delle differenze tra il valore osservato sulle stazioni ed il campo di prima scelta sulle stesse stazioni ( <i>innovazione</i> ).
---	---	---

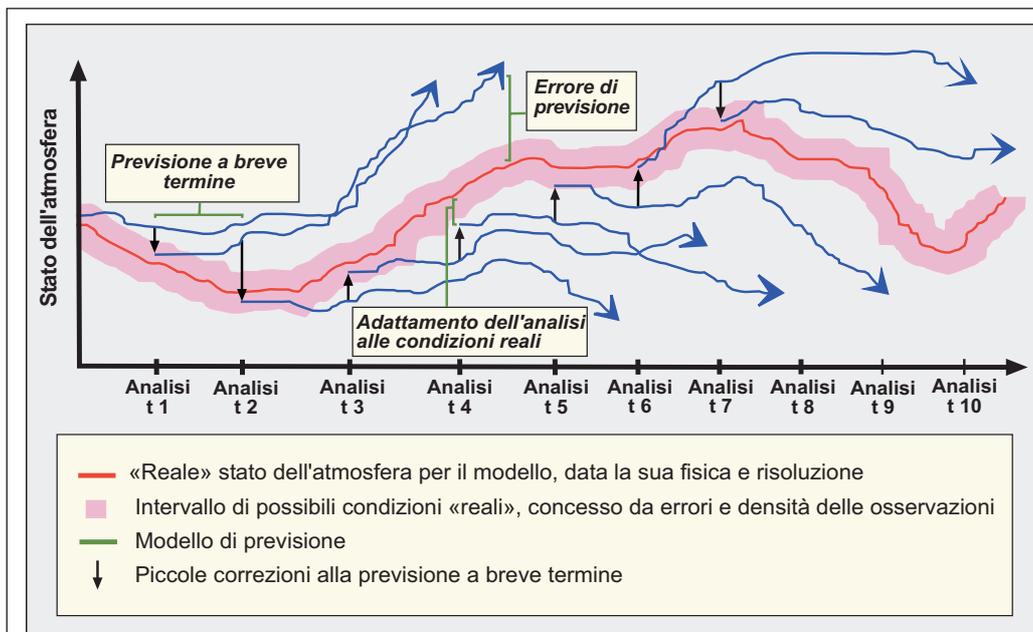
Esemplificando: in una località X si vuole conoscere la temperatura, in assenza di un termometro.

- 1) Si considera il valore climatologico della temperatura della località e in un certo numero di punti circostanti Y, per i quali sono disponibili osservazioni.
- 2) Si calcolano le differenze tra le temperature misurate dalle stazioni ed il valore climatologico corrispondente (questa differenza viene comunemente denominata *innovazione* in quanto è l'innovazione apportata dall'osservazione rispetto alla stima precedente data dal campo di prima scelta).
- 3) Si stima la differenza tra la temperatura effettiva rispetto al valore climatologico nella località X in base ai valori dell'innovazione nelle località Y.

Il problema dell'analisi si traduce quindi nel problema della determinazione dei pesi da utilizzare quando si vogliono combinare i valori delle innovazioni disponibili sulle stazioni. Nei metodi alle *Correzioni Successive* la determinazione dei pesi viene fatta a priori cercando di far «pesare» di più informazioni che provengono da stazioni vicine rispetto a quelle fornite da stazioni distanti. Il termine *Correzioni successive* deriva poi dal modo iterativo nel quale l'innovazione viene inserita nell'analisi. Il processo viene infatti reiterato più volte utilizzando come BG, ad ogni passo, l'analisi ottenuta al passo precedente. La semplicità del metodo presenta notevoli vantaggi ma pone anche dei limiti per ciò che concerne la qualità del risultato. I pregi di uno schema tipo *Optimal Interpolation* (OI) sono parecchi ma, per poterli dettagliare, sarebbe necessario affrontare aspetti tecnici non banali. Cercando di riassumere i vantaggi in un unico concetto, la superiorità di OI sta nel fatto che la definizione dei pesi viene fatta minimizzando l'errore dell'analisi in ogni punto di griglia ed utilizzando le proprietà statistiche del campo (metodo dei minimi quadrati). Il metodo tiene inoltre in considerazione l'eventuale disomogeneità della rete osservativa diminuendo automaticamente il peso dell'informazione derivante da stazioni fortemente correlate tra di loro. Il progressivo miglioramento delle tecniche di analisi, l'utilizzo delle proprietà sta-



35. Schema riepilogativo di un possibile processo di **assimilazione dati**. Sia le osservazioni reali (1b) sia la previsione a breve termine (3 o 6 ore, 1a) emessa al precedente «run» concorrono all'inizializzazione del modello numerico. L'analisi delle cosiddette «innovazioni» (2.) (differenza tra l'osservazione reale e il campo di back-ground (BG), in questo caso fornito dalla previsione a breve termine) permette di apportare piccole correzioni alla previsione stessa, che si assume essere di buona qualità (3.), e inizializza e il modello per il nuovo «run». Ad esempio: le condizioni iniziali di analisi (4.) per un «run» delle h 12 UTC sono fornite dalla correzione della previsione a 3 ore emessa alle h 09 UTC, basata sulle osservazioni reali ricevute in un periodo di 3 ore intorno alle h 12 UTC. Da questo processo prenderà avvio una nuova previsione (1a) e un nuovo ciclo. Il fatto che la previsione a breve termine sia di buona qualità è un'assunzione fondamentale per il processo di assimilazione dati. Fonte: NOAA, Progetto didattico COMET. <http://meted.ucar.edu/>



36. *Correzione progressiva dei risultati di un modello. Ad ogni «run» la precedente previsione a breve termine (freccie blu) viene leggermente corretta (freccie nere) tramite le osservazioni strumentali, per alimentare una nuova inizializzazione. Poiché non è possibile conoscere esattamente la situazione reale (linea rossa), a causa dei limiti oggettivi della rete di misura, l'analisi ricadrà in un suo intorno di «possibili» condizioni reali (area rosa). In sostanza, quando le osservazioni indicano che il modello sta divergendo dalla realtà, questa procedura permette di riportarlo all'interno del range di «verità» per la nuova inizializzazione. Se la divergenza è notevole, le correzioni non saranno sufficienti, e questo si rifletterà in una cattiva previsione. Fonte: NOAA - Programma didattico COMET.*

<http://meted.ucar.edu/>

tistiche del sistema, la possibilità di disporre di campi di prima scelta sempre più accurati hanno fatto evolvere il concetto di analisi in quello di *Assimilazione Dati*. La parola assimilazione rende bene l'idea di un sistema in grado di utilizzare il dato al meglio, combinandolo in modo ottimale con le altre informazioni disponibili. Bisogna infatti tenere in considerazione che, qualora l'analisi sia funzionale all'inizializzazione di un modello numerico, è necessario che il processo di analisi onori i dati osservativi ma, nello stesso tempo, produca una condizione iniziale idonea ad essere correttamente interpretata dal modello. Pur essendo i modelli dei sofisticati simulatori dell'atmosfera, rappresentano comunque una versione approssimativa di una realtà che si manifesta grazie ad un numero di gradi di libertà non interamente replicabili nei modelli. Il ciclo di assimilazione dati comune a molti centri è stato basato, negli ultimi decenni, su schemi di assimilazione «intermittente»: il modello numerico viene inizializzato dall'analisi effettuata ad un certo istante di tempo ed esegue una integrazione numerica (previsione) di poche ore (tipicamente  $\Delta T = 6$  ore). Questa integrazione viene presa come BG per l'analisi successiva che inizializza una ulteriore corsa del modello e così via (fig. 35). Questo schema di assimilazione è tuttora operativo presso molti centri/servizi meteorologici internazionali ed è stato operativo presso il Centro Meteorologico Europeo di Reading (ECMWF) fino al Gennaio 1996. Durante gli ultimi decenni le potenzialità osservative sono sensibilmente aumentate, soprattutto grazie alla disponibilità delle osservazioni da satellite, ma l'utilizzo di dati «non convenzionali» ha richiesto la formulazione di schemi di analisi in grado di beneficiare di tale nuova tipologia di dati. I dati da satellite sono classificati come «non convenzionali» in quanto non misurano le comuni variabili atmosferiche, quali vento, umidità e temperatura, ma misurano grandezze fisiche differenti e legate in modo non semplice ai normali parametri meteorologici che costituiscono le variabili dipendenti dei modelli (le variabili descritte dalle equazioni). In particolare, i satelliti misurano una quantità fisica denominata radianza ( $W/m^2$ ) espressione dell'energia emessa (nell'unità di tempo e di superficie) verso lo spazio dal sistema Terra-Atmosfera in un certo intervallo spettrale (intervallo dello spettro elettromagnetico). L'utilizzo di dati di radianza da satellite in schemi tipo *Optimal Interpolation*, richiede la preliminare ricostruzione di un profilo verticale di temperatura che traduca il dato non-convenzionale in un dato convenzionale. Sfortunatamente la qualità del dato di temperatura così ricostruito è sensibilmente inferiore alla qualità di un dato da radiosondaggio; il beneficio associato all'utilizzo di tali dati si limita quindi alle zone prive di osservazioni convenzionali. Questo problema, unito al fatto che sono oramai disponibili parecchi dati «asincroni» (cioè non tutti allo stesso istante di tempo), ha dato l'avvio ad un nuovo approccio metodologico definito *Analisi Variazionale* (SASAKI, 1970). Anche se dal punto di vista della deduzione teo-

rica OI e 3DVAR (Analisi Variazionale tri-dimensionale) sono riconducibili ad un comune punto di partenza, le potenzialità applicative dei due schemi sono sostanzialmente differenti anche in considerazione delle molteplici approssimazioni necessarie nell'implementazione di uno schema di OI. L'analisi variazionale è sempre basata sulla combinazione di osservazioni e BG ma tale combinazione viene effettuata cercando di ottimizzare la procedura su tutta l'area di interesse con la possibilità di inserire direttamente i dati non convenzionali. Tecnicamente questo viene effettuato «minimizzando» un *funzionale* (detto *cost function*) e con la possibilità di inserire dei vincoli dettati dalle leggi fisiche che sono alla base dei moti atmosferici. Recentemente presso alcuni centri, tra cui ECMWF, sono state avviate procedure di assimilazione dati variazionali di tipo quadrimensionale (4DVAR; ECMWF è passato a 3DVAR nel Gennaio 1996 e a 4DVAR nel Novembre 1997). 4DVAR non è altro che una estensione di 3DVAR che si differenzia solo nella definizione del funzionale (*cost function*) da minimizzare. La *cost-function* viene infatti calcolata tenendo in considerazione contemporaneamente tutte le informazioni disponibili all'interno di una certa finestra temporale. In sostanza la 4DVAR produce la condizione iniziale per il modello che, combinando all'istante iniziale BG ed osservazioni, darà all'interno di una certa finestra temporale, la corrispondenza ottimale con le osservazioni. Come considerazione generale si può dire che 4DVAR è l'approccio tecnicamente più indicato in termini di qualità ma, senza dubbio, le risorse di calcolo e di sviluppo necessarie lo rendono proibitivo per servizi meteorologici di piccole dimensioni.

#### Bibliografia:

- CRESSMAN G., 1959: *An operational analysis system*, Mon. Wea. Rev. 87:367-74.
- GANDIN L., 1963: *Objective analysis of meteorological fields* (Leningrad:Gridromet). English translation (Jerusalem: Israel Program for Scientific Translation), 1965.
- GILCHRIST B. e CRESSMAN G., 1954: *An experiment in objective analysis*, Tellus 6:309-18
- PANOFSKY H., 1949: *Objective weather-map analysis*, J. Appl. Meteor. 6:386-92
- SASAKI Y., 1970 a: *Some basic formalism in numerical variational analysis*, Mon. Wea. Rev. 98:875-83.
- SASAKI Y., 1970 b: *Numerical variational analysis formulated under the constraints as determined by longwave equations and a low pass filter*, Mon. Wea. Rev. 98: 884-98.
- SASAKI Y., 1970 c: *Numerical variational analysis with weak constraint and application to surface analysis of severe storm gust*, Mon. Wea. Rev. 98: 899-910.
- Per una trattazione scientifica esaustiva sul problema dell'Analisi dei dati meteorologici:
- DALEY R., 1991: *Atmospheric Data Analysis*, Cambridge Atmospheric and Space Science Series.

sultati di Lorenz, si fa girare il modello più volte di seguito variando ogni volta un determinato set di condizioni iniziali inserendo volutamente degli errori casuali nell'intorno dei punti assegnati. Il risultato di questa operazione si riassume in una «nuvola» statistica di soluzioni. Alcuni anni fa è stato introdotto un nuovo tipo di carte meteorologiche chiamato in gergo *spaghetti plots*, che rende bene l'idea dell'ammasso apparentemente disordinato di curve di livello (tipicamente geopotenziale alla superficie di 500 hPa) ottenuti in uscita da un *ensemble* di previsioni numeriche. In genere questi esercizi di previsioni multiple sono svolti riducendo la risoluzione del modello, per velocizzare i tempi di calcolo. Laddove i risultati sono simili e quindi si addensano, può significare che la previsione ottenuta è più robusta, cioè ha un grado di affidabilità statistico più elevato, mentre le soluzioni che si presentano come casi isolati saranno considerate meno probabili (fig. 27, 28, 30 a - b). I previsori in genere utilizzano questo criterio per valutare il grado di affidabilità di una previsione che si presenta incerta: vanno a vedere i risultati della previsione d'ensemble per assegnare un'incertezza più o meno elevata alla situazione.

In generale la previsione d'ensemble conferma la teoria secondo la quale col passare dei giorni la previsione diventa inaffidabile. Attualmente il centro europeo esegue ogni giorno 51 previsioni diverse a bassa risoluzione (255 armoniche, griglia di 80 x 80km su 40 livelli in altezza) simulando incertezze sia sui valori iniziali sia sui parametri di modello. Uno dei più importanti studiosi su questo tema, autore di contributi fondamentali ed insignito per questo di un prestigioso riconoscimento internazionale è l'italiano Roberto BUIZZA, oggi ricercatore presso l'ECMWF.

### Miglioramenti possibili nei modelli futuri

Nel campo dei modelli atmosferici e più in generale nello sviluppo del software, vi è una continua evoluzione. Anche i limiti tecnologici relativi allo sviluppo di nuovi tipi di microprocessori si sono spostati sempre più avanti, nella direzione di una maggior potenza di calcolo e riduzione del tempo macchina necessario. Naturalmente lo sviluppo di processori sempre più veloci consentirà di realizzare modelli meteorologici sempre più sofisticati.

Bisogna tenere conto di una difficoltà intrinseca sempre presente, e cioè quella di creare una previsione su una singola località a partire dagli output dei modelli. Infatti l'utente tipico è interessato alla temperatura vicino al suolo, alla nuvolosità, alla stima del-

le precipitazioni, alla nebbia, ma queste variabili non sempre sono disponibili all'uscita dei modelli; più spesso esse devono essere interpretate o derivate mediante schemi appositi. Da qui si inserisce il fondamentale apporto del previsore locale, che sa interpretare i dati e li traduce nel giusto contesto territoriale.

Pur con i limiti intrinseci descritti precedentemente, si può dire che negli ultimi dieci anni sono stati molti gli sviluppi della modellistica meteorologica, ma che c'è tuttora spazio per possibili miglioramenti, soprattutto nella descrizione fisica, nell'assimilazione dei dati, nell'interpretazione dei risultati. Tra le possibili linee di sviluppo vogliamo quindi citarne alcune che ci sono parse tra le più promettenti.

In primo luogo può e deve essere migliorata la descrizione dei *flussi di superficie* (strato limite, implementazione di schemi di trattazione dei processi che avvengono nel suolo, effetti della vegetazione, interazione aria-mare). Poi ci sono tutti i *processi microfisici* rilevanti per la convezione umida, e ancora una migliore *parametrizzazione della turbolenza*. Si sente l'esigenza di associare agli output di uscita dei modelli un criterio quantitativo di affidabilità, omogeneo per tutti, in modo da facilitare sia il lavoro del previsore sia la lettura da parte del pubblico allo scopo di limitare quanto più possibile gli errori di errata interpretazione dovuti a fattori soggettivi. Per intenderci sarebbe auspicabile che venissero eliminate dal gergo espressioni poco precise e dubitative, per essere affiancate con valori quantitativi fondati sull'analisi statistica, esperimenti un calcolo probabilistico. Abbiamo già citato la promettente linea dell'ensemble e a questo proposito si vuole aggiungere la cosiddetta ipotesi del «multi-model ensemble», che significa il confronto dei risultati multipli non più ricavati da uno stesso modello, ma da più modelli diversi tra loro. Già oggi i più grandi centri meteorologici fanno girare contemporaneamente più modelli all'interno dei calcolatori, e un criterio di analisi è quello di rielaborare i diversi output mediante sofisticati criteri statistico-dinamici. Supponendo che tutti i modelli siano stati sviluppati in modo più o meno indipendente, eventuali errori potrebbero essere compensati dal confronto. Emergerà quindi una previsione ottimale, intesa come risultato di rielaborazione di tutte le previsioni effettuate. Studi molto recenti sembrano dimostrare che così facendo si possono ottenere stime migliori degli eventi meteorici, ma comunque sono necessarie ulteriori conferme in merito.

Un'altra possibile via di miglioramento è quella di operare a livel-

lo di assimilazione dati, integrando osservazioni provenienti da radar e da satellite, visto che i dati provenienti dalle stazioni a terra comunque non possono coprire tutte le necessità.

Un'ulteriore via di sviluppo cui accenniamo, anche se meriterebbe molto più spazio per una trattazione più approfondita, riguarda l'accoppiamento dei modelli atmosferici con quelli oceanici (AOGCM). Dato che l'inerzia delle dinamiche dell'oceano è di gran lunga superiore a quella dell'atmosfera, si è finora scarsamente tenuto conto delle variabili marine e dell'influenza che esse possono avere sul fluido sovrastante. Negli ultimi anni si è capito che le due dinamiche sono strettamente legate tra loro, e che insieme possono avere influenza sui fenomeni meteorologici a scala continentale. Peccato che siano ancora pochi i modelli che accoppiano gli effetti oceano / atmosfera, ed il motivo va ricercato nell'esigenza stringente di tenerne conto in tempo reale: dal momento che i modelli sono prognostici e necessitano dei dati al «contorno» previsti, occorre sviluppare modelli accoppiati che ad ogni *time-step* calcolino i dati e li forniscano all'altro modello (esempio: leggo il valore SST (*Sea Surface Temperature*) al tempo *t* e calcolo la radiazione al tempo *t+dt*, la fornisco al modello di oceano che mi dà la nuova SST al tempo *t+dt* e così via). Il centro europeo impiega il modello WAM, che è un modello per il calcolo dell'altezza delle onde del mare sviluppato dai colleghi del CNR di Venezia, in modo accoppiato al modello atmosferico dell'ECMWF. Il lettore forse sarà a conoscenza di alcuni fenomeni oceanici che hanno influenza sulla dinamica generale dell'atmosfera, come ad esempio «EL NIÑO», spesso citato a sproposito o esagerando, nel senso di estendere la sua influenza diretta fino al continente europeo. Alcuni studiosi affermano che una migliore comprensione delle dinamiche accoppiate oceano-atmosfera consentirà in un certo senso di aggirare la barriera della previsione deterministica a medio termine, con l'obiettivo di arrivare alla previsione stagionale, tramite il calcolo della probabilità di variazioni anomale dei parametri rispetto alle medie su lungo periodo. Per intendersi ciò significa che si tenderebbe a fornire delle previsioni di massima con qualche mese d'anticipo e su aree geografiche vaste, su parametri quali temperatura e piovosità. Anche senza indicare le quantità esatte di precipitazioni e il giorno preciso in cui esse avverranno, ciò potrebbe indubbiamente costituire un progresso notevole, con benefiche ripercussioni su tutte le attività umane. Tuttavia molti studiosi, e tra que-

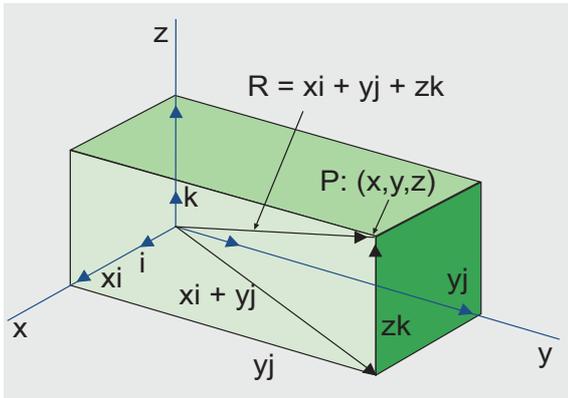
37. Schema per la comprensione del concetto di derivata (vedi testo).

sti sia Buzzi che Cassardo, esprimono forti dubbi sulla validità di questi metodi, che al momento non sono ancora maturi per la diffusione operativa. Pertanto tutte le «previsioni climatiche» vanno prese in senso statistico, ossia come un'indicazione sulla climatologia passata che però non ha e non può avere nessuna valenza previsionale. Per fare un paragone, se dico che nei 100 anni precedenti statisticamente in 60 casi su 100 nella città X il giorno Y la temperatura è stata compresa tra 13 e 15 °C, questo non vuol dire che anche nell'anno in corso la temperatura sarà compresa in quell'intervallo o che avrà il 60% di probabilità di rientrarvi.

Per concludere quest'ultima carrellata sui possibili sviluppi futuri, vale la pena menzionare l'estensione delle previsioni meteorologiche al più vasto ambito delle previsioni ambientali. Le previsioni meteorologiche saranno una sola componente di un sistema integrato di previsioni ambientali che includerà variabili atmosferiche, oceanografiche, biologiche e idrologiche.

Il campo più vasto delle previsioni ambientali costituisce una delle sfide di questo secolo, e potrà avere un forte impatto sullo sviluppo della nostra società.

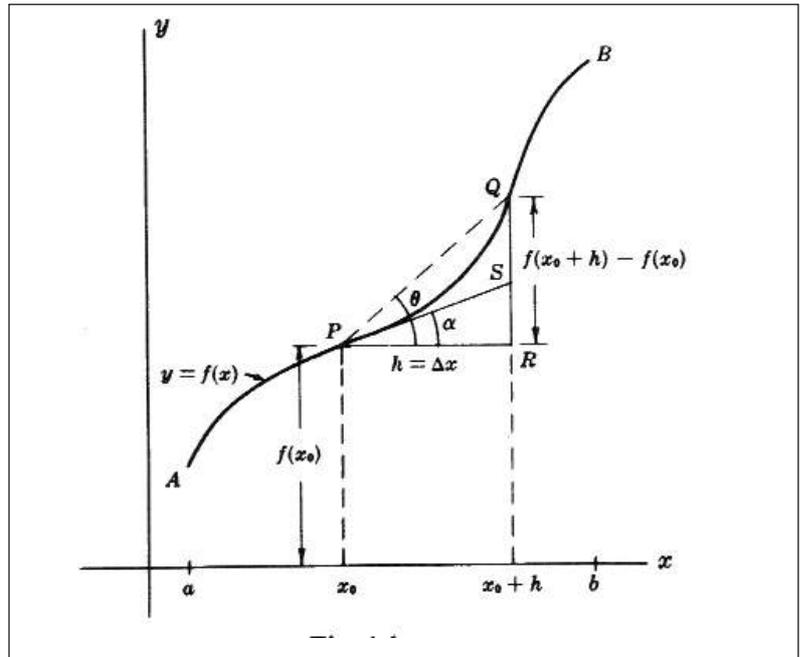
38. Schema esemplificativo per la comprensione del concetto di vettore (vedi testo).



### DAL CONCETTO DI VETTORE ALLE EQUAZIONI DI NAVIER-STOKES: UN TENTATIVO DI FAMILIARIZZARE CON LA MATEMATICA DEI MODELLI METEO

Nella risoluzione di problemi scientifici ed ingegneristici ci si imbatte, di solito in equazioni difficili da comprendere. In questa parte dell'articolo, faremo un tentativo semplificato di approccio all'analisi matematica, portando come esempio alcune delle principali equazioni utilizzate nei modelli di previsione atmosferica.

Probabilmente qualche lettore



più esperto storcerà il naso di fronte a certe semplificazioni, tuttavia pensiamo che alcuni concetti fondamentali possano essere resi comprensibili da chiunque possieda un minimo di interesse per la materia, e voglia fare qualche sforzo per andare un pochino oltre e almeno capire quale profondità di pensiero si cela dietro le colorate mappe meteo.

Tutti i lettori considerino sempre che non esistono facili scorciatoie, e che occorrono numerosi anni di seri studi per raggiungere una conoscenza approfondita in campo scientifico. La comprensione del formalismo matematico rappresenta una delle tappe più importanti di questo viaggio affascinante.

#### Concetto di vettore

In fisica esistono quantità caratterizzate da intensità, direzione e verso, come ad esempio lo spostamento, la velocità, la forza o l'accelerazione. Per rappresentare queste quantità si introduce il concetto di vettore come un segmento di retta orientato

$$OP=R$$

$$R= x i+y j+z k$$

in cui abbiamo scomposto il vettore lungo le componenti degli assi x, y, z (**i**, **j**, **k** sono i vettori unitari - detti versori - lungo le direzioni degli assi). I vettori si indicano con lettere in grassetto o lettere con una freccia su di esse.

#### Il concetto di derivata

Nelle equazioni di Navier-Stokes compaiono numerosi termini del tipo

$$\partial/\partial x; \partial/\partial t$$

(si legge *de su de x; de su de t*) che rappresentano altrettante *derivate parziali* di funzioni matematiche. Per intuire cosa esse significano, iniziamo riferendoci

per semplicità al caso di una sola dimensione.

La curva disegnata in fig. 37 è un tratto appartenente alla funzione matematica  $y=f(x)$  [che si legge: «y uguale a f di x»]. Per ogni valore della variabile indipendente x sull'asse delle ascisse, è definito un insieme di punti y, tali che il valore dell'ordinata y è il risultato dell'operazione matematica espressa dalla relazione che lega x con y. Ad esempio la funzione  $y=2x^2-1$  è l'equazione di una parabola con la concavità verso l'alto che intercetta l'asse delle ordinate nel punto  $y=-1$  (per esercizio si provi a sostituire ad x un insieme di valori, negativi e positivi, calcolare il corrispondente valore y e quindi mettere sul grafico queste coppie di punti). Si può usare una notazione che sfrutta il pedice del carattere. Siano quindi  $y_0, y_1, y_2, y_3$  ecc... i valori della funzione e calcolati nei punti  $x_0, x_1, x_2, x_3$ , ecc...

Sia h un valore corrispondente ad un incremento  $\Delta x$  qualsiasi. Sia  $y_0=f(x_0)$  il valore della funzione y per  $x = x_0$ ; al valore  $x=x_0+h$  corrisponderà evidentemente un valore della funzione  $y_{0+h}=f(x_0+h)$ . Potremmo unire i due punti così ottenuti sulla curva, ottenendo il segmento di retta (P-Q). Se si prende h sempre più piccolo, ossia sempre più vicino ad  $x_0$ , tale segmento approssimerà sempre meglio la tangente alla curva nel punto  $x_0$ . Particolare rilevante assume il rapporto incrementale  $[f(x_0+h)-f(x_0)]/h$ , che al limite per h tendente a zero, costituisce il valore della derivata nel punto  $x_0$ . La misura esatta di tale valore costituisce proprio la pendenza della tangente nel punto  $x_0$  e si indica con l'espressione  $dy/dx$  [che si legge: «de y su de x»]. Tanto maggiore è il valore della derivata, tanto più forte è la «ripidezza» di questa retta, ossia il tasso

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right)$$

in cui i coefficienti di Fourier  $a_n$  e  $b_n$  sono

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx \\ b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Il simbolo  $\sum_{k=1}^{\infty}$  [che si legge: "somma per n che va da uno ad infinito"] indica l'operazione di sommatoria;

Il simbolo  $\int_{-L}^L$  [che si legge: "integrale tra meno elle ed elle"] indica l'operazione di integrazione;

39 a. b. Analisi di Fourier (vedi testo).

di variazione della funzione y. In questo esempio abbiamo supposto y funzione della sola variabile x. Quando la derivata opera sull'unica variabile indipendente, ci si riferisce ad essa come *derivata totale*. Più in generale una funzione y può essere espressa attraverso valori di più variabili indipendenti, come ad esempio  $y=f(x,y,z,t,\dots)$  significa che la variabile dipendente y assume valori diversi in corrispondenza di valori diversi di ciascuna delle tre coordinate spaziali x,y,z, il tempo t ecc.... Adesso la derivata rispetto alla variabile x è solo una delle possibile derivate ottenibili, per cui in questo caso si dice che la derivata è *parziale* e si usa la notazione

$$\partial y / \partial x$$

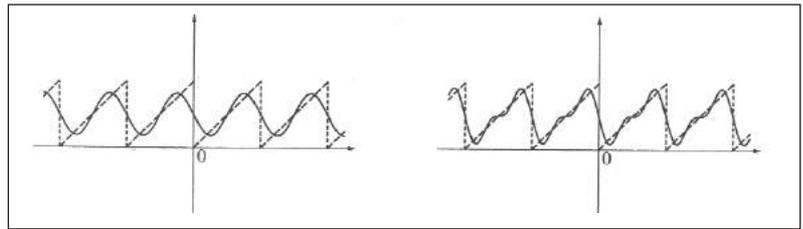
[che si legge come prima: "de y su de x", ma si noti il simbolo diverso

$$\partial$$

al posto di d]. Si consideri come esempio la variabile temperatura. Ad ogni punto dello spazio, ad esempio la stanza in cui state leggendo questo articolo, immaginiamo di associare un preciso valore di temperatura. Detta T la temperatura, si può cioè scrivere  $T=f(x,y,z)$  in cui x, y e z sono le coordinate del punto all'interno della stanza in termini di larghezza, profondità, altezza dal pavimento, f è la relazione che lega le coordinate di spazio al valore di temperatura, e in generale è una funzione complicata, poiché ad esempio vi possono essere turbolenze all'interno della stanza dovute alle finestre aperte, oppure ai termosifoni accesi.

Potremmo magari decidere di fare una stima di f, organizzando una campagna di misura ponendo termometri in punti ben stabili e raccogliendo questi dati all'interno di una memoria di un computer. Si definisce *campo scalare* la funzione f che abbiamo ricostruito sulla base delle nostre osservazioni. Un campo scalare associa ad ogni punto dello spazio un determinato valore, nel nostro caso la temperatura. Speriamo che questo esempio vi abbia fatto venire in mente qualche cosa di importante, relativamente all'articolo principale!

Se poi oltre alla temperatura fossimo anche interessati alla velocità del vento, ci accorgeremmo che un numero non basta a defi-



nire tutto il contenuto di informazione di cui abbiamo bisogno, poiché dobbiamo anche precisare la direzione ed il verso in cui esso spira. Tutte queste grandezze insieme (intensità, direzione, verso) definiscono un vettore. Un insieme di punti costruito associando un vettore ad ogni punto nello spazio, si definisce campo vettoriale. Nell'esempio appena citato abbiamo definito il campo di velocità del vento  $\mathbf{V}=\mathbf{g}(x,y,z)$  abbiamo usato il grassetto in quanto si tratta di vettori. Per questo scopo avrete tuttavia utilizzato ulteriori sensori all'interno della vostra stanza. Si noti che ogni equazione vettoriale racchiude in realtà in sé tre equazioni, poiché deve essere esplicitata per ciascuna delle componenti degli assi, ( $V_x=g_x(x,y,z)$ ;  $V_y=g_y(x,y,z)$ ;  $V_z=g_z(x,y,z)$  nel nostro esempio).

Immaginiamo che il nostro computer abbia svolto tutte le misure e abbia ricostruito i campi f e g. Verrà spontaneo associare anche la variabile tempo ai campi così definiti, relativo all'istante esatto o presunto in cui queste misure sono state effettuate. In questo modo si potranno compiutamente esprimere le temperature e le velocità del vento come:

$$T=f(x,y,z,t)$$

$$\mathbf{V}=\mathbf{g}(x,y,z,t)$$

Adesso, conoscendo le funzioni f e g ricostruite per punti, saremo in grado di calcolarci utili grandezze impiegate comunemente nei calcoli. Si definisce gradiente di una funzione f, indicato col simbolo

$$\nabla f$$

l'operatore matematico

$$\nabla$$

[che si legge: «nabla»] costituito dalla somma delle derivate parziali rispetto alle componenti spaziali applicato ad un campo scalare. In simboli:

$$\nabla f = (\partial f / \partial x i + \partial f / \partial y j + \partial f / \partial z k)$$

Si noti che questa espressione rappresenta un vettore, espresso tramite i vettori unitari i; j; k lungo le direzioni degli assi x; y; z rispettivamente. Esso indica quanto e come varia il campo nella direzione indicata.

A molti sarà già nota l'espressione gradiente termico, che ha un corrispondente matematico esatto nell'operazione di derivazione. Se il campo scalare f è uniforme lungo una determinata

direzione, ad esempio l'asse z in altezza, la derivata rispetto a quest'asse sarà pari a zero, poiché i due termini a numeratore  $f(z_0+h)$  e  $f(z_0)$  sono uguali, pertanto l'espressione  $[f(z_0+h)-f(z_0)]/h$ , definizione del rapporto incrementale da cui, nel limite h tendente a 0, si arriva alla derivata parziale

$$\partial f / \partial z$$

uguale a zero. All'opposto, a forti differenze di temperature esistenti tra vari livelli, sarà associato un gradiente termico elevato.

In fluidodinamica compaiono numerosi termini formati dall'operatore matematico

$$\nabla$$

in combinazione con campi scalari e vettoriali. E' tuttavia pressoché impossibile esprimere in linguaggio elementare il significato di tutti i termini delle equazioni. Lasciamo ai lettori più volenterosi il compito di approfondire tali argomenti, oggetto di corsi insegnati a livello universitario.

### Analisi di Fourier

Agli inizi del 1800 lo scienziato francese Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), tentando di risolvere un problema di flusso termico che aveva formulato in termini di equazioni alle derivate parziali, fu ricondotto al problema matematico dello sviluppo di funzioni in serie trigonometriche. Tali serie, oggi chiamate serie di Fourier, sono interessanti sia dal punto di vista della teoria matematica, sia per le applicazioni fisiche. A distanza di più di due secoli, la tecnica numerica dell'analisi di Fourier è ampiamente utilizzata nella risoluzione delle equazioni utilizzate nei modelli. La bellezza e potenza del metodo è fondata sulla possibilità di approssimare una funzione qualsiasi mediante sviluppo in serie di seni e coseni.

Il lettore non avvezzo a questi argomenti, potrà comunque percepire lo stesso il significato del metodo, concentrandosi sull'esame delle figure qui sopra. La funzione tipo «dente di sega» indicata in tratteggio, è approssimata da due diverse serie trigonometriche. Praticamente si cerca di approssimare una funzione mediante scomposizioni in funzioni più elementari. E' un po' come se cercassimo di ricostruire una linea complicata nello spazio utilizzando tanti pezzetti curvi. Se



**Claude Louis Marie Henri Navier** (1785, Dijon - 1836, Paris). Matematico francese, allievo di Fourier. Dal 1830 fu professore all'École des Ponts et Chaussées di Parigi, e all'epoca divenne noto per le teorie sulla costruzione dei ponti sospesi. Ma il motivo per cui oggi è maggiormente ricordato è lo sviluppo, nel 1821, delle equazioni della fluidodinamica per un fluido incompressibile.



**George Gabriel Stokes** (1819, Skreen, County Sligo, Ireland - 1903, Cambridge, England). Matematico di origine irlandese, studiò al Pembroke College di Cambridge. Sviluppò indipendentemente le equazioni del moto dei fluidi, ottenendo risultati del tutto analoghi a quelli di Navier, dei quali non venne a conoscenza se non a lavoro ultimato. Pubblicato i risultati nel 1845 in «On the theories of the internal friction of fluids in motion». Oggi il suo nome è indissolubilmente legato a quello di Navier nelle famose equazioni che portano il loro nome.

abbiamo a disposizione un solo pezzo, a meno di essere particolarmente fortunati, non riusciremo che a coprire una limitatissima parte della curva. Se invece aumentiamo e riduciamo le dimensioni dei singoli pezzettini, la risultante sarà un tratto che si avvicina sempre meglio alla nostra soluzione. Nella prima figura a sinistra, la soluzione approssimata è costituita da una semplice somma di due soli termini, mentre a destra da tre termini. Ciò è equivalente a dire che a sinistra si è usata una sola componente o armonica, a destra due armoniche. Come facilmente intuibile, maggiore è il numero dei termini della serie o armoniche utilizzate, migliore è l'approssimazione della funzione. Se quindi sostituiamo le parole «pezzetti di curva» con «funzioni armoniche», ecco che in linguaggio veramente elementare abbiamo descritto l'essenza del metodo. In termini più rigorosi e sotto opportune condizioni, in generale una funzione  $f(x)$  definita in un intervallo  $(-L, L)$ , con periodo  $2L$ , è sviluppabile in serie di Fourier espressa come in fig. 39. Attualmente il modello del centro europeo utilizza ben 511 armoniche nella definizione dei campi scalari e vettoriali meteorologici, ossia

$$\sum_{n=1}^{511}$$

Un numero così elevato di armoniche è indispensabile poiché la funzione che si deve approssimare è molto complicata.

**Criterio di Courant - Friedrichs - Lewy (CFL)**

Nel 1928 i matematici tedeschi Richard Courant (1888-1972) - Kurt Friedrichs (1901-1982) - Hans Lewy (1904-1988) studiarono in modo sistematico la maniera di approssimare le equazioni differenziali con i metodi alle differenze finite, determinando i criteri che devono essere soddisfatti per ottenere soluzioni stabili delle equazioni. Ciò portò alla formulazione del criterio CFL, valido in generale, per la stabilità delle soluzioni numeriche:

$$\alpha \equiv V \frac{\Delta t}{\Delta X} \leq 1$$

Nella relazione sopra, applicata ai modelli atmosferici, i simboli hanno il seguente significato:  $\Delta X$  rappresenta il passo di griglia;  $\Delta t$  è l'intervallo di tempo tra due simulazioni successive, ossia il cosiddetto «Time-Step»;  $V$  è la somma delle velocità del suono e del vento nell'aria;  $\alpha$  è il numero di Courant, e va scelto in modo che i termini della relazione, moltiplicati fra loro, diano come risultato un nu-

**Analizzare il comportamento di un'equazione non lineare come quella di Navier-Stokes è come camminare in un labirinto le cui pareti si riorganizzano a ogni passo.**

JAMES GLEICK (1987)

mero adimensionale minore o uguale a uno (infatti la velocità in unità [spazio/tempo] si semplifica con il tempo a numeratore e lo spazio a denominatore) Prima che tale criterio fosse sviluppato, nei calcoli si generavano disturbi indotti dalla propagazione delle onde acustiche che tendevano ad amplificarsi vanificando la correttezza dei risultati: fu probabilmente questo uno dei motivi per cui il primo modello numerico manuale di Richardson fallì.

**Avvertenza.** Tutte le variabili devono essere sempre prese nelle stesse unità di misura (non si possono prendere come unità di misura una volta km e poi m). Da questo criterio si vede che più piccolo è il passo di griglia, minore deve essere il *time step*, per mantenere il programma stabile. Con l'approssimazione idrostatica (vedi articolo principale) si eliminano le onde sonore che si propagano verticalmente, da cui deriva la più comoda adozione di un *time step* più lungo. Come esempio, il modello del centro europeo con un passo di griglia di 40 km, ha un *time step* dell'ordine della decina di minuti.

**Le equazioni differenziali del moto**

Un modello idrostatico (ovvero nell'ipotesi che la densità sia costante) di definizione del campo di moto si avvale dell'equazione di **Navier-Stokes**, la quale, adottato un sistema di riferimento non inerziale quale è la Terra rotante, può essere scritta in forma vettoriale:

$$\frac{du}{dt} = -2\Omega \times u - gk - \frac{1}{\rho} \nabla p + F$$

Tale equazione è un'applicazione della seconda legge di Newton al fluido atmosferico. Presa una terna cartesiana di riferimento i cui assi sono nominati Est, Nord, Alto, la proiezione dell'equazione di NS sugli stessi fornirà tre distinte equazioni scalari. Nell'ambito dell'approssimazione idrostatica, la componente lungo l'asse verticale (Alto) si riduce alla relazione:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

Spiegazione dei simboli:

- $u, F, \Omega$ , sono vettori.
- $u$  = vettore che esprime la velocità della particella;
- $F$  = vettore che esprime la forza d'attrito per unità di massa
- $\Omega$  = vettore che esprime la velocità angolare della terra
- $\rho$  = densità delle particelle
- $p$  = pressione agente sulle particelle
- $g$  = accelerazione di gravità (9,81 m/s<sup>2</sup>)

**Equazione di continuità**

L'equazione di continuità esprime il principio di conservazione della massa in un fluido. (In assenza di pozzi o sorgenti, la massa che entra in un determinato volume nell'unità di tempo è uguale alla massa che esce).

[si legge: de ro su de t]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot u = 0$$

[si legge: ro per divergenza di u]

I simboli utilizzati hanno lo stesso significato fisico del caso precedente

**Prima legge della Termodinamica**

La prima legge della termodinamica afferma che la variazione di energia interna di un sistema, passando da uno stato iniziale ad uno stato finale, è uguale alla somma algebrica del calore e del lavoro scambiati dal sistema con l'ambiente esterno. L'energia interna rappresenta la somma di tutte le energie delle particelle appartenenti al sistema (cinetica, potenziale, legame, ecc...).

$$U_f - U_i = Q - W$$

Spiegazione dei simboli:

- $U_f - U_i$  è la variazione di energia interna del sistema di particelle;
- $Q$  è il calore somministrato al sistema dall'esterno
- $W$  è il lavoro fatto dal sistema sull'esterno

Come esempio di applicazione, si consideri l'espansione adiabatica di un gas. In questo caso  $Q=0$ ,  $W$  è positivo diverso da zero, pertanto l'energia interna del gas diminuisce. Difatti l'aria, durante l'espansione, si raffredda.

**Equazione di stato dei gas**

L'equazione di stato dei gas stabilisce una relazione fra temperatura, pressione e volume di un gas in equilibrio termodinamico (quando si attende un tempo sufficiente per cui i valori delle grandezze fisiche si stabilizzano).

$$pV = nRT$$

## Il caos e l'effetto farfalla: la rivoluzionaria scoperta di un meteorologo

Nel 1960 Edward Lorenz creò un modello *giocattolo* dell'atmosfera, su un computer a valvole Royal McBee: ogni minuto la macchina segnava il trascorrere di un giorno e stampava sequenze di numeri corrispondenti a cicloni e anticicloni che circolavano in un globo idealizzato. Lorenz traeva piacere dall'osservazione del tempo, cosa non certo necessaria per un meteorologo ricercatore. Egli ne apprezzava soprattutto la variabilità. Gli piacevano le configurazioni che vanno e vengono, famiglie di vortici che obbedivano sempre a leggi matematiche, ma che tuttavia non si ripetevano mai nello stesso modo. Con il suo primitivo computer, Lorenz aveva ridotto il problema meteorologico al suo scheletro più essenziale, ovvero una dozzina di equazioni matematiche che dovevano rigorosamente seguire il determinismo della legge fisica (il determinismo è quella concezione della natura che esclude ogni forma di casualità e ammette solo l'esistenza di leggi fisiche che agiscono secondo rigidi rapporti di cause ed effetti). Eppure, una riga dopo l'altra, negli stampati di Lorenz venti e temperature presentavano modelli ricorrenti ma con disturbi, un disordine ordinato. Un giorno dell'inverno 1961, vo-

lendo esaminare una fase di elaborazione più lunga, Lorenz prese una scorciatoia. Anziché percorrere l'intero passaggio dal principio, cominciò ad esaminarlo a metà. Per dare al computer le condizioni iniziali, introdusse i numeri prendendoli direttamente dallo stampato precedente. Poi andò a prendersi un caffè. Quando tornò, vide qualcosa di inatteso, qualcosa che stava gettando un seme per una nuova scienza. Questa nuova fase di elaborazione avrebbe dovuto duplicare esattamente quella precedente. Eppure quando osservò il nuovo stampato, Lorenz vide le condizioni meteorologiche divergere così rapidamente dall'andamento della fase precedente, che, nel corso di

soli pochi mesi, ogni somiglianza era scomparsa. Avrebbe potuto ottenere lo stesso risultato scegliendo due condizioni di partenza qualsiasi. Il suo primo pensiero fu che fosse saltata un'altra valvola. D'improvviso si rese conto. Non c'era stato alcun errore di funzionamento. Il problema stava nei numeri che aveva introdotto. Nella memoria del computer erano registrati sei decimali: 0,506127. Sullo stampato, per risparmiare spazio, ne apparivano solo tre: 0,506. Lorenz aveva arrotondato, supponendo che la differenza - di un decimillesimo - non avesse alcuna incidenza. D'altra parte il programma utilizzava un sistema di equazioni puramente deterministico. Dato un punto di partenza, il tempo sarebbe seguito ogni volta esattamente nello stesso modo. Dato un punto di partenza leggermente diverso, le condizioni meteo dovevano evolversi in modo leggermente diverso. Un piccolo errore numerico era come un soffio di vento: i piccoli soffi di vento svanivano o si cancellavano tra loro prima di poter modificare caratteri del tempo importanti su vasta scala. Eppure, nel particolare sistema di equazioni di Lorenz, piccoli errori si dimostravano catastrofici. Quel giorno realizzò come la previsione meteorologica a lungo termine fosse impossibile. «Certamente non avevamo mai avuto successo in tale compito, e ora avevamo una giustificazione» disse. «Mi resi conto che qualsiasi sistema fisico che si comportasse in modo non periodico sarebbe imprevedibile». Il tempo è in effetti un sistema caotico. Piccoli errori nelle condizioni iniziali di una previsione crescono rapidamente compromet-

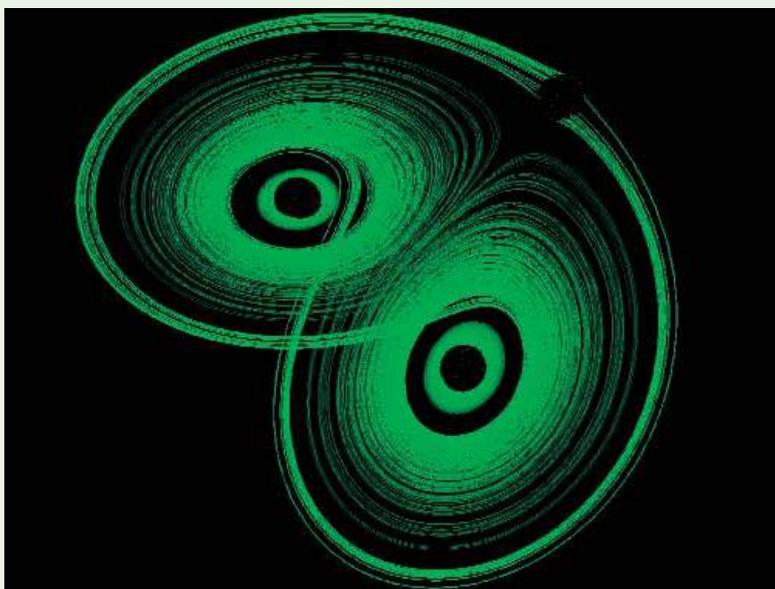
tendo il risultato, così che al di là di qualche giorno anche il miglior modello è destinato a fallire. La ragione di questa condizione era l'*effetto farfalla*, efficace metafora coniata dallo stesso Lorenz in occasione di un intervento che tenne presso l'*American Association for the Advancement of Sciences* a Washington D. C. il 29 dicembre 1979: «Può il battito delle ali di una farfalla in Brasile scatenare un tornado in Texas?»

L'effetto farfalla acquistò un nome tecnico: *dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali*. Una nozione che aveva un posto anche nel folklore:

«Per colpa di un chiodo venne persa una scarpa  
per colpa di una scarpa venne perso un cavallo  
per colpa di un cavallo venne perso un cavaliere  
per colpa di un cavaliere venne persa una battaglia  
per colpa di una battaglia venne perso un regno»

Nella scienza, come nella vita, è ben noto come una catena di eventi può avere un punto di crisi in cui piccoli mutamenti sono suscettibili di ingrandirsi a dismisura. Ma come potevano una tale ricchezza, una tale imprevedibilità - un tale caos - derivare da un semplice sistema deterministico di dodici equazioni? Lorenz si mise al lavoro

e ritrovò questo comportamento complesso addirittura in un sistema di tre sole equazioni. Erano equazioni non lineari (per la precisione le *equazioni differenziali della convezione modificate*), ossia esprimevano rapporti che non erano rigorosamente proporzionali, come avviene invece nelle equazioni lineari. Da queste equazioni Lorenz ottenne una sequenza di punti che definivano una traiettoria continua con una forma di grande complessità: l'*attrattore di Lorenz*. In questa figura il movimento rimaneva sempre entro certi limiti, non uscendone mai, ma neppure diventando ripetitivo. Era una sorta di doppia spirale in tre dimensioni, simile a una farfalla con le ali



40. Le due ali dell'attrattore di Lorenz possono essere considerate come due differenti regimi meteorologici, per esempio uno caldo e umido e l'altro freddo e soleggiato. Il passaggio dall'una all'altra fase può essere determinato da variazioni anche molto piccole dello stato iniziale dell'atmosfera.

aperte. La forma segnalava un puro disordine, dal momento che nessun punto o sistema di punti si ripeteva mai. Eppure segnalava anche una nuova sorta di ordine. Nel 1963 Lorenz pubblicò questo risultato nel *Journal of Atmospheric Sciences*, in un articolo di una decina di pagine intitolato *Deterministic nonperiodic flow*. Nessuno si accorse di quell'articolo. In quegli anni i fisici avevano modi migliori di spendere il loro tempo che quello di setacciare i periodici di meteorologia. Alcuni matematici sarebbero stati entusiasti nell'apprendere la scoperta di Lorenz. Ma Lorenz era un meteorologo, e nessuno pensava di cercare la nuova definizione di caos a pagina 130 del volume 20 del *Journal of Atmospheric Sciences*. Per un lungo periodo l'articolo di Lorenz fu citato dalla comunità scientifica circa una volta all'anno; dopo il 1980 veniva citato più di cento volte all'anno: la scienza del caos aveva finalmente preso il volo. Ma il pessimismo di Lorenz sull'impossibilità di prevedere il tempo a lungo termine è stato in parte ridimensionato grazie alle nuove tecniche di *Ensemble prediction*.

### Bibliografia:

Un eccellente lavoro divulgativo su questo argomento è GLEICK J. (1987) - *Caos*. Rizzoli. 352 p., dal quale si sono tratti gran parte dei contenuti di questo riquadro. Per una trattazione più tecnica, si veda BUIZZA R. (2000) - *Chaos and weather prediction*. ECMWF - Meteorological training course lecture series, [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int).

**Spiegazione dei simboli:**

p	= pressione del gas
V	= volume del gas
n	= numero di moli (una mole rappresenta un'unità di massa numericamente uguale al peso molecolare di una sostanza)
R	= costante universale dei gas perfetti (8.317 10 J/mol K)
T	= temperatura del gas (espressa in Kelvin)

**GLOSSARIO**

Nel presente glossario sono descritti alcuni termini utilizzati nel testo.

**Adiabatica:** Processo o trasformazione termodinamica che si svolge senza comportare scambi di calore tra il sistema fisico in esame e l'ambiente circostante.

**Analisi:** Rappresentazione di una data configurazione atmosferica al tempo considerato, eseguito dopo l'assimilazione dati e l'inizializzazione.

**Avvezione:** processo di trasporto di una proprietà atmosferica mediante il vento. Per esempio il vento sul mare trasporta il vapore acqueo dalla superficie in un altro punto dell'atmosfera. Se l'aria si raffredda il vapore acqueo potrà condensare in gocce d'acqua e rilasciare calore latente. In questo senso il calore è trasferito dal vapore acqueo trasportato col vento.

**Calore latente:** energia consumata o rilasciata durante una variazione di stato di una sostanza senza un contemporaneo aumento di temperatura. Ad esempio l'acqua, evaporando assorbe una quantità di calore che poi restituisce esattamente nel processo inverso di condensazione da vapore acqueo in pioggia.

**Condizioni iniziali:** dati immessi all'ingresso di un algoritmo di calcolo che servono come punto di partenza per i calcoli. Le condizioni iniziali sono generalmente ricavate dalle osservazioni strumentali.

**Condizioni al contorno:** insieme sussidiario di condizioni, vincoli fisici o geometrici a cui le equazioni devono obbedire per tutto il tempo di effettuazione dei calcoli.

**Convezione:** trasporto di calore in un fluido dovuto a movimenti differenziali delle particelle più calde rispetto a quelle più fredde nel fluido stesso.

**Coordinate verticali:** nei modelli atmosferici è importante disporre di un punto di riferimento per stabilire i livelli verticali. Quello più semplice sarebbe identificato dai livelli di pressione, ma non è adatto a risolvere le equazioni in quanto, come accade anche per i livelli di altitudine, interseca in alcune parti il rilievo terrestre, e quindi può talora «scompare». Per risolvere que-

sto problema, Norman Phillips sviluppò nel 1957 una coordinata che segue la forma del terreno, chiamata *sigma*. Un'altra coordinata spesso usata è *eta*, introdotta all'inizio degli Anni 1980 per ridurre gli errori generati dall'uso della coordinata *sigma* nel calcolo della forza di gradiente barico. Il sistema di coordinate *eta*, invece di seguire la pendenza dei rilievi, li riproduce entro ciascun elemento della griglia con una sorta di rappresentazione «a gradini», che permette una migliore modellizzazione degli effetti orografici. Infine esiste anche la *coordinata isentropica theta*, legata alla temperatura potenziale.

**Diabatica:** trasformazione termodinamica che comporta scambi di calore con l'ambiente circostante.

**Equazioni** (abbrev. Eq.): Espressioni matematiche contenenti incognite che devono essere ricavate mediante opportune tecniche. Quando le soluzioni sono ricavabili applicando teoremi o procedimenti esatti, si dice che sono soluzioni analitiche, mentre nel caso contrario non esistono soluzioni analitiche e la soluzione deve essere ottenuta in maniera approssimata, ricorrendo ai metodi numerici basati sulla ripetuta applicazione di calcoli elementari (iterazione).

**Equazioni lineari:** equazioni matematiche che hanno la proprietà implicita di descrivere la risposta ad uno stimolo come proporzionale allo stimolo stesso. Es.: nell'equazione:  $y = 3x + 1$  sostituendo in successione all'incognita  $x$  i valori:  $x = 1; 2; 3$ , otteniamo:  $y = 4; 7; 10$ . Facilmente si può notare che in questo caso la differenza tra i valori di  $y$  è costante, per cui graficamente le soluzioni possono essere rappresentate sul piano  $x-y$  da una retta.

**Equazioni non lineari:** equazioni matematiche i cui termini incogniti compaiono ad esponente diverso da 1. Esempi:  $y = 5x^2 - 4$ ;  $y^3 x^{-1}$ ;  $y = \sin(x)$ . La risposta ad uno stimolo in questo caso non è proporzionale allo stimolo stesso e quindi gli effetti di cambiamenti minimi al sistema possono risultare imprevedibilmente piccoli o grandi. Le equazioni che descrivono gli stati fisici dell'atmosfera (in termini tecnici: equazioni differenziali alle derivate parziali), sono complesse anche perché sono presenti molti termini non lineari. I sistemi cosiddetti caotici, hanno tipicamente una struttura indeterminata nel tempo e nello spazio causa una descrizione dinamica contenente numerosi termini non lineari.

**Funzione periodica:** funzione matematica che si ripete uguale dopo un certo tratto  $T$ , detto periodo.

**Gradiente:** operatore matematico che, applicato ad un campo

scalare, calcola la variazione di una determinata grandezza (es. pressione, temperatura, velocità) per unità di lunghezza nella direzione specificata.

**Inizializzazione:** insieme di procedure complesse che servono a definire le condizioni iniziali in tutti i punti di griglia compresi da un modello, a partire dai dati osservativi delle stazioni meteorologiche.

**Input:** tutto ciò che entra in un calcolatore in termini di dati iniziali, prima di ogni elaborazione.

**Modelli a punti di griglia:** modelli che risolvono le equazioni su punti di una griglia equamente spaziate detti nodi. La risoluzione del modello dipende dalla spaziatura tra i singoli punti.

**Modelli spettrali:** invece di usare punti di griglia utilizzano una combinazione di onde continue di differente lunghezza e ampiezza per specificare le variabili previste in tutti i punti, non necessariamente coincidenti con i nodi. E' un po' come se si cercasse una funzione matematica (detta *armonica*) in grado di descrivere per esempio tutte le ondulazioni di una corrente a getto. La risoluzione del modello in questo caso dipende dal numero di onde utilizzate per rappresentare i processi meteorologici, ma l'espansione in serie delle armoniche sferiche deve essere troncata a un punto opportuno; il processo di troncamento può essere *triangolare* (nella maggior parte dei modelli) o *romboideale*. I modelli spettrali usano comunque una combinazione di tecniche sia spettrali, sia a punti di griglia, per esempio la parte spettrale include la valutazione del gradiente di pressione e della forza di Coriolis. Altre parti, come per esempio le precipitazioni, la convezione e i processi radiativi, devono invece essere sempre calcolati sui punti di griglia.

**Notazione scientifica esponenziale:** Notazione comune con cui vengono espresse le grandezze fisiche. Il valore numerico viene espresso come prodotto di due fattori costituiti il primo da un numero con virgola e il secondo da una potenza a base 10. La parte intera del primo numero deve essere espressa da un termine diverso da zero. Il totale di cifre presenti nel primo numero si chiamano **cifre significative**, l'esponente della base 10 si chiama **ordine di grandezza** del numero. Esempio:  $8.76 \times 10^{12}$  m/s è espresso mediante 3 cifre significative, e l'ordine di grandezza è uguale a 2, mentre m/s rappresenta l'**unità di misura**. In formalismo corrente questo numero è 876.

**Output:** i risultati disponibili all'uscita di un calcolatore, dopo un'elaborazione. Nel caso dei modelli matematici è spesso definito «run» o «corsa».

**Parametrizzazione dei feno-**

**meni fisici:** esprimere processi a piccola scala in funzione delle grandezze a scale più grandi con particolare riferimento agli scambi di calore latente, calore sensibile e quantità di moto tra superficie ed atmosfera, ai fenomeni convettivi, ai processi di formazione della pioggia.

**Sinottico:** eseguito contemporaneamente. (dal greco: «sin»=insieme, «opsis»=visione). Nell'accezione più usata in meteorologia: «osservazione sinottica» si riferisce all'emissione di mappe esprimenti i valori misurati delle variabili dello stato dell'atmosfera, prodotte ad intervalli regolari sincronizzati.

**SST:** acronimo di *Sea Surface Temperature*, che significa temperatura superficiale del mare. Questa variabile entra nei modelli oceanici in accoppiamento con i modelli atmosferici, poiché è stato dimostrato che le SST influenzano la circolazione atmosferica su scale di tempo mensili e stagionali.

**Subroutine:** parte di software esterno all'algoritmo principale, richiamata dal programma stesso.

**Termodinamica:** Branca della fisica che studia gli scambi di calore.

**Time Step:** intervallo di tempo tra due simulazioni successive; utilizzato per l'avanzamento del calcolo in un modello dinamico.

**UTC:** Universal Time Coordinated, è l'ora del meridiano di riferimento, quello passante da Greenwich

**Viscosità molecolare:** grandezza fisica correlata all'attrito interno fra le molecole.

## Bibliografia

HOLTON JAMES R. (1992) - *An introduction to dynamic meteorology*, Academic press

*Fondamentale testo di dinamica atmosferica. Accessibile solo a livello universitario.*

NAVARRA A. (1996) - *Le previsioni del tempo*. Il Saggiatore, Milano, p.123.

*Scritto da un ricercatore del CNR di Bologna, è una chiara introduzione teorica ai modelli di previsione atmosferica. Carente sulla parte più operativa. Accessibile a tutti.*

PASINI A. (2003) - *I cambiamenti climatici: meteorologia e clima simulato*. Bruno Mondadori. 254 p. *Leggi la recensione di C. Cassardo in questo stesso fascicolo.*

SPIEGEL MURRAY R. (1975) - *Teoria e applicazioni di analisi matematica*. Etas libri, Milano, pp.384.

*Tra i tanti testi di matematica disponibili, segnaliamo questo, poiché contiene numerosi esercizi svolti, che rendono più comprensibili gli argomenti trattati. Nella stessa collana sono presenti numerosi altri titoli che trattano approfonditamente gli argomenti di fisica e matematica citati nell'articolo. Accessibile dalla fine dell'ultimo anno di scuola secondaria superiore.*

*Un'eccellente raccolta di lavori dedicata alla previsione numerica del tempo è pubblicata sul numero 30 (giugno 2000) de LA MÉTÉOROLOGIE, in particolare*

*COIFFIER J. - Un demi-siècle de prévision numérique du temps.*

*Più tecnico e di grande dettaglio il volume di atti del congresso «50<sup>th</sup>*

*Anniversary of Numerical Weather Prediction», tenutosi a Potsdam il 9-10 marzo 2000, ed edito dalla European Meteorological Society.*

## Siti internet

<http://westwind.ch>

*Questo sito svizzero, sobrio ed essenziale, riassume le migliori carte disponibili gratuitamente in rete, tra cui quelle derivanti dal BOLAM. Link ai principali centri meteorologici mondiali.*

<http://ecmwf.int>

*Sito del centro europeo di previsione meteorologica a medio termine, con sede a Reading, Inghilterra. Mette a disposizione numerosi documenti, frutto del lavoro di molti ricercatori. Tuttavia è disponibile liberamente al pubblico solo una limitata serie di carte meteo.*

<http://www.cmirl.ge.infn.it/fr/cmirl.html>

*Sito del centro meteo-idrologico della regione Liguria. In questo indirizzo è presente una sezione esplicativa relativa ai modelli di previsione meteorologica in generale, e del BOLAM in particolare.*

[www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org)

*L'Italia partecipa alle attività del Consorzio Internazionale COSMO (COnsortium for Small scale MOdelling) finalizzato allo sviluppo ed all'utilizzo operativo del modello non idrostatico Lokal Modell. Ipaesi aderenti a COSMO sono Germania, Svizzera, Italia, Grecia e Polonia. L'istituzione italiana firmataria dell'accordo internazionale è UGM di Aeronautica Militare.*

**Da oggi operativo il nuovo modello numerico ETA2003**

**[www.ilMeteo.it](http://www.ilMeteo.it)**

**- sezione carte meteo -**